



COMMISSION EUROPÉENNE



Document de référence sur les meilleures techniques
disponibles

Systemes de refroidissement industriels

Décembre 2001

Ce document est la traduction de la version anglaise publiée par la Commission européenne qui seule fait foi.

Traduction V 1

RESUME

Le présent document de référence sur l'application des meilleures techniques disponibles aux systèmes de refroidissement industriel (BREF) s'inscrit dans le cadre de l'échange d'informations prévu à l'article 16, paragraphe 2, de la directive 96/61/CE du Conseil sur l'IPPC. Ce document est à consulter en corrélation avec la préface qui en décrit les objectifs et l'utilisation.

Le refroidissement industriel a été considéré dans le cadre de l'IPPC comme une question horizontale. Les "meilleures techniques disponibles" (MTD) présentées dans le présent document sont donc évaluées sans examiner en détail le procédé industriel devant être refroidi. Les MTD sont toutefois évaluées en fonction des contraintes applicables au refroidissement du procédé industriel. Les MTD appliquées au refroidissement d'un procédé constituent une question complexe où les conditions de réfrigération du procédé, les facteurs propres au site et les critères environnementaux doivent être soigneusement soupesés pour pouvoir appliquer des mesures viables sur le plan économique et technique.

On entend par "systèmes de refroidissement industriel" des systèmes destinés à extraire le trop-plein de chaleur d'un fluide par échange calorifique avec de l'eau ou de l'air, de manière à abaisser la température de ce fluide à la température ambiante.

Le présent document décrit les MTD applicables à des systèmes de refroidissement auxiliaires de procédés industriels exploités dans des conditions normales. On sait qu'un système de refroidissement sûr influence favorablement la fiabilité du procédé industriel. Le présent BREF n'examine cependant pas le fonctionnement du refroidisseur par rapport à la sécurité du procédé.

Le présent document présente une approche intégrée permettant de développer des MTD applicables au refroidissement et constate que la MTD finalement adoptée dépend essentiellement du site. Pour ce qui est du choix du système, l'approche adoptée fait que seuls les aspects liés à la performance environnementale peuvent être traités, son but n'étant pas de sélectionner, de disqualifier ou d'habiliter l'un ou l'autre des systèmes utilisés. Lorsque des mesures de réduction sont appliquées, la MTD adoptée vise à déterminer les effets croisés, de manière à équilibrer les émissions provenant des refroidisseurs.

Les cinq chapitres du document principal décrivent la MTD adoptée, ses principaux aspects et principes, les systèmes de refroidissement et leurs caractéristiques environnementales, les principaux résultats issus des MTD, ainsi que les conclusions et recommandations concernant les travaux ultérieurs. Onze annexes donnent des informations générales sur certains aspects de la conception et du fonctionnement des systèmes de refroidissement, ainsi que des exemples illustrant les MTD adoptées.

1. Approche intégrée

L'approche MTD intégrée consiste à examiner les performances environnementales du système de refroidissement par rapport aux performances environnementales globales d'un procédé industriel. Elle vise à réduire au minimum les effets directs et indirects dus au fonctionnement du système. Elle repose sur le fait que les performances environnementales d'un procédé de refroidissement dépendent en grande partie du choix et de la conception du système. C'est pourquoi, pour les nouvelles installations, l'approche est axée sur la prévention des émissions, ce qui exige le choix d'une configuration de refroidissement appropriée, ainsi que sur la conception et la construction d'un système de refroidissement adapté. L'optimisation du fonctionnement journalier permet également de réduire les émissions.

Les possibilités de prévention par l'adoption de mesures techniques sont à court terme moins nombreuses pour les systèmes existants. L'accent est surtout mis sur l'optimisation du fonctionnement et sur les circuits de contrôle/commande. Avec les systèmes existants, on peut

fixer un grand nombre de paramètres tels que l'encombrement, la disponibilité des ressources de fonctionnement et les contraintes législatives en vigueur et on dispose d'une petite marge de manœuvre pour les modifier. L'approche MTD générale présentée dans le présent document peut toutefois être considérée comme un but à long terme compatible avec un remplacement cyclique des équipements d'installations existantes.

L'approche MTD reconnaît que le refroidissement est un aspect essentiel de nombreux procédés industriels et qu'il devrait être considéré comme un élément important du système global de gestion de l'énergie. L'emploi rationnel de l'énergie dans les procédés industriels est très important du point de vue de l'environnement et du rapport coût/efficacité. Les MTD doivent avant tout tenir compte du rendement énergétique global du procédé industriel ou de fabrication avant de prendre des mesures pour optimiser le système de refroidissement. Pour accroître le rendement énergétique global, les industriels s'efforcent de réduire la quantité de chaleur non récupérable par une gestion énergétique adaptée et par l'adoption de programmes d'économie d'énergie intégrés. On peut ainsi échanger de l'énergie entre les différentes unités de réfrigération du procédé industriel ou de fabrication ou relier le procédé avec des procédés contigus. On a tendance à adopter le principe de la récupération de chaleur dans les régions industrialisées où les sites industriels sont reliés entre eux ou connectés au réseau de chauffage urbain ou à des serres. Le rejet dans l'atmosphère peut constituer la seule solution lorsqu'il n'existe aucun moyen de récupérer et de réutiliser la chaleur.

On distingue la chaleur non récupérable présentant un niveau de température faible (10-25°C), moyen (25-60°C) et élevé (60°C). En général, le refroidissement par voie humide est appliqué en présence de faible température et le refroidissement sec à des niveaux de température élevés. Il n'y a pas de technique de prédilection pour les températures moyennes, pour lesquelles différentes configurations sont possibles.

Après avoir optimisé l'efficacité énergétique globale du procédé industriel ou de fabrication, il reste une certaine quantité de chaleur non récupérable d'un niveau de température donné. On peut effectuer une première sélection dans le choix d'un système de dissipation de la chaleur en confrontant les paramètres suivants:

- le type de refroidissement nécessité par le processus,
- les contraintes liées au site (dont la législation locale),
- les critères environnementaux.

Les paramètres de refroidissement du procédé industriel ou de fabrication doivent toujours être respectés pour que les opérations, y compris le démarrage et l'arrêt du procédé, puissent se dérouler dans des conditions fiables. La température du procédé et la capacité de refroidissement nécessaire doivent être garanties à tout moment pour améliorer l'efficacité du procédé industriel ou de fabrication et réduire la perte de produit et les émissions rejetées dans l'environnement. Plus les procédés sont sensibles à la température, plus le rôle de ce paramètre est important.

Les conditions propres au site limitent les configurations possibles et les modes opératoires applicables au système de refroidissement. Ces conditions sont données par le climat local, la présence d'eau de refroidissement et d'eau réceptrice, la place disponible pour les bâtiments et la sensibilité de la zone environnante aux émissions. Le choix du site pour une nouvelle installation peut revêtir une très grande importance selon la demande de refroidissement nécessitée par le procédé et la capacité de refroidissement requise (importante source d'eau froide, p. ex.). Lorsque le choix d'un site est guidé par d'autres critères ou lorsque des systèmes de refroidissement sont déjà en place, la demande de refroidissement du procédé et les caractéristiques du site sont déjà déterminées.

Le climat local constitue un facteur important en matière de refroidissement parce qu'il influence la température des réfrigérants ultimes que sont l'eau et l'air. Le climat local se caractérise par la structure de la température sèche et humide. Les systèmes de refroidissement

sont en général conçus pour fonctionner dans les conditions climatiques locales les moins favorables, c'est-à-dire aux températures sèche et humide les plus élevées.

L'étape suivante dans le choix et la conception du système de refroidissement consiste à remplir les critères imposés par les MTD tout en respectant les contraintes du procédé et les limites du site. Il s'agit ici de choisir le matériel et les équipements adéquats pour réduire la maintenance, faciliter le fonctionnement du système de refroidissement et respecter les exigences environnementales. Outre le rejet de chaleur dans l'environnement, d'autres incidences peuvent survenir telles que les émissions d'additifs servant à conditionner les systèmes de refroidissement. Il est à noter que l'impact du système sur l'environnement sera moins important lorsque l'on parvient à réduire la quantité et le niveau de chaleur à dissiper. Les principes des MTD peuvent également être appliqués aux systèmes de refroidissement existants. On peut adopter - sans en abuser - des solutions techniques, par exemple changer la technique de refroidissement ou modifier l'équipement existant ou les produits chimiques utilisés.

2. Systèmes de refroidissement utilisés

Les systèmes de refroidissement sont fondés sur les principes de la thermodynamique. Ils facilitent les échanges de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant ainsi que le rejet de la chaleur non récupérable dans l'environnement. Les systèmes de refroidissement industriel peuvent être classés selon leur conception et le type de réfrigérant utilisé: eau ou air ou une combinaison des deux.

Les échangeurs de chaleur améliorent l'échange de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant. Le réfrigérant transporte la chaleur dans le milieu ambiant. Dans les systèmes en circuit ouvert, le réfrigérant est en contact avec le milieu ambiant. Dans les systèmes en circuit fermé, le réfrigérant ou le fluide de procédé circule dans des tubes ou des serpentins et il n'est pas en contact direct avec l'environnement.

Les systèmes à une passe sont généralement utilisés dans des installations de grande capacité localisées sur des sites disposant de sources d'eau de refroidissement et d'eaux de surface suffisantes. En l'absence de source d'eau sûre, on utilise des systèmes de refroidissement forcé (tours de refroidissement, également appelées aéroréfrigérants).

Dans les aéroréfrigérants en circuit ouvert, l'eau de refroidissement est refroidie par contact avec l'air. Les réfrigérants atmosphériques sont équipés de dispositifs qui améliorent le contact air/eau. Le courant d'air peut être créé par un tirage forcé (ventilateurs) ou par tirage naturel. Les aéroréfrigérants à circulation d'air forcée sont très souvent utilisés pour les petites et les grandes capacités. Les aéroréfrigérants à tirage naturel sont essentiellement utilisés dans les installations de grande capacité (production d'électricité, p. ex.).

Dans les systèmes en circuit fermé, les tubes ou les serpentins dans lesquels le réfrigérant ou le fluide de procédé circulent sont refroidis et refroidissent à leur tour le fluide qu'ils contiennent. Dans les systèmes par voie humide, un courant d'air refroidit par évaporation les tubes ou les serpentins qui sont aspergés d'eau. Dans les systèmes par voie sèche, seul un courant d'air circule dans les tubes ou les serpentins. L'un et l'autre systèmes peuvent être équipés de serpentins munis d'ailettes qui permettent d'agrandir la surface de refroidissement et donc d'améliorer l'efficacité de la réfrigération. Les systèmes en circuit fermé humide sont largement utilisés dans les installations industrielles de faible puissance. Le principe du refroidissement atmosphérique sec est appliqué dans les petites et dans les grandes installations lorsque l'eau manque ou lorsqu'elle est très coûteuse.

Les systèmes en circuit ouvert et fermé humide sec sont constitués de tours de refroidissement à ventilation d'air forcée. Ils peuvent fonctionner selon un régime sec ou humide et permettent de réduire la formation de panache. La possibilité d'exploiter ces systèmes en régime sec

(notamment les petites unités à cellules) pendant la période où les températures ambiantes sont basses permet de réduire la consommation annuelle d'eau et la formation de panache visible.

Tableau 1: Caractéristiques techniques et thermodynamiques des différents systèmes de refroidissement industriel (centrales électriques exclues)

Système de refroidissement	Réfrigérant	Principal mode de réfrigération	Approche minimale (K) ⁴⁾	Température finale minimale du fluide de procédé pouvant être atteinte ¹⁾ (°C)	Puissance du procédé industriel (MW _{th})
Système ouvert à une passe - système direct	Eau	Conduction/ Convection	3 – 5	18 – 20	<0,01 - > 2000
Système ouvert à une passe - système indirect	Eau	Conduction/ Convection	6 – 10	21 – 25	<0,01 - > 1000
Aéroréfrigérant en circuit ouvert - système direct	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Evaporation ³⁾	6 – 10	27 – 31	< 0,1 - >2000
Aéroréfrigérant en circuit ouvert - système indirect	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Evaporation ³⁾	9 – 15	30 – 36	< 0,1 - > 200
Aéroréfrigérant en circuit fermé humide	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation + convection	7 – 14 ⁷⁾	28 – 35	0,2 – 10
Aéroréfrigérant en circuit fermé sec	Air	Convection	10 – 15	40 – 45	< 0,1 – 100
Aéroréfrigérant en circuit ouvert humide sec	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation + convection	7 – 14	28 – 35	0,15 - 2,5 ⁶⁾
Aéroréfrigérant humide sec	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation + convection	7 – 14	28 – 35	0,15 - 2,5 ⁶⁾

Notes:

- 1) L'eau est le fluide de refroidissement secondaire et elle est en grande partie remise en circulation. En s'évaporant, l'eau transmet la chaleur à l'air.
- 2) L'air est le caloporteur qui transmet la chaleur dans le milieu ambiant.
- 3) L'évaporation constitue le principal mode de refroidissement. La chaleur est également transférée dans de moindres proportions par conduction/convection.
- 4) Approches concernant la température sèche ou humide. Les approches de l'échangeur de chaleur et de la tour de refroidissement doivent être additionnées.
- 5) Les températures finales dépendent du climat local (ces données sont valables pour des conditions climatiques moyennes prévalant en Europe de 30°/21°C pour les température sèche et humide et 15°C maximum pour la température de l'eau).
- 6) Capacité des petites unités. Des capacités plus élevées peuvent être obtenues en combinant plusieurs unités ou en installant des systèmes de refroidissement spéciaux.
- 7) En cas de système indirect ou de convection, l'approche augmente dans cet exemple de 3 à 5 K, ce qui a pour effet d'accroître la température de procédé.

Le tableau montre les caractéristiques des systèmes de refroidissement dans certaines conditions climatiques. La température finale du fluide industriel quittant l'échangeur de chaleur après refroidissement dépend de la température du réfrigérant et de la conception du système de refroidissement. La chaleur spécifique de l'eau est plus élevée que celle de l'air, de sorte que l'eau est un meilleur réfrigérant. La température de l'air et de l'eau de refroidissement dépend de la température sèche et humide du local. Plus ces températures sont élevées, plus il est difficile d'abaisser la température finale du fluide de procédé.

La température finale du fluide de procédé correspond à la somme de la température ambiante (température du réfrigérant) la plus basse et de l'écart de température minimum exigé entre le réfrigérant (à l'entrée du système de refroidissement) et le fluide de procédé (à la sortie du système de refroidissement) en aval de l'échangeur de chaleur, également appelée "approche thermique". Il est possible techniquement de concevoir une approche très réduite mais les coûts sont inversement proportionnels à la taille. Plus l'approche est réduite plus on peut abaisser la température finale du procédé. Chaque échangeur de chaleur a son approche. Lorsque plusieurs échangeurs sont installés en série, toutes les approches sont ajoutées à la température du réfrigérant (à l'entrée du système de refroidissement) afin de calculer la température finale du procédé. Des échangeurs de chaleur supplémentaires sont utilisés dans les systèmes de refroidissement indirects équipés d'un circuit de refroidissement extérieur. Ce circuit secondaire et le circuit de refroidissement primaire sont reliés par un échangeur de chaleur. Les systèmes de

refroidissement indirects sont utilisés lorsque l'on veut absolument éviter la fuite de substances de procédé dans l'environnement.

Les approches minimales et les capacités de refroidissement couramment appliquées dans les centrales électriques sont quelque peu différentes de celles utilisées dans d'autres applications en raison des critères particuliers attachés au processus de condensation de la vapeur. Les différentes approches et les capacités de production d'électricité sont résumées ci-après.

Tableau 2: Exemples de capacités et de caractéristiques thermodynamiques de divers systèmes de refroidissement utilisés dans les centrales électriques

Système de refroidissement	Approche adoptée (K)	Capacité de production d'énergie électrique (MW_{th})
Systèmes à passage unique	13-20 (écart final : 3-5)	< 2700
Aéroréfrigérant en circuit ouvert humide	7-15	< 2700
Aéroréfrigérant en circuit ouvert humide sec	15-20	< 2500
Aérocondenseur	15-25	< 900

3. Aspects environnementaux des systèmes de refroidissement utilisés

Les aspects environnementaux des systèmes de refroidissement varient selon la configuration adoptée. Les efforts visent principalement à accroître l'efficacité énergétique globale et à réduire les rejets dans le milieu aquatique. Les niveaux de consommation et d'émission sont très étroitement liés au site et, lorsqu'on peut les quantifier, sont extrêmement variables. Dans le cas d'une approche MTD intégrée, il faut tenir compte des effets croisés lors de l'évaluation de chacun des aspects environnementaux et des mesures de réduction concomitantes.

- **Consommation d'énergie**

La consommation directe et indirecte d'énergie est un aspect environnemental important qui concerne tous les systèmes de refroidissement. La consommation spécifique indirecte d'énergie correspond à l'énergie consommée pour refroidir le procédé. Cette consommation indirecte peut augmenter en cas de sous-performance de la configuration adoptée, ce qui peut entraîner une augmentation de la température du procédé (ΔK), que l'on exprime en $kW_e/MW_{th}/K$.

La consommation spécifique directe d'énergie d'un système de refroidissement s'exprime en kW_e/MW_{th} et se rapporte à la quantité d'énergie consommée par l'ensemble des équipements du système (pompes, ventilateurs) pour chaque MW_{th} dissipé.

Les mesures prises pour réduire la consommation spécifique indirecte d'énergie sont les suivantes :

- choisir la configuration de refroidissement entraînant la consommation spécifique la plus faible (en général les systèmes à passage unique),
- adopter une configuration avec de petites approches,
- diminuer la résistance à l'échange de chaleur en assurant un bon entretien du système.

Par exemple, dans le cas des centrales électriques, le passage d'un système à passage unique à un système en circuit fermé entraîne une augmentation de la consommation d'énergie par les équipements auxiliaires et une efficacité moindre du cycle thermique.

Il existe des pompes et des ventilateurs plus efficaces qui permettent de diminuer la consommation spécifique directe. On peut abaisser la résistance et les chutes de pression survenant au cours du procédé en adoptant une certaine configuration et en utilisant des séparateurs de gouttes et un garnissage présentant une faible résistance. Un bon nettoyage

mécanique ou chimique des surfaces permet de maintenir une faible résistance au cours du procédé.

- **Eau**

L'eau est un élément important des systèmes de refroidissement par voie humide. Elle constitue le principal réfrigérant mais aussi le milieu de réception des eaux de refroidissement rejetées. Les prélèvements d'eau importants ont pour effet de choquer et d'entraîner les poissons et d'autres organismes aquatiques. Le rejet de grandes quantités d'eau chaude peut également avoir une influence sur le milieu aquatique mais on peut en contrôler les effets en choisissant des sites de prélèvement et de rejet adéquats et en étudiant les courants marins, également dans les estuaires, pour que les eaux chaudes soient bien brassées et qu'elles puissent se disperser dans le sens horizontal (advection).

La consommation d'eau oscille entre $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}_{\text{th}}$ pour un aéroréfrigérant en circuit ouvert humide sec et $86 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}_{\text{th}}$ pour un système à passage unique. Pour réduire la consommation d'eau nécessaire aux systèmes à passage unique, il faut modifier le refroidissement forcé. On réduit ainsi les rejets d'eau chaude et les émissions de produits chimiques et de déchets. On peut diminuer la consommation d'eau des systèmes en circuit fermé en augmentant le nombre de cycles, en améliorant la qualité de l'eau d'appoint ou en optimisant l'emploi des sources d'eaux résiduelles disponibles sur le site ou en dehors du site. Ces deux mesures demandent de mettre en place un programme complexe de traitement des eaux de refroidissement. Le refroidissement humide sec permet de refroidir par voie sèche pendant certaines périodes de l'année, lorsque la demande de refroidissement est moins forte ou lorsque les températures de l'air sont basses, et de diminuer ainsi la consommation d'eau, notamment dans les petites unités à cellules.

La configuration et l'emplacement de la prise d'eau et de divers équipements (filtres, barrières, protection contre la lumière et le bruit) permettent de réduire les chocs et l'entraînement des organismes aquatiques. Les effets sur les équipements dépendent des espèces. Etant donné les coûts élevés, il est préférable d'adopter de telles mesures dans les zones rurales. On peut réduire l'impact des eaux chaudes sur les eaux superficielles en abaissant la capacité de refroidissement requise, si possible en réutilisant davantage la chaleur.

- **Rejets de chaleur dans les eaux de surface**

Comme nous l'avons indiqué plus haut, les rejets de chaleur dans les eaux de surface peuvent avoir des incidences sur les eaux réceptrices. Les facteurs d'influence peuvent être constitués par la capacité de refroidissement disponible des eaux superficielles, ainsi que par la température effective et l'état écologique des eaux de surface. Les rejets de chaleur entraînent pendant les périodes de canicule un dépassement des normes de qualité environnementales applicables aux températures sous l'effet de la chaleur rejetée par les eaux de refroidissement dans les eaux de surface. Des paramètres de température ont été fixés par la directive 78/659/CEE pour deux systèmes écologiques (eaux salmonicoles et cyprinicoles). L'impact environnemental des rejets de chaleur ne dépend pas seulement de la température effective des eaux réceptrices, mais aussi de l'élévation de température à la limite de la zone de mélange des eaux. La quantité et le niveau de chaleur rejetée dans les eaux de surface par rapport à la dimension des eaux réceptrices sont également à prendre en compte. La migration des salmonidés peut être contrecarrée lorsque les rejets de chaleur se font dans des eaux d'assez petite superficie et que le panache d'eau chaude atteint le côté opposé de la rivière ou du canal. L'élévation de la température due au rejet de chaleur peut également accentuer la respiration et la production biologique (eutrophisation) et abaisser la concentration de l'eau en oxygène. Les aspects précités et les mesures permettant de réduire la chaleur dissipée dans les eaux de surface doivent être pris en compte lors de la conception d'un système de refroidissement.

- **Rejets de substances dans les eaux de surface**

Ces rejets sont dus aux :

- additifs ajoutés à l'eau de refroidissement et aux produits de réaction,
- substances en suspension dans l'air qui se sont introduites par la tour de refroidissement,
- produits de corrosion dus à la corrosion des équipements du système de refroidissement,
- fuites des fluides de procédé et de leurs produits de réaction.

Afin de garantir le bon fonctionnement des systèmes de refroidissement, il peut être nécessaire de traiter l'eau de refroidissement pour protéger les équipements de la corrosion et empêcher l'écaillage et l'encrassement. Les traitements sont différents pour les systèmes à passage unique et les systèmes à circulation forcée. Les programmes de traitement adoptés pour ces derniers peuvent être extrêmement complexes et de nombreux produits chimiques peuvent être utilisés. Il en résulte que les niveaux d'émission dans la purge de déconcentration sont très variables et qu'il est difficile de rapporter des niveaux d'émission représentatifs. La purge de déconcentration est parfois traitée avant le circuit de rejet.

Les émissions de biocides oxydants dans les systèmes à passage unique, mesurés à la sortie en tant qu'oxydants non liés, varient entre 0,1 [mg FO/l] et 0,5 [mg FO/l], selon le mode et la fréquence du dosage.

Tableau 3: Substances chimiques utilisées dans les aéroréfrigérants en circuit ouvert et fermé humide

Exemples de traitement chimique*	Problèmes concernant la qualité de l'eau					
	Corrosion		Écaillage		Salissures (biologiques)	
	Syst. à passage unique	Syst. à circulation forcée	Syst. à passage unique	Syst. à circulation forcée	Syst. à passage unique	Systèmes à circulation forcée
Zinc		X				
Molybdates		X				
Silicates		X				
Phosphonates		X		X		
Polyphosphonates		X		X		
Polyols				X		
Matières organiques naturelles				X		
Polymères	(X)		(X)	X		
Biocides non oxydants						X
Biocides oxydants					X	X

* le chromate n'est plus très utilisé en raison de ses effets très nocifs sur l'environnement

Le choix et l'utilisation d'équipements de refroidissement fabriqués en matériaux respectueux du milieu ambiant dans lequel ils vont fonctionner peuvent permettre de réduire les fuites et la corrosion. Le milieu est constitué par :

- les conditions du procédé, comme la température, la pression et la vitesse du débit,
- le fluide réfrigéré et
- les caractéristiques chimiques de l'eau de refroidissement.

Les échangeurs de chaleur, les conduites, les pompes et l'enveloppe sont généralement fabriqués en acier au carbone, en alliage cuivre-nickel et acier inoxydable de différente qualité mais le titane (Ti) est de plus en plus utilisé. Les revêtements et les peintures sont également utilisés pour protéger la surface.

- **Utilisation de biocides**

Les systèmes à passage unique sont essentiellement traités avec des biocides oxydants contre l'encrassement. Les quantités utilisées peuvent être déterminées par la consommation annuelle d'additifs oxydants, exprimée en équivalents de chlore par MW_{th} et rapportée au niveau d'encrassement de l'échangeur de chaleur ou à proximité de celui-ci. Les halogènes employés comme additifs oxydants polluent l'environnement, notamment en générant des produits dérivés halogénés.

Dans les systèmes en circuit ouvert, l'eau est prétraitée contre l'écaillage, la corrosion et l'encrassement. Les volumes relativement moindres des systèmes humides permettent d'adopter d'autres traitements tels que l'ozone et les ultraviolets, mais ils demandent des conditions opératoires particulières et peuvent être assez onéreux.

Certaines mesures d'exploitation permettent de diminuer les effets néfastes provoqués par le rejet de l'eau de refroidissement, telles que la fermeture de la purge pendant le traitement de choc et le traitement de la purge de déconcentration avant le rejet dans les eaux de surface réceptrices. Lors du traitement des purges dans une unité de traitement des eaux usées, il convient de contrôler l'activité résiduelle des biocides, qui peut affecter la population microbienne.

Les biocides utilisés pour réduire les émissions dans les circuits de rejet et les effets sur le milieu aquatique doivent à la fois respecter les exigences du système de refroidissement et la sensibilité du milieu aquatique récepteur.

- **Émissions dans l'atmosphère**

Les émissions atmosphériques provenant des aéroréfrigérants secs ne sont généralement pas considérées comme l'aspect le plus important du refroidissement. Il peut y avoir contamination en cas de fuite du produit mais une bonne maintenance permet d'éviter ce risque.

Les gouttelettes présentes dans le circuit de rejet des aéroréfrigérants humides peuvent être contaminées par les produits chimiques servant au traitement de l'eau, par des microbes ou par des produits de corrosion. Des séparateurs de gouttes et un programme de traitement de l'eau optimisé permettent de réduire ces risques.

La formation de panache est prise en compte lorsque des effets de distorsion de l'horizon apparaissent ou lorsque le panache risque de parvenir au niveau du sol.

- **Bruit**

Les émissions sonores constituent un problème typique des grandes tours de refroidissement à tirage naturel et de tous les systèmes de refroidissement mécaniques. Les niveaux de bruit non atténués vont de 70 [dB(A)] pour les systèmes à tirage naturel à 120 [dB(A)] pour les tours à circulation d'air forcée. Les écarts varient selon le type d'équipement et selon le point de mesure (à l'entrée ou à la sortie d'air). Les ventilateurs, les pompes et les chutes d'eau constituent les principales sources de bruit.

- **Risques**

Les risques liés aux systèmes de refroidissement sont les suivants : fuite des échangeurs de chaleur, stockage de produits chimiques, contamination biologique des systèmes de refroidissement humide (maladie du légionnaire, p. ex.).

La maintenance et la surveillance préventives permettent de prévenir les fuites et la contamination biologique. Des systèmes de refroidissement indirects ou des mesures de prévention spécifiques sont envisagés lorsqu'il y a un risque que des fuites entraînent le rejet de grandes quantités de substances nuisibles dans le milieu aquatique.

Il est conseillé d'adopter un programme de traitement de l'eau approprié pour prévenir le développement de *Legionellae pneumophila* (*Lp*). Il n'a pas été possible de déterminer des seuils maximums de concentration de *Lp*, mesurés en cellules souches [CFU par litre], en-deçà desquels tout risque est exclu. Ce risque doit particulièrement être pris en compte lors des opérations de maintenance.

- **Résidus issus de l'exploitation des systèmes de refroidissement**

On dispose de peu d'informations sur les résidus ou les déchets. Les boues provenant du prétraitement de l'eau de refroidissement ou du circuit de collecte de vidange des bâches doivent être considérées comme des déchets. Ces boues sont traitées et éliminées de diverses façons selon leurs propriétés mécaniques et leur composition chimique. Les taux de concentration varient selon le programme de traitement de l'eau.

Les émissions dans l'environnement peuvent également être abaissées en adoptant des mesures de protection des équipements moins nocives et en utilisant des matériaux pouvant être recyclés après le déclassement ou le remplacement des équipements.

4. Principales conclusions sur les MTD

Les MTD, ou l'approche MTD de base adoptée pour les systèmes nouveaux et existants, sont présentées au chapitre 4. Les résultats sont résumés ci-après.

Il est admis que l'approche MTD finalement adoptée sera axée sur le site. Certains aspects seront cependant traités dans le cadre de MTD générales. Dans toutes les situations, il convient d'examiner au préalable et d'appliquer les mesures permettant de réutiliser la chaleur et de réduire la quantité et le niveau de chaleur non récupérable avant de rejeter la chaleur issue du procédé industriel dans le milieu ambiant.

Quelle que soit l'installation, les MTD constituent une technique, une méthode ou une procédure résultant d'une approche intégrée qui vise à réduire les incidences environnementales des systèmes de refroidissement industriel et à équilibrer les effets directs et indirects. Les mesures de réduction doivent servir à maintenir le système de refroidissement à un niveau d'efficacité minimum ou avec une perte d'efficacité négligeable par rapport aux effets positifs sur les incidences environnementales.

Un certain nombre de techniques pouvant être considérées comme des BAT ont été définies pour traiter certains aspects liés à l'environnement. Aucune MTD précise n'a été définie pour réduire les déchets ou adopter des techniques de traitement des déchets tout en évitant certains risques pour l'environnement, tels que la contamination du sol et de l'eau ou, en cas d'incinération, de l'air.

- **Contraintes concernant le procédé et le site**

Le choix effectué entre un procédé de refroidissement humide, sec et humide sec afin de respecter les contraintes du procédé et du site devrait viser une efficacité énergétique globale maximale. Pour atteindre une efficacité globale élevée avec de grandes quantités de chaleur de faible niveau (10 à 25°C), la MTD consiste à refroidir le procédé avec des systèmes à passage unique. Lorsqu'il s'agit d'une nouvelle implantation dans une zone non urbaine, le choix peut se porter sur un site (côtier) disposant de grandes quantités d'eau de refroidissement et d'eaux de

surface présentant une capacité suffisante pour recevoir des volumes d'eau de refroidissement importants.

Lorsque les substances refroidies présentent un risque élevé pour l'environnement (en étant émises par le système de refroidissement), la MTD consiste à utiliser des systèmes de refroidissement indirects dotés d'un circuit de réfrigération secondaire.

L'utilisation d'eaux souterraines doit en principe être limitée au strict minimum, par exemple lorsque l'épuisement des réserves d'eaux souterraines ne peut pas être exclu.

- **Diminution de la consommation directe d'énergie**

On peut abaisser la consommation directe d'énergie en réduisant la résistance à l'eau et/ou à l'air du système de refroidissement et en utilisant des équipements consommant peu d'énergie. La modulation du flux d'air et d'eau donne de bons résultats lorsque le procédé devant être réfrigéré exige diverses opérations et peut être considérée comme une MTD.

- **Diminution de la consommation d'eau et des rejets de chaleur dans l'eau**

La diminution de la consommation d'eau et la réduction des rejets de chaleur dans l'eau sont étroitement liées et donnent lieu aux mêmes solutions techniques.

La quantité d'eau nécessaire au refroidissement dépend de la quantité de chaleur à dissiper. Plus le niveau de réutilisation de l'eau de refroidissement est élevé, moins il faut d'eau de refroidissement.

La remise en circulation de l'eau de refroidissement, dans un système en circuit ouvert ou fermé humide, est considérée comme une MTD lorsque les sources d'eau disponibles sont insuffisantes ou incertaines.

L'augmentation du nombre de cycles, dans les systèmes à circulation forcée, peut être considérée comme une MTD mais la nécessité de traiter l'eau de réfrigération constitue un facteur limitant.

L'emploi de séparateurs de gouttes pour réduire l'eau entraînée à moins de 0,01 % du flux de recirculation total est considéré comme une MTD.

- **Diminution de l'entraînement des espèces**

De multiples techniques ont été mises au point pour empêcher l'entraînement ou réduire les dommages dus à l'entraînement. Les résultats sont variables et dépendent du site. Bien qu'aucune MTD n'ait été clairement définie dans ce domaine, les efforts portent essentiellement sur l'analyse du biotope - le succès ou l'échec dépendant dans une grande mesure de certaines caractéristiques comportementales des espèces - ainsi que sur la conception et l'emplacement adéquats de la prise d'eau.

- **Diminution des rejets de substances chimiques dans l'eau**

Conformément à l'approche MTD, l'utilisation de techniques permettant de réduire les émissions dans le milieu aquatique doit être considérée dans l'ordre suivant :

1. choix d'une configuration de refroidissement moins polluante pour les eaux de surface,
2. utilisation de matériaux résistant mieux à la corrosion,
3. prévention et diminution des fuites des fluides de procédé dans le circuit de refroidissement,
4. application de mesures différentes (non chimiques) pour traiter l'eau de refroidissement,

-
5. choix d'additifs de réfrigération moins polluants,
 6. utilisation optimisée (contrôle et dosage) des additifs de réfrigération.

Les MTD consistent à réduire l'encrassement et la corrosion grâce à une conception adaptée du système, ce qui diminue le besoin de conditionner l'eau de refroidissement. Dans les systèmes à une passe, la solution consiste à éviter les zones stagnantes et les turbulences et à maintenir une vitesse d'eau minimale (0,8 [m/s] pour les échangeurs de chaleur, 1,5 [m/s] pour les condenseurs).

D'autres MTD consistent à fabriquer les systèmes à une passe fonctionnant dans un environnement très corrosif avec des matériaux comme du titane ou de l'acier inoxydable de haute qualité ou avec d'autres matériaux présentant des caractéristiques similaires. Un environnement réducteur limite cependant l'emploi du titane.

Dans les systèmes à circulation forcée, les MTD consistent, outre à adopter des mesures concernant la conception, à déterminer les cycles de concentration appliqués et à évaluer la corrosivité du fluide de procédé pour pouvoir choisir un matériau présentant une résistance à la corrosion adéquate.

Dans le cas des aéroréfrigérants, les MTD consistent à utiliser un garnissage adapté en tenant compte de la qualité de l'eau (teneur en matières solides), de l'encrassement, des températures et de la résistance à la corrosion prévus, et à choisir un matériau de construction ne demandant pas de traitement chimique.

Le principe de la VCI (Verband der chemischen Industrie) adopté par l'industrie chimique vise à minimiser les risques encourus par le milieu aquatique en cas de fuite des fluides de procédé. Ce principe consiste à adapter la configuration du système de refroidissement et les moyens de contrôle en fonction des effets environnementaux du fluide de procédé. Compte tenu des risques potentiels élevés encourus par l'environnement en cas de fuite, ce principe permet de renforcer la lutte contre la corrosion, de mettre en place un mode de refroidissement indirect et de renforcer le contrôle des eaux de réfrigération.

- **Réduction des émissions grâce à l'optimisation du traitement des eaux de refroidissement**

Le rythme et la fréquence du dosage en biocides permettent d'optimiser l'utilisation des biocides oxydants dans les systèmes à une passe. Les MTD consistent à réduire l'emploi de biocides en adoptant un dosage ciblé tout en surveillant le comportement des espèces responsables de l'encrassement (mouvement des valves des moules, p. ex.), ainsi qu'en utilisant le temps de séjour de l'eau de refroidissement dans le circuit. Lorsque plusieurs flux de refroidissement sont mélangés à la sortie, les MTD consistent à pratiquer une chloration pulsée, qui permet de réduire la concentration d'oxydants libres présents dans le circuit de rejet. En général, le traitement discontinu des systèmes à une passe est suffisant pour empêcher l'encrassement. Un traitement continu à basse température peut se révéler nécessaire selon l'espèce et la température de l'eau (au-dessus de 10-12°).

En ce qui concerne l'eau de mer, les concentrations d'oxydants résiduels libres présents dans le circuit de rejet à la suite des mesures MTD varient selon le mode de dosage appliqué (continu ou discontinu), la concentration du dosage et la configuration du système de refroidissement. Ces concentrations vont de moins 0,1 [mg/l] à 0,5 [mg/l], avec une valeur moyenne de 0,2 [mg/l] par 24 h.

L'adoption d'une MTD pour le traitement de l'eau, notamment dans le cas des systèmes à circulation forcée utilisant des biocides non oxydants, exige de décider, en toute connaissance de cause, du traitement de l'eau à appliquer et de la manière dont il doit être contrôlé et surveillé. Le choix d'un régime de traitement approprié est une opération complexe qui exige de

tenir compte de nombreux facteurs locaux et propres au site et de relier ces paramètres aux caractéristiques des additifs de traitement eux-mêmes, ainsi qu'aux quantités et aux mélanges utilisés.

Le présent document de référence vise à fournir aux autorités locales chargées de délivrer une autorisation IPPC une base d'évaluation qui les aide à décider au niveau local des MTD à adopter en matière d'additifs de traitement des eaux de refroidissement.

La directive 98/8/CE concernant les produits biocides régit la mise sur le marché européen de ces produits et considère les biocides utilisés dans les systèmes de refroidissement comme une catégorie particulière. L'échange d'informations montre que certains États membres appliquent des régimes d'évaluation particuliers pour les additifs de traitement des eaux de refroidissement.

Les discussions engagées dans le cadre de l'échange d'informations sur les systèmes de refroidissement industriel ont débouché, en ce qui concerne les additifs, sur deux principes pouvant être utilisés comme outils complémentaires par les autorités chargées de délivrer les autorisations :

1. Un instrument d'évaluation fondé sur les principes existants et permettant d'effectuer une comparaison simple des effets potentiels des additifs de traitement sur le milieu aquatique (évaluation comparée, annexe VIII.1).
2. Une évaluation au niveau du site de l'impact potentiel des biocides rejetés dans les eaux réceptrices, fondée sur la directive relative aux produits biocides et sur la méthode de définition des normes de qualité environnementales de la future directive cadre dans le domaine de l'eau (évaluation locale des biocides, annexe VIII.2).

L'évaluation comparée permet de comparer les incidences environnementales de plusieurs additifs de traitement des eaux, tandis que l'évaluation locale des biocides permet de définir en matière de biocides une approche compatible avec les MTD, notamment pour que le rapport PEC/PNEC soit inférieur à 1. L'emploi de méthodes d'évaluation locales pour contrôler les émissions industrielles constitue déjà une pratique courante.

- **Réduction des émissions dans l'atmosphère**

La diminution des émissions atmosphériques provenant des aérorefrigérants est liée à l'optimisation du conditionnement des eaux de refroidissement qui permet de diminuer les niveaux de concentration dans les gouttelettes. Lorsque l'écoulement de l'eau constitue le principal mécanisme de transport, l'emploi de séparateurs de gouttes, qui permet d'abaisser à moins de 0,01 % le flux de recirculation perdu dans l'écoulement, est considéré comme une MTD.

- **Réduction du bruit**

Les mesures primaires consistent à employer des équipements peu bruyants. La réduction sonore peut atteindre 5 [dB(A)].

Les mesures secondaires appliquées à l'entrée et à la sortie des aérorefrigérants à tirage forcé peuvent permettre d'abaisser le bruit de 15 [dB(A)] ou plus. Il est à noter que la réduction du bruit, notamment par des mesures secondaires, peut entraîner une chute de pression devant être compensée par un apport d'énergie supplémentaire.

- **Réduction des fuites et du risque microbiologique**

Les MTD consistent à prévenir les fuites grâce à la conception, à exploiter l'installation dans les limites prévues par la conception et à inspecter régulièrement le système de refroidissement. En ce qui concerne l'industrie chimique notamment, les MTD consistent à appliquer le principe de sécurité de la VCI, évoqué plus haut pour diminuer les rejets dans l'eau.

La présence de *Legionella pneumophila* dans un système de refroidissement ne peut pas être totalement évitée. Les mesures suivantes sont considérées comme des MTD :

- éviter les zones stagnantes et maintenir une vitesse d'écoulement de l'eau suffisante,
- optimiser le traitement de l'eau de refroidissement afin de diminuer l'encrassement, ainsi que la croissance et la prolifération des algues et des amibes,
- nettoyer régulièrement le circuit de collecte des vidanges des bâches,
- diminuer l'exposition des opérateurs en leur faisant porter une protection acoustique et buccale au moment où ils entrent dans l'installation ou la tour à haute pression.

5. Distinction entre les nouveaux systèmes et les systèmes existants

Toutes les principales conclusions concernant les MTD peuvent être appliquées aux nouveaux systèmes. Lorsque des modifications techniques sont nécessaires, leur application peut se limiter aux systèmes existants. Une modification technique est jugée faisable sur le plan technique et économique pour les aéroréfrigérants de faible capacité fabriqués en série. Les modifications techniques concernant les systèmes de grande capacité sont généralement coûteuses et exigent une évaluation technique et économique complexe englobant de nombreux facteurs. De légères adaptations et un remplacement partiel des équipements peuvent être réalisés dans certains cas. Un examen et une évaluation détaillés des incidences sur l'environnement et des coûts peuvent être nécessaires en cas de modifications techniques plus importantes.

En général, les MTD concernant les nouveaux systèmes et les systèmes existants sont identiques lorsqu'il s'agit de réduire les incidences sur l'environnement en améliorant le fonctionnement du système. Ces MTD consistent à :

- optimiser le traitement des eaux de refroidissement en contrôlant le dosage et en choisissant des additifs moins polluants,
- entretenir régulièrement les équipements,
- surveiller les paramètres opératoires, tels que la vitesse de corrosion de la surface de l'échangeur de chaleur, la composition chimique de l'eau de refroidissement, le degré d'encrassement et les fuites.

Voici quelques exemples de techniques appliquées aux systèmes existants et qui sont considérées comme des MTD :

- utiliser un garnissage adéquat pour empêcher l'encrassement,
- remplacer les équipements rotatifs par des dispositifs à faible bruit,
- prévenir les fuites en surveillant les tubes des échangeurs de chaleur,
- effectuer une biofiltration des flux intermédiaires,
- améliorer la qualité de l'eau d'appoint,
- cibler le dosage dans les systèmes à une passe.

6. Conclusions et recommandations en vue de travaux futurs

Le présent document a reçu un soutien massif de la part du groupe de travail technique. L'évaluation et la définition de MTD applicables au refroidissement industriel est une question généralement complexe, étroitement liée au site et au procédé, et qui englobe de nombreux aspects techniques et financiers. Les avis penchent cependant clairement en faveur de MTD générales fondées sur la préface du présent document et sur l'introduction aux MTD figurant au chapitre 4.

L'échange d'informations a mis à jour un certain nombre de questions qui devront être traitées lors de la révision du présent document. En ce qui concerne l'évaluation locale du traitement des eaux de réfrigération, il faudra examiner comment tenir compte de l'ensemble des facteurs et des caractéristiques chimiques concernant le site, mais il faudra également définir des orientations claires et une procédure exploitable. Des investigations supplémentaires devraient également être effectuées dans le domaine des techniques substitutives de traitement des eaux de refroidissement, de la réduction du risque microbiologique et de l'importance des émissions atmosphériques.

SOMMAIRE

RESUME	I
PREFACE	1
PORTEE.....	4
GLOSSAIRE.....	5
ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES	10
1. CONCEPT GÉNÉRAL DE MTD POUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT INDUSTRIELS	12
1.1. Sources de chaleur, niveaux de chaleur et domaines d'application	16
1.2. Niveau de système de refroidissement et influence sur l'efficacité du procédé.....	17
1.2.1 Applications sensibles à la température	17
1.2.2 Applications non sensibles.....	19
1.3. Optimisation du procédé primaire et de réutilisation de la chaleur.....	20
1.3.1 Optimisation du procédé primaire.....	20
1.3.2 Utilisation de la chaleur résiduelle hors site	20
1.4. Choix d'un système de refroidissement répondant aux exigences du procédé et aux conditions du site.....	21
1.4.1 Besoins du procédé	21
1.4.2 Choix du site	22
1.4.3 Conditions climatiques.....	26
1.4.4 Modélisation mathématique, simulations sur des modèles et tests sur des boucles pilotes.....	28
1.5. Sélection d'une technique de refroidissement permettant de satisfaire les exigences environnementales.....	28
1.5.1 Comparaison générale entre les systèmes refroidis à l'air et à l'eau.....	28
1.5.2 Facteurs de conception et choix des matériaux	29
1.5.3 Options de modification technologique des systèmes existants.....	30
1.6. Considérations économiques	35
2. ASPECTS TECHNOLOGIQUES DES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT UTILISÉS	36
2.1. Introduction.....	36
2.2. Échangeurs de chaleur	38
2.2.1 Échangeurs de chaleur tube et calandre	38
2.2.2 Échangeurs de chaleur à plaques et joints.....	38
2.2.3 Problèmes environnementaux liés aux échangeurs de chaleur.....	38
2.3. Systèmes de refroidissement à passage unique.....	39
2.3.1 Systèmes de refroidissement directs à passage unique	39
2.3.2 Systèmes de refroidissement à passage unique avec tour de refroidissement.....	40
2.3.3 Systèmes de refroidissement indirects à passage unique	41
2.4. Tours aéroréfrigérantes ouvertes.....	42
2.4.1 Tours de refroidissement par voie humide à tirage naturel	43
2.4.2 Tours de refroidissement par voie humide à tirage mécanique.....	45
2.5. Systèmes de refroidissement en circuit fermé.....	48
2.5.1 Systèmes de refroidissement à l'air.....	48
2.5.2 Systèmes de refroidissement par voie humide en circuit fermé.....	53
2.6. Systèmes de refroidissement par voie humide/sèche combinés.....	54
2.6.1 Tours de refroidissement ouvertes par voie humide/sèche (hybrides)	54
2.6.2 Systèmes de refroidissement hybrides en circuit fermé	56
2.7. Systèmes aéroréfrigérants	58
2.7.1 Systèmes aéroréfrigérants directs.....	59
2.7.2 Systèmes aéroréfrigérants indirects.....	59
2.8. Coûts des systèmes de refroidissement.....	59
3. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT INDUSTRIELS ET DES TECHNIQUES DE PRÉVENTION ET DE RÉDUCTION UTILISÉES.....	62
3.1. Introduction.....	62
3.2. Consommation d'énergie.....	64
3.2.1 Consommation directe d'énergie	64
3.2.2 Consommation indirecte d'énergie	64
3.2.3 Réduction de l'énergie nécessaire au refroidissement	67
3.3. Consommation et émission de l'eau de refroidissement.....	68
3.3.1 Consommation d'eau	68
3.3.2 Entraînement des poissons.....	71
3.3.3 Émission de chaleur dans l'eau de surface.....	74

3.4.	Émissions provenant du traitement de l'eau de refroidissement.....	76
3.4.1	Application du traitement de l'eau de refroidissement	77
3.4.2	Émissions de substances chimiques dans l'eau de surface.....	80
3.4.3	Réduction des émissions dans l'eau de surface.....	82
3.4.4	Réduction par utilisation d'un traitement de l'eau de refroidissement complémentaire et alternatif.....	88
3.4.5	Réduction des émissions par l'évaluation et la sélection des additifs	89
3.4.6	Optimisation de l'utilisation des additifs à l'eau de refroidissement	91
3.5.	Systèmes de refroidissement par air et émissions dans l'air	96
3.5.1	Besoins en air.....	96
3.5.2	Émissions directes et indirectes	96
3.5.3	Panaches de tours de refroidissement	98
3.6.	Émissions sonores.....	98
3.6.1	Sources et niveaux d'émissions sonores	98
3.6.2	Réduction du bruit.....	101
3.7.	Risques associés aux systèmes de refroidissement industriels.....	104
3.7.1	Risque de fuite	104
3.7.2	Stockage et manipulation des produits chimiques	107
3.7.3	Risque microbiologique.....	107
3.8.	Déchets provenant du fonctionnement du système de refroidissement.....	111
3.8.1	Formation de boues.....	111
3.8.2	Résidus provenant du traitement de l'eau de refroidissement et des opérations de nettoyage.....	111
3.8.3	Résidus provenant du retrofit, du remplacement ou du déclassement de l'installation.....	111
4.	MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES POUR LES SYSTÈMES DE REFOUDDISSEMENT INDUSTRIELS	113
4.1.	Introduction.....	113
4.2.	Une approche horizontale permettant de définir la MTD pour les systèmes de refroidissement.....	114
4.2.1	Gestion intégrée de la chaleur	114
4.2.2	Application des MTD dans les systèmes de refroidissement industriels.....	118
4.3.	Réduction de la consommation d'énergie.....	119
4.3.1	Généralités	119
4.3.2	Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD.....	119
4.4.	Réduction des besoins en eau	120
4.4.1	Généralités	120
4.4.2	Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD.....	121
4.5.	Réduction de l'entraînement d'organismes.....	121
4.5.1	Généralités	121
4.5.2	Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD.....	122
4.6.	Réduction des émissions dans l'eau.....	122
4.6.1	Approche générale des MTD pour réduire les émissions thermiques.....	122
4.6.2	Approche générale des MTD visant à réduire les émissions chimiques dans l'eau	122
4.6.3	Techniques de réduction identifiées dans le cadre d'une approche MTD.....	124
4.7.	Réduction des émissions dans l'air	128
4.7.1	Approche générale	128
4.7.2	Techniques de réduction identifiées dans le cadre d'une approche MTD.....	128
4.8.	Réduction des émissions sonores.....	129
4.8.1	Généralités	129
4.8.2	Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD.....	129
4.9.	Réduction du risque de fuite	130
4.9.1	Approche générale	130
4.9.2	Techniques de réduction identifiées dans le cadre d'une approche MTD.....	130
4.10.	Réduction du risque biologique	131
4.10.1	Approche générale	131
4.10.2	Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD.....	131
5.	CONCLUSIONS.....	132
5.1.	Historique des travaux	132
5.2.	Sources d'information	132
5.3.	Recommandations en vue de travaux futurs	132

PREFACE

1. Statut du document

Sauf indication contraire, les références à «la Directive» faites dans le présent document renvoient à la Directive du Conseil 96/61/CE relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution (dite Directive IPPC). Le présent document fait partie d'une série de documents qui présentent les résultats d'un échange d'informations entre les États membres de l'UE et les industries concernées par les meilleures techniques disponibles (MTD), des prescriptions de contrôle y afférentes et de leur évolution. Il est publié par la Commission Européenne en application de l'article 16, paragraphe 2, de la Directive et doit donc être pris en considération, conformément à l'annexe IV de la Directive, lors de la détermination des « Meilleures Techniques Disponibles ».

2. Obligations légales prévues par la Directive IPPC et définition des MTD

Afin de clarifier le contexte juridique encadrant la rédaction du présent document, cette préface décrit quelques unes des principales dispositions de la Directive IPPC et définit notamment le terme « meilleures techniques disponibles ». Cette description ne peut évidemment pas être complète et est donnée à titre purement informatif. Elle n'a aucune valeur juridique et n'a pas pour effet de modifier les dispositions réelles de la Directive ou de leur porter atteinte.

La Directive a pour objet la prévention et la réduction intégrées des pollutions en provenance des activités énumérées dans son annexe I, afin de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble. La base juridique de cette Directive est liée à la protection de l'environnement. Lors de sa mise en œuvre, il conviendra de tenir également compte d'autres objectifs communautaires tels que la compétitivité de l'industrie communautaire, ce qui permettra de contribuer au développement durable.

Plus spécifiquement, la Directive prévoit un système d'autorisation pour certaines catégories d'installations industrielles, en vertu duquel les exploitants et régulateurs sont invités à adopter une approche globale intégrée en ce qui concerne les risques de pollution et le potentiel de consommation associés à l'installation. L'objectif de cette approche intégrée est d'améliorer la gestion et le contrôle des procédés industriels afin de parvenir à un niveau de protection élevé pour l'environnement dans son ensemble. Le principe général défini à l'article 3 constitue la pierre angulaire de cette approche. Il stipule que les exploitants doivent prendre toutes les mesures de prévention appropriées contre la pollution, notamment en mettant en œuvre les meilleures techniques disponibles afin d'améliorer les performances en matière d'environnement.

L'expression «meilleures techniques disponibles» est définie à l'article 2, paragraphe 11 de la Directive comme « le stade de développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble." L'article 2, paragraphe 11 précise ensuite cette définition comme suit :

les «techniques» désignent aussi bien les techniques employées que la manière dont l'installation est conçue, construite, entretenue, exploitée et mise à l'arrêt,

les techniques «disponibles» correspondent aux techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages, que ces techniques soient utilisées ou produites ou non sur le territoire de l'État Membre intéressé, pour autant que l'exploitant concerné puisse y avoir accès dans des conditions raisonnables,

les «meilleures» techniques renvoient aux techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

En outre, l'annexe IV de la Directive comporte une liste de «considérations à prendre en compte en général ou dans un cas particulier lors de la détermination des meilleures techniques disponibles ... compte tenu des coûts et des avantages pouvant résulter d'une action, et des principes de précaution et de prévention». Ces considérations comprennent les informations publiées par la Commission en vertu de l'article 16, paragraphe 2.

Les autorités compétentes chargées de délivrer des autorisations sont invitées à tenir compte des principes généraux définis à l'article 3 lorsqu'elles définissent les conditions de l'autorisation. Ces conditions doivent comporter des valeurs limites d'émission, qui peuvent être complétées ou remplacées, le cas échéant, par des paramètres équivalents ou des mesures techniques. Conformément à l'article 9, paragraphe 4 de la Directive, ces valeurs limites d'émission, paramètres équivalents et mesures techniques doivent, sans porter préjudice au respect des normes sur la qualité de l'environnement, reposer sur les meilleures techniques disponibles. Elles ne doivent pas prescrire l'utilisation d'une technique ou d'une technologie spécifique, mais tenir compte des caractéristiques techniques de l'installation considérée, de son implantation géographique et des conditions environnementales locales. Dans tous les cas, les conditions d'autorisation doivent prévoir des dispositions relatives à la minimisation de la pollution à longue distance ou transfrontalières et garantir un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble.

En vertu de l'article 11 de la Directive, les États Membres ont l'obligation de veiller à ce que les autorités compétentes se tiennent informées ou soient informées de l'évolution des meilleures techniques disponibles.

3. Objectif du présent document

L'article 16, paragraphe 2 de la Directive invite la Commission à organiser «un échange d'informations entre les États Membres et les industries intéressées au sujet des meilleures techniques disponibles, des prescriptions de contrôle y afférentes et de leur évolution», et à publier les résultats de ces échanges d'informations.

L'objet de l'échange d'informations est défini au considérant 25 de la Directive, qui prévoit que les «progrès et les échanges d'informations au niveau communautaire en ce qui concerne les meilleures techniques disponibles permettront de réduire les déséquilibres au plan technologique dans la Communauté, favoriseront la diffusion au plan mondial des valeurs limites et des techniques utilisées dans la Communauté et aideront les États Membres dans la mise en œuvre efficace de la présente Directive.»

La Commission (DG Environnement) a mis en place un forum d'échange d'informations (IEF) pour faciliter les travaux entrepris en application de l'article 16, paragraphe 2, et un certain nombre de groupes de travail techniques ont été créés sous les auspices de l'IEF. L'IEF comme les groupes de travail techniques sont composés de représentants des États Membres et de l'industrie, comme le prévoit l'article 16, paragraphe 2.

La présente série de documents a pour objet de refléter précisément l'échange d'informations qui a été établi conformément à l'article 16, paragraphe 2 et de fournir des informations de référence à l'instance chargée de la délivrance des autorisations pour qu'elle les prenne en compte lors de la définition des conditions d'autorisation. En rendant disponibles les informations pertinentes relatives aux meilleures techniques disponibles, ces documents doivent devenir des outils précieux pour l'amélioration des performances en matière d'environnement.

4. Sources d'information

Le présent document est le résumé des informations recueillies à partir d'un certain nombre de sources, y compris notamment l'expertise des groupes mis en place pour assister la Commission dans son travail, puis vérifiées par les services de la Commission. Il convient de remercier ici les auteurs de toutes ces contributions.

5. Compréhension et utilisation du présent document

Les informations contenues dans le présent document sont prévues pour servir de base à la détermination des meilleures techniques disponibles dans les cas spécifiques. Lors de la détermination de ces meilleures techniques et de la fixation des conditions d'autorisation, l'objectif global, qui est de parvenir à un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble, ne doit jamais être perdu de vue.

Les paragraphes ci-après décrivent le type d'informations présentées dans chacun des chapitres du document.

Le chapitre 1 donne des informations sur les procédés de refroidissement industriels ainsi que sur l'approche horizontale adoptée, afin de présenter la manière dont les MTD sont appliquées à ces systèmes.

Le chapitre 2 décrit les systèmes de refroidissement et les configurations généralement adoptées par l'industrie. Il donne également certaines caractéristiques de performance et passe en revue certaines problématiques liées à l'environnement.

Le chapitre 3 décrit de manière plus détaillée les aspects concernant l'environnement. Il examine notamment la réduction des émissions et les techniques les mieux adaptées pour définir les MTD générales et celles servant de base à la détermination des conditions d'autorisation. Ces informations indiquent, dans la mesure du possible, les niveaux de consommation et d'émission pouvant être atteints avec les systèmes de refroidissement considérés. Les techniques généralement considérées comme dépassées ne sont pas incluses.

Le chapitre 4 présente les MTD générales considérées dans le cadre de l'approche MTD de base, et constate que les MTD applicables aux systèmes de refroidissement sont spécifiques à chaque site.

Le chapitre 5 formule des conclusions générales sur le processus d'échange d'informations dans le domaine des systèmes de refroidissement et fait des recommandations en vue de travaux futurs.

Une série de douze annexes contiennent des informations supplémentaires sur la thermodynamique, l'énergie, les facteurs d'exploitation, ainsi que sur les techniques et les pratiques devant être prises en compte lors de l'application des MTD aux systèmes de refroidissement industriels.

Le but est ainsi d'apporter des indications générales sur les niveaux d'émission et de consommation qu'il est possible de considérer comme des valeurs de référence appropriées pour servir de base à la détermination de conditions d'autorisation reposant sur les meilleures techniques disponibles ou à l'établissement des prescriptions contraignantes générales mentionnées à l'article 9, paragraphe 8. Il faut cependant souligner que ce document ne propose pas de valeurs limites d'émissions. La détermination des conditions d'autorisation appropriées supposera la prise en compte de facteurs locaux inhérents au site, tels que les caractéristiques techniques de l'installation concernée, son implantation géographique et les conditions environnementales locales. Dans le cas d'installations existantes, il faut en outre tenir compte de la viabilité économique et technique de leur amélioration. Le seul objectif consistant à assurer un niveau élevé de protection de l'environnement dans son ensemble impliquera déjà souvent de faire des compromis entre différents types d'incidences sur l'environnement, et ces compromis seront souvent influencés par des considérations locales.

Bien que ce document cherche à aborder certains des problèmes évoqués, il ne peut les traiter tous de manière exhaustive. Les techniques et niveaux présentés dans les chapitres 3 et 4 ne seront donc pas forcément appropriés pour toutes les installations. Par ailleurs, l'obligation de garantir un niveau élevé de protection de l'environnement, y compris la réduction de la pollution à longue distance ou transfrontalière, suppose que les conditions d'autorisation ne pourront pas être définies sur la base de considérations purement locales. C'est pourquoi il est de la plus haute importance que les autorités chargées de délivrer les autorisations tiennent compte de toutes les informations présentées dans le présent document.

Étant donné que les meilleures techniques disponibles sont modifiées au fil du temps, le présent document sera révisé et mis à jour, le cas échéant. Toutes les observations et propositions éventuelles peuvent être envoyées au Bureau européen IPPC de l'Institut d'Etudes Prospectives Technologiques, à l'adresse suivante:

World Trade Center, Ma de la Cartuja s/n, E-41092 Séville – Espagne
Téléphone: +34 95 4488 284
Télécopieur: +34 95 4488 426
e-mail eippcb@jrc.es
Internet: <http://eippcb.jrc.es>

PORTEE

Le présent document de référence sur les MTD applicables aux systèmes de refroidissement industriels est un document transversal axé sur les systèmes de refroidissement généralement utilisés dans le cadre des activités citées à l'annexe I de la Directive IPPC. Les principaux secteurs industriels concernés sont les suivants : produits chimiques, produits alimentaires, verre, aciéries, raffineries, industries papetières, incinérateurs. Le secteur de la production d'électricité a accumulé de très grandes quantités d'informations sur le refroidissement et l'expérience acquise dans ce domaine est également très importante. Mais c'est également dans ce secteur que les incidences directes et indirectes sur l'environnement sont comparativement les plus fortes lorsque le refroidissement n'est pas optimal. Ce secteur fait l'objet d'une annexe séparée qui examine également les disparités entre les centrales électriques et d'autres activités industrielles. Bien que les centrales nucléaires ne fassent pas partie du champ d'application de l'annexe I de la Directive IPPC, les techniques antipollution qui y sont appliquées sont prises en considération dans le présent document lorsqu'elles concernent les systèmes de refroidissement installés dans la partie conventionnelle de ces centrales. Les systèmes de refroidissement des petites installations de combustion et les systèmes de conditionnement d'air à usage industriel et privé ne sont pas pris en compte.

Le terme "système de refroidissement" utilisé dans le présent document de référence se limite aux systèmes destinés à extraire de la chaleur d'un fluide en utilisant un échangeur de chaleur à eau et/ou à air pour abaisser la température du fluide à celle de la température ambiante. Ce terme comprend uniquement des parties des systèmes de réfrigération et exclut la problématique des fluides frigorigènes tels que l'ammoniac et les CFC. Le refroidissement par contact direct et les condenseurs barométriques ne sont pas évalués car on estime qu'ils sont trop spécifiquement liés à un procédé. Le présent document couvre les systèmes ou les configurations de refroidissement industriel suivants :

- Systèmes à une passe (avec ou sans tour de refroidissement)
- Systèmes ouverts (tours de refroidissement humide)
- Systèmes de refroidissement en circuit fermé
 - Systèmes par refroidissement atmosphérique
 - Systèmes par refroidissement humide en circuit fermé
- Systèmes de refroidissement humide/sec (hybrides)
 - tours de refroidissement humide/sec en circuit ouvert
 - tours de refroidissement hybrides en circuit fermé

Le présent document décrit les MTD applicables aux systèmes de refroidissement considérés comme des équipements auxiliaires aidant au déroulement normal d'un procédé industriel. Il est entendu que le fonctionnement fiable d'un système de refroidissement a un effet positif sur la fiabilité du procédé industriel. Le rôle d'un système de refroidissement dans la sécurité du procédé ne fait cependant pas l'objet du présent document.

Dans le cadre de l'approche horizontale, l'intégration signifie que tous les aspects importants concernant l'environnement et la manière dont ils sont liés les uns aux autres ont été examinés, mais que le bilan de chacun de ces aspects doit être laissé aux experts. Le cas échéant, l'importance des performances environnementales d'un système de refroidissement dans le cadre du procédé industriel global est indiquée.

Le document traite les aspects environnementaux et les méthodes et techniques de réduction des émissions suivantes :

- effets du procédé et de la conception des équipements, du matériel et de la maintenance;
- consommation de ressources (eau, air, énergie, substances chimiques);
- émissions de substances chimiques et de chaleur dans l'eau et l'air;
- émission de bruit et de panaches;
- production de déchets, émissions dans le sol et les habitats terrestres;
- aspects concernant les risques;
- pollution due à des événements particuliers (départs/arrêts) ou à des incidents;
- déclassement des installations.

Ce document présente les techniques applicables aux systèmes de refroidissement industriels, mais il n'indique pas quel est le meilleur système et son but n'est pas de disqualifier des systèmes déjà appliqués. Il ne donne pas non plus d'avis sur le fait de savoir si un procédé nécessite un système de refroidissement ou non. Le document ne traite donc pas des procédés de production nécessitant un refroidissement et requérant l'adoption de mesures globales en matière d'efficacité énergétique. Une « approche générale » est proposée, afin de choisir entre un nouveau système ou des mesures permettant d'optimiser un système de refroidissement existant permettant de prévenir les émissions liées au fonctionnement de ces systèmes.

GLOSSAIRE

La terminologie utilisée pour les différentes parties d'un système de refroidissement industriel varie énormément et plusieurs termes sont souvent utilisés pour le même élément. Afin d'éviter toute confusion et les répétitions explicatives, cette section donne la définition des termes et abréviations utilisés.

DÉFINITIONS DE LA THERMODYNAMIQUE

Approche	<p>(1) Dans un système d'échange de chaleur par conduction, l'écart de température entre la température du fluide de procédé quittant l'échangeur de chaleur et la température du fluide de refroidissement entrant dans l'échangeur de chaleur.</p> <p>(2) Dans un système à évaporation (ex. tour de refroidissement par voie humide), l'écart entre la température du fluide de procédé quittant la tour de refroidissement et la température de bulbe humide de l'air entrant dans la tour de refroidissement ou dans le système de refroidissement par évaporation.</p> <p>(3) Dans un condenseur voir différence terminale.</p>
Température de bulbe sec (ou température sèche)	valeur de la température lue sur un thermomètre dont le bulbe est à l'air libre. Cette température est utilisée pour le dimensionnement d'installations fonctionnant avec de l'air sec. <i>La température de bulbe sec</i> est la température appropriée pour le calcul du transfert de chaleur sensible.
Température de bulbe humide (ou température humide)	Température la plus basse à laquelle l'air peut être refroidi par évaporation adiabatique. C'est la température appropriée pour le <i>transfert de chaleur latent</i> . <i>Température de calcul de bulbe humide</i> est la température de l'air saturé qui peut être utilisée pour le calcul de l'échangeur thermique de récupération par évaporation. La température de bulbe humide est toujours <i>inférieure</i> à la température de bulbe sec.
Puissance de refroidissement	Puissance thermique qui peut être évacuée par un système de refroidissement, mesurée en kW_{th} (ou en MW_{th}).
Transfert de chaleur latente	Transfert de chaleur par évaporation de l'eau dans l'air. La puissance échangée par évaporation de l'eau est nettement plus importante que la puissance échangée par les transferts conductifs ou convectifs dans l'air.
Niveau de chaleur résiduelle	Niveau de température auquel la chaleur doit être transférée. Selon le procédé, la chaleur résiduelle est générée à un niveau de température spécifique.
DTLM	Différence de Température Logarithmique Moyenne est une mesure de l'échange thermique dépendante de la température du flux froid (du fluide de refroidissement) et du flux de procédé à refroidir.
Amplitude	différence entre la température d'entrée et la température de sortie au niveau d'un échangeur thermique.
Transfert de chaleur sensible	Transfert thermique par conduction et convection
Différence terminale	Différence de température dans un condenseur. Elle correspond à l'écart de température entre la température de la vapeur entrant dans le condenseur (ou de la vapeur condensée quittant le condenseur) et la température du fluide de refroidissement (eau) quittant le condenseur. Les valeurs varient de 3 à 5 K.

Chaleur résiduelle *La Chaleur résiduelle* est la chaleur inhérente non récupérable qui doit être extraite des procédé industriels et qui est rejetée dans l'environnement.

AUTRES DÉFINITIONS

Approche MTD Méthodologie présentée dans ce document permettant de définir une MTD pour les systèmes de refroidissement industriel et pour identifier les techniques associées à cette définition

Facteur de bioconcentration Capacité d'une substance à la bioaccumulation définie comme le ratio entre la concentration d'une substance dans un organisme et sa concentration dans l'eau (dans un état d'équilibre). La bioconcentration est toujours déterminée par expérimentation.

Purge de déconcentration (PD, kg/s) Purge intentionnelle d'un système de refroidissement pour équilibrer la concentration croissante des solides dans le système de refroidissement. En pratique, il s'agit d'eau qui doit être extraite d'un système de refroidissement par évaporation afin de contrôler le cycle de concentration. Se calcule comme suit : $PD = E \cdot 1 / (x - 1)$, où E désigne la perte par évaporation et x est le facteur de concentration. Le calcul de la purge de déconcentration inclut généralement les pertes autres que par évaporation telles que les fuites et l'entraînement vésiculaire.

Biocide Substance chimique qui tue ou ralentit la croissance des organismes indésirables. Dans les systèmes de refroidissement à eau, un biocide tue ou ralentit la croissance des micro et macro-organismes encrassants, réduisant ainsi la pollution d'origine organique. Les biocides les plus importants sont : le chlore, l'hypochlorite de sodium, l'ozone, l'ammonium quaternaire et le bromure organique.

Demande en biocide Quantité de biocide réduite ou convertie en formes inertes ou peu actives par des substances dans l'eau, ou quantité de biocide qui donne une réaction complète avec tous les matériaux réactifs au biocide.

Demande Biochimique en Oxygène (DBO) (également appelée Demande Biologique en Oxygène) Mesure de l'oxygène nécessaire pour la décomposition des matières organiques dans l'eau. Des charges organiques plus élevées nécessitent de plus grandes quantités d'oxygène et peuvent réduire la quantité d'oxygène disponible pour les poissons et la vie aquatique au-dessous des niveaux acceptables. Il peut être mesuré en utilisant un test normé de 5 jour (DBO_5) ou de 7 jours (DBO_7).

Biofilm Film bactérien qui se développe sur tout substrat immergé dans l'eau. Composé d'algues et d'une population microbienne sessile, incluant les bactéries produisant le biofilm et les bactéries réductrices de sulfate. Le micro-encrassement favorise la déposition de macro-encrassement.

Point de rupture (ou Break Point) Dose de biocide nécessaire pour la réduction des impuretés dans l'eau, avant qu'une concentration viable en biocide dans l'eau de refroidissement ne soit disponible.

Demande Chimique en Oxygène (DCO) Mesure de la capacité de consommation en oxygène des matières organiques et inorganiques présentes dans l'eau ou dans les eaux résiduelles (purges) ; la quantité d'oxygène consommé provenant d'un oxydant chimique dans une analyse spécifique (se référant normalement à une analyse avec oxydation au dichromate)

Revêtements Matières appliquées sur les surfaces pour former une surface à faible friction pour réduire les pertes de charge, ou une couche protectrice pour réduire l'érosion, la corrosion et l'encrassement.

Facteur de Concentration (FC) Le Facteur de concentration ou le cycle de concentration est le ratio entre la concentration de tout soluté particulier dans le circuit d'eau de refroidissement, et celle dans l'eau de remplissage. Se calcule comme suit : $FC = EA / PD$ où EA est l'eau d'appoint et PD la purge de déconcentration.

Condenseur	Refroidisseur utilisé pour la condensation d'un flux de gaz (ou de vapeur). La condensation apporte des contraintes supplémentaires sur l'échangeur thermique : il doit y avoir un espace suffisant pour le volume de vapeur. C'est la raison pour laquelle les condenseurs des centrales électriques sont extrêmement larges et conçus dans cette optique.
Fluide de refroidissement	Dans la plupart des cas, le fluide de refroidissement est de l'eau ou de l'air, mais il peut s'agir d'eau mélangée avec un antigel, ou un fluide tel que de l'huile ou du gaz.
Corrosion	Destruction d'un métal par réaction (électro-) chimique avec son environnement.
Inhibiteurs de corrosion	Substances chimiques qui peuvent ralentir le procédé de corrosion dans l'eau. Il s'agit de substances permettant le dégazage, d'inhibiteurs passifs (ex. chromate, nitrite, molybdate et orthophosphate), d'inhibiteurs précipitant (phosphate de zinc, carbonate de calcium et orthophosphate de calcium) et d'inhibiteurs d'adsorption (dérivés de glycine, sulfonates aliphatiques et silicate de sodium).
Contre-courant	Principe selon lequel l'air circule dans la direction opposée dans l'échangeur de chaleur. Dans la tour à contre-courant, l'air circule vers le haut dans le sens opposé du flux descendant de l'eau de refroidissement. Cette conception permet un bon échange thermique car l'air le plus frais entre en contact avec l'eau la plus froide. Les têtes et les buses servent à la distribution de l'eau.
Flux croisé	Principe selon lequel l'air circule perpendiculairement au fluide du procédé dans l'échangeur thermique. Dans les tours à flux croisé, l'air circule horizontalement à travers le flux descendant de l'eau de refroidissement.
Cycles de concentration	Egalement appelés « cycles ». Désigne le rapport entre la quantité de sels dissous dans l'eau de circulation et dans l'eau d'appoint.
Substances de dispersion	Également appelés dispersants, ce sont les substances chimiques qui empêchent la croissance et le dépôt de particules présentes dans l'eau en augmentant la charge électrique provenant de l'absorption. Par conséquent, les particules se repoussent réciproquement et restent en suspension.
Eliminateurs de gouttes (ou séparateur)	Dispositifs qui, en changeant la direction du flux d'air, utilisent la force centrifuge pour séparer les gouttelettes d'eau provenant de l'air.
Perte par entraînement (ou dérive)	Perte en eau liée aux gouttelettes qui sont émises dans l'air de tirage en quittant la partie supérieure d'une tour de refroidissement.
Perte par évaporation (E, kg/s)	Masse d'eau de refroidissement qui s'évapore par unité de temps au cours du fonctionnement d'un système de refroidissement par évaporation.
Oxydant Libres (OL) / Oxydants Résiduels Totaux (ORT)	Mesure des oxydants libres au cours de la purge de l'eau de refroidissement.
Chlore Libre Résiduel (CLR)	Représente la fraction du chlore qui n'a pas été consommé par les matières organiques. Le Chlore Libre Résiduel représente un mélange équilibré d'acide hypochloreux et d'ions hypochloreux OCl^- dans le système de refroidissement de l'eau. Ce sont deux oxydants, mais l' OCl^- est bien moins efficace que le HOCl .
Stabilisateurs de dureté	Substances chimiques qui, ajoutées à l'eau, peuvent prévenir le dépôt de sels de dureté en entravant le procédé de cristallisation, grâce à l'absorption des noyaux de nucléation des cristaux. De cette façon la croissance des cristaux amorphes, relativement faciles à garder en suspension et entraînant moins de dépôts, est favorisée.
Substances dangereuses	Substances ou groupes de substances qui ont une ou plusieurs propriétés

	dangereuses (toxiques, persistantes ou bioaccumulatives) ou qui sont classées comme dangereuses pour l'homme et pour l'environnement selon la Directive 67/548 (Directive sur les substances dangereuses).
Macro-encrassement	Organismes indésirables dans les circuits d'eau de refroidissement qui sont visibles à l'œil nu. Le macro-encrassement est représenté essentiellement par les moules, les bernacles et les polychètes serpulidés qui s'incrustent sur les parois des circuits avec leurs parois calcaires, les organismes filamenteux tels que les hydroïdes et d'autres organismes tels que les éponges, les bryozoaires et les tunicates.
Appoint (M, kg/s)	Masse d'eau ajoutée au système par unité de temps pour compenser la perte en eau liée à l'évaporation et à la purge de déconcentration.
Niveau de risque maximum autorisé	Concentration d'une substance à la surface de l'eau où 95 % des espèces sont protégées. La toxicité et la dégradabilité sont des aspects importants.
Tour à tirage mécanique	Tours de refroidissement équipées de ventilateurs pour pulser l'air de refroidissement dans la tour (tirage forcé) ou aspirer l'air refroidi dans la tour (tirage induit).
Micro-encrassement	Ou biofilm. Film bactérien qui se développe sur tout substrat immergé dans l'eau. Composé d'algues et d'une population microbienne sessile, incluant les bactéries produisant le biofilm et les bactéries réductrices de sulfate. Le micro-encrassement favorise la déposition de macro-encrassement.
Tour à tirage naturel	Tours de refroidissement de grande taille sans ventilateurs, mais conçues pour exploiter l'écart de densité entre l'air entrant dans la tour et l'air plus chaud à l'intérieur de la tour, créant un flux d'air refroidi.
Biocides non oxydants	Essentiellement des substances organiques utilisées pour le traitement de l'eau de refroidissement particulièrement dans des systèmes aëroréfrigérants. Leur action est plus spécifique que les biocides oxydants qui oxydent certaines espèces plus efficacement que les autres. Elles exercent leurs effets sur les micro-organismes par réaction avec des composants ou des chemins de réaction spécifiques dans la cellule.
Biocides oxydants	Pour la plupart des substances non organiques notamment utilisées dans les systèmes ouverts monopasse contre l'encrassement. Ils attaquent les organismes via un mécanisme non spécifique. Le biocide oxyde la paroi de la cellule, pénètre et oxyde les composants de la cellule. Ces biocides agissent vite et, du fait de leur non spécificité, ont un spectre plus large que les biocides non oxydants.
Panache	Recondensation visible de la vapeur d'eau rejetée dans l'air au sommet d'une tour de refroidissement.
Adoucissement par précipitation	Procédé utilisé pour réduire la dureté de l'eau, l'alcalinité, le silice et d'autres constituants. L'eau est traitée avec de la chaux ou une combinaison de chaux et de carbonate de sodium (ions carbonate). L'eau ayant une dureté modérée (150-500 ppm de CaCO ₃) est souvent traitée de cette façon.
Fluide de procédé	Le <i>Fluide de procédé</i> se réfère toujours au fluide à refroidir.
Entartrage	Procédé de précipitation dans le système de refroidissement d'eau qui se produit lorsque la concentration en sels dans le film d'eau à proximité de l'échangeur de chaleur dépasse la solubilité.
Niveau de pression sonore (L_p)	Mesure des <u>émissions</u> sonores – la quantité de son dans une direction et à une distance définies de la source sonore. Il est mesuré en dB par bande de fréquence ou pondéré en dB(A). Cette mesure est logarithmique : si l'on double le niveau de pression sonore, cela revient à l'augmenter de 6 dB(A).
Niveau de puissance sonore (L_w)	Mesure de la quantité d'énergie sonore qui <u>rayonne</u> (émise) d'une source sonore. Il est mesuré en dB par bande de fréquence ou pondéré en dB(A).

	<p>Cette mesure est logarithmique, cela signifie que doubler le niveau de puissance sonore revient à augmenter de 3 dB(A).</p>
Demi-vie hydraulique	<p>Se définit comme le temps nécessaire à la réduction de la concentration initiale d'un composé non dégradable à 50 % de sa concentration initiale.</p>
Chlore Résiduel Disponible (CRD)/ Chlore Résiduel Total (CRT)	<p>Somme du chlore libre et du chlore combiné (chlore disponible dans les chloramines ou les autres composés ayant un lien N-C dans un système de refroidissement de l'eau).</p>
Oxydants résiduels totaux (ORT)	<p>Capacité d'oxydation mesurée dans le système de refroidissement de l'eau via la méthode stœchiométrique (iode.iode). L'ORT est numériquement et techniquement équivalent au CRT et CDR.</p>
Variateur de vitesse	<p>Système de contrôle de la vitesse d'un moteur, en principe électroniquement en utilisant un convertisseur. La vitesse peut être modifiée manuellement, mais elle est plus souvent contrôlée via un signal provenant du procédé (ex. pression, flux, niveau, etc).</p>

ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

Abréviations/acronymes	Explications	Numéro de page
ACC	Condenseur à air	304
AOX	Composés Organohalogénés Adsorbables (X = Cl, Br)	98
ATP	Adénosine triphosphate	103
MTD	Meilleures techniques disponibles	1
BCDMH	Bromochlorodiméthylhydantoïne	212
FBC	Facteur de bioconcentration	245
BNPD	bromonitropropanediol	130
BNS	β -brom- β -nitrostyrène	98
DBO	Demande biochimique en oxygène (également appelée Demande biologique en oxygène)	23
MMT	Meilleur moyen technique	108
BREF	Document de référence sur les MTD	5
MTD	Meilleure technologie disponible	108
CCA	Sulfate de cuivre, dichromate de potassium, pentaoxyde d'arsenic	132
UFC	Unités formant des colonies	154
DCO	Demande chimique en oxygène	23
CWS	Système de refroidissement humide	26
DBNPA	DiBromoNitriloPropionAmide	95
DPD	N-N-diéthyl-p-phénylènediamine	103
EDF	Électricité de France	36
BEPRIP	Bureau Européen pour la Prévention et Réduction Intégrées de la Pollution	3
EOX	Halogènes organiques extractibles (X = Cl, Br)	278
NQE	Norme de qualité environnementale	10
EUR ou €	Devise Européenne	48
FAC	Chlore libre résiduel	24
OL	Oxydant libre	11
OLR	Oxydant libre résiduel	15
FEI	Forum d'échange d'informations	2
€ ou EUR	Devise européenne	10
kW _{th} ou kW _e	1000 Watts (thermique ou électrique)	9
LD	Légionellose	128
<i>Lp</i>	<i>Legionella pneumophila</i>	128
mg/l	Milligramme par litre	15
MBT	Méthylène(bis)thiocyanate	98
CIM	Corrosion influencée par les Micro-organismes	205
Mt ou Mt	Tonne métrique	188
MW _{th} ou MW _e	1 000 000 Watts (thermique ou électrique)	8
HMT	Hauteur Manométrique Totale	82
<i>Nf</i>	<i>Naegleria fowleri</i>	128
CSEO	Concentration sans effet observé	82
PEC	Concentration prévisible dans l'environnement	15
PHMB	chlorure de polyéxaméthylène biguanide (QAC)	130
PNEC	Concentration prévisible sans effet	15
P _{ow}	Coefficient de partition des phases n-octanol et eau	108
Ppm	Parties par million	26
RIZA	Institut néerlandais de gestion des eaux intérieures et d'épuration des eaux usées	155
QAC	Composés quaternaires d'ammonium	130
QSAR	Étude Quantitative des relations structure-activité	245
TBTO	Tributyltinoxyde	105

SDT	Solides dissous totaux	263
TEMA	Tubular Exchange Manufacturers Association (association des fabricants d'échangeur tubulaire)	194
THM	Trihalométhanes	211
COT	Carbone organique total	221
ORT	Oxydant résiduel total	24
GTT	Groupe de travail technique	17
UV	Ultra violet (lumière)	95
VCI	Valeur de Constat d'Impact	14
VDI	Association des ingénieurs allemands (Verein Deutscher Ingenieure)	118
VFD	Fréquence de commande variable	290
DCE	Directive-Cadre sur l'eau (à adopter)	144

1. CONCEPT GÉNÉRAL DE MTD POUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT INDUSTRIELS

Dans de nombreux procédés industriels, de la chaleur doit être évacuée par ce que l'on appelle un système de transfert de la chaleur résiduelle ou un système de refroidissement. Le fonctionnement de ces systèmes de refroidissement a des conséquences sur l'environnement. Le niveau et le caractère de l'impact environnemental dépendent du principe de refroidissement choisi et du mode de fonctionnement de ces systèmes. Pour réduire cet impact, une « approche » visant à prévenir les émissions par une conception intelligente et une sélection de techniques peut être suivie.

Dans le cadre de l'IPPC, le refroidissement devrait être considéré comme une partie intégrante de la gestion énergétique d'un procédé industriel. L'objectif devrait être de réutiliser la chaleur superflue d'un procédé dans d'autres étapes du même procédé, ou dans des procédés différents sur le site afin de réduire le besoin de rejet de chaleur dans l'environnement. Cela affectera l'efficacité énergétique globale du procédé, et réduira la demande de refroidissement pour la puissance requise par le système et pour ses besoins opérationnels. L'optimisation de l'efficacité énergétique, toutefois, est un exercice complexe, spécifique à chaque procédé, et qui va bien au-delà du périmètre de ce document transversal. S'il n'y a pas de possibilités de réutilisation sur site, le rejet de la chaleur dans l'environnement ne doit pas être systématique, la valorisation hors du site dans des applications industrielles ou collectives pouvant être envisagée. Enfin, si les options de réutilisation de la chaleur ne peuvent plus être exploitées, le rejet de la chaleur résiduelle dans l'environnement doit être envisagé.

Une fois que le niveau de chaleur à extraire a été évalué, une première sélection du système de refroidissement approprié peut être faite. Une grande partie de la performance environnementale relative au fonctionnement d'un système de refroidissement peut être influencée par une conception adaptée et par le choix de matériaux en tenant compte des besoins du procédé et des caractéristiques locales. Il apparaît que 80 % de la performance du système de refroidissement est déjà déterminée lors de sa conception, et que les 20 % restant dépendent de l'exploitation du système (règle des 80/20). Plusieurs facteurs différents doivent être considérés afin de déterminer les MTD (meilleures techniques disponibles) permettant de réduire l'impact du refroidissement sur l'environnement. Dès le départ, il est important de réaliser qu'un système de refroidissement est un système auxiliaire, mais généralement crucial et intégré à un procédé industriel, et que tout changement dans le procédé de refroidissement peut potentiellement affecter la performance du procédé industriel ou manufacturier à refroidir.

Par conséquent, l'évaluation intégrée de la consommation et des émissions des systèmes de refroidissement et la décision d'utiliser une technique de refroidissement devraient tenir compte de la performance environnementale globale de l'installation, se conformer aux besoins du procédé à refroidir, et en fin de compte équilibrer les coûts. Le niveau requis de refroidissement doit être garanti avec des conséquences minimales pour l'environnement. Le niveau requis de refroidissement est propre à chaque procédé. Alors que certains procédés peuvent tolérer une hausse temporaire des températures des fluides, d'autres, plus sensibles aux températures, ne le peuvent pas car cela aurait un impact plus important sur la performance environnementale de l'ensemble de l'installation.

Selon l'IPPC, la performance environnementale des systèmes de refroidissement abordés dans ce BREF doit être améliorée en utilisant les MTD. La question qui se pose est de savoir si une MTD pour les systèmes de refroidissement peut être déterminée dans un cadre général, et comment la définir, sachant que la détermination finale de la meilleure solution est certainement une réponse aux besoins spécifiques locaux du procédé, de l'environnement et de la situation économique. Afin de structurer et d'une certaine façon simplifier le processus complexe de détermination des MTD, ce document suit « l'approche » décrite ci-dessous et présentée dans la Figure 1.1. Cette « approche » devrait conduire à une décision équilibrée sur l'utilisation d'un système de refroidissement et sur son optimisation sur la base des MTD, à la fois pour les nouvelles installations et les installations existantes.

Le concept de MTD s'articule autour des étapes suivantes, visant à réduire les émissions et minimiser l'impact sur l'environnement :

- réduire la quantité de chaleur résiduelle produite, en considérant les options de valorisation ;
- définir les besoins du procédé ;
- prendre en considération les caractéristiques générales du site ;
- évaluer les contraintes environnementales :
 - options pour la réduction de la consommation des ressources

- options pour la réduction des émissions
- développer un mode de conduite du système (maintenance, surveillance et prévention des risques)
- respecter les contraintes économiques

Dans la Figure 1.1, « l'approche » MTD est présentée de façon schématique en montrant les facteurs les plus importants impliqués dans le choix d'une MTD pour les systèmes de refroidissement industriels. Par souci de clarté, tous les liens qui peuvent être établis entre les différents aspects du refroidissement n'ont pas été ajoutés à ce schéma. Par exemple, il existe un lien entre les mesures visant à atténuer le bruit et la réduction de la consommation énergétique directe spécifique ; de plus, la température de sortie minimale qu'un système de refroidissement peut atteindre est limitée par les conditions climatiques locales.

Dans les sections suivantes, « l'approche » MTD sera abordée en détail à la lumière des principes communs de fonctionnement des systèmes de refroidissement industriels et, dans la mesure du possible, en indiquant ce que signifie l'application de la MTD dans l'esprit de la Directive IPPC. Par sa nature, cette optimisation ne peut pas être une comparaison mathématique exacte de différentes solutions. Le processus d'optimisation inclut un défi similaire pour tous les bilans environnementaux, car il implique de comparer les différents impacts sur l'environnement et de définir ceux qui sont les moins sévères ou les plus acceptables. Néanmoins, « l'approche » MTD suggérée vise à fournir des informations significatives sur les implications des différentes solutions pour l'environnement, sur les coûts et les risques, comme sur les facteurs influents. Sur la base de ces informations, une décision peut être prise, bien mieux justifiée qu'en se limitant à l'optimisation d'un seul facteur (par exemple la prise d'eau, la consommation d'énergie, l'émission de panaches ou les émissions sonores, etc.).

Des exemples seront donnés pour indiquer dans quelle direction évoluent les changements, plutôt que d'indiquer des émissions ou des réductions en particulier. Dans la mesure du possible, les données sont présentées ou feront référence aux annexes, mais pour la plupart des facteurs impliqués, les données concernant l'utilisation des ressources et les émissions des systèmes de refroidissement sont soit limitées, soit trop spécifiques pour être applicables de façon générale.

En résumé, l'évaluation d'un système de refroidissement, par compromis des différents facteurs, repose sur les points suivants :

- les besoins en refroidissement du procédé sont prioritaires sur les mesures visant à réduire l'impact sur l'environnement d'un système de refroidissement ;
- l'utilisation de « l'approche » MTD ne vise pas à disqualifier les configurations décrites dans le Chapitre 2 ;
- « l'approche » MTD donne plus de liberté à l'optimisation et à la prévention des émissions dans la phase de conception en cas de nouvelles installations, mais pour les installations existantes, les options de conception devraient également être considérées ;
- par conséquent, pour les installations existantes, il est souhaitable que l'approche MTD ait lieu ultérieurement au cours d'étapes d'évaluation ;
- une autre distinction peut être faite entre les systèmes de refroidissement de grande taille élaborés sur-mesure et les systèmes plus petits (produits en série), et leur impact sur l'environnement ;
- l'optimisation devrait être envisagée comme l'utilisation des options de conception, des techniques de réduction et d'une bonne pratique de fonctionnement ;
- le niveau de réduction des émissions lié à « l'approche » MTD n'est pas prévisible, mais dépend des exigences attendues du système de refroidissement ;
- « l'approche » MTD vise à l'utilisation équilibrée du système de refroidissement entre les besoins du procédé à refroidir et les objectifs environnementaux locaux ;
- les schémas de sélection sont très utiles pour faire un choix équilibré
- chaque résultat équilibré aura un certain impact sur l'environnement.

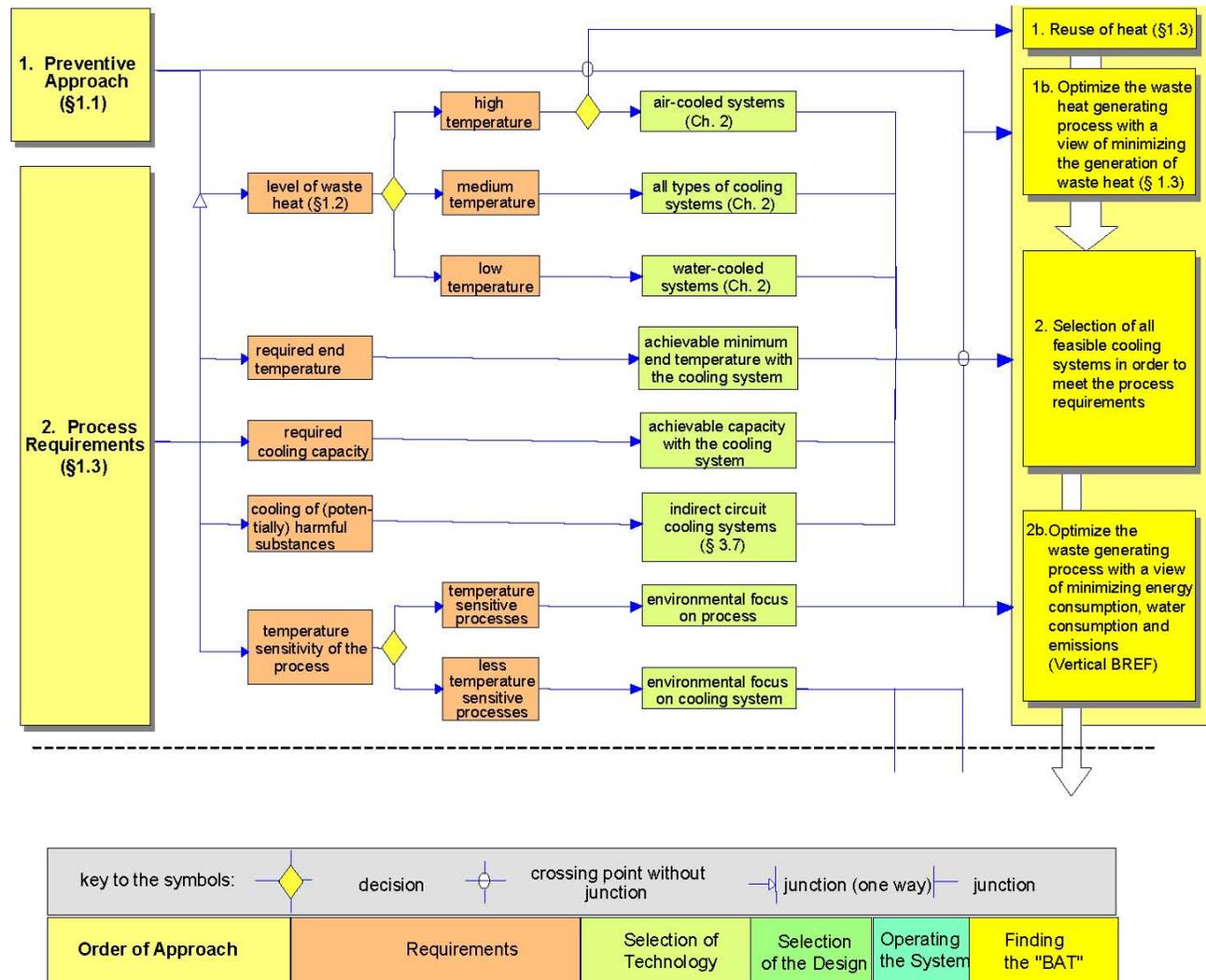


Figure 1.1 : Structure de répartition montrant les facteurs impliqués dans la détermination des MTD pour les systèmes de rejet de chaleur résiduelle [tm134, Eurovent, 1998]

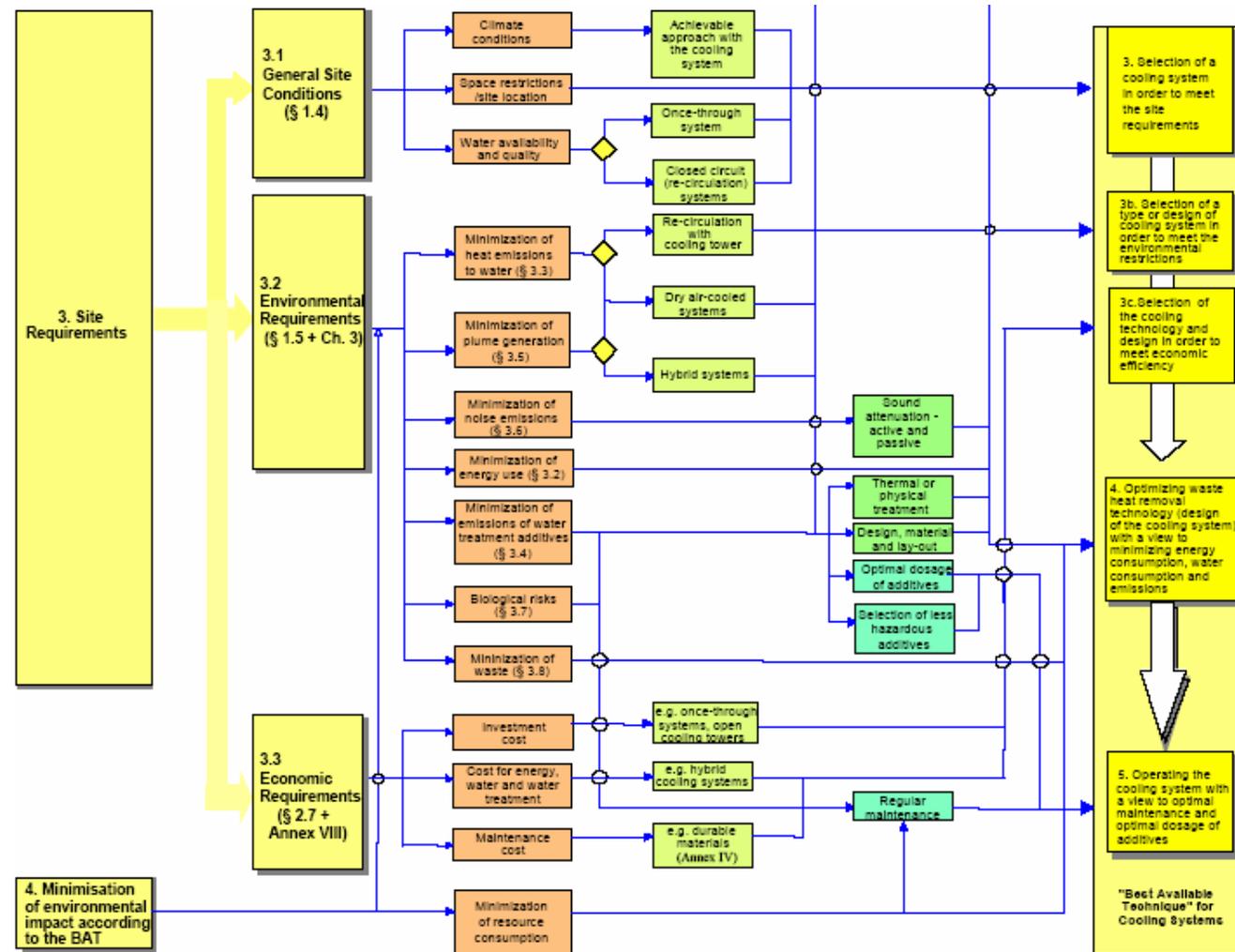


Figure 1.1 : (suite) : Structure de répartition montrant les facteurs impliqués dans la détermination de la MTD pour les systèmes de rejet de la chaleur résiduelle

[tm134, Eurovent, 1998]

1.1. Sources de chaleur, niveaux de chaleur et domaines d'application

Tous les procédés industriels et manufacturiers qui utilisent de l'énergie transforment plusieurs formes d'énergie (mécanique, chimique, électrique, etc.) en chaleur et en bruit. Selon le procédé choisi, cette chaleur ne peut pas toujours être récupérée et/ou réutilisée, mais elle doit être extraite du procédé par refroidissement. La quantité de chaleur non récupérable peut être appelée chaleur résiduelle, et elle doit être rejetée dans l'environnement qui sert de puits thermique. Plusieurs procédés ayant une production élevée de chaleur résiduelle et ayant des besoins importants en refroidissement sont mentionnés ci-dessous. Dans de nombreux procédés, différentes sources de chaleur résiduelle existent et à différents niveaux : élevé (plus de 60°C), moyen (25-60°C) et faible (10-25°C). De plus, différents procédés avec des demandes spécifiques peuvent se trouver sur un même site de production. Des systèmes de refroidissement de grande taille sont utilisés dans les grandes installations de combustion (sites de production électrique), dans l'industrie chimique, les raffineries, la sidérurgie, l'agro-alimentaire, l'industrie papetière, les incinérateurs et l'industrie du verre.

Dans un procédé similaire, le refroidissement est utilisé à différentes fins : pour refroidir les fluides du procédé dans un échangeur de chaleur, les pompes et les compresseurs, les générateurs de vide et les condenseurs de turbine à vapeur. Les principales sources de chaleur résiduelle suivantes peuvent être réparties en fonction de leur niveau respectif de chaleur résiduelle.

- Friction – par définition, la transformation de l'énergie mécanique en chaleur. Les systèmes de refroidissement de ces procédés sont généralement des systèmes indirects utilisant l'huile comme fluide de refroidissement primaire. Puisque l'huile sert de fluide de refroidissement, le système de refroidissement est sensible aux températures élevées. De fait, la température moyenne de la chaleur résiduelle a un niveau moyen.
- Combustion – la transformation d'énergie chimique par oxydation en chaleur. Le niveau de chaleur résiduelle des procédés de combustion est variable.
- Procédés exothermiques (chimiques) – De nombreux procédés chimiques sont exothermiques : l'énergie chimique est transformée en chaleur sans aucune combustion. Les procédés exothermiques sont souvent très sensibles à l'efficacité de récupération de la chaleur résiduelle. Le niveau de température de la chaleur résiduelle est moyen à élevé, en fonction du procédé.
- Compression – la compression d'un gaz entraîne la génération de chaleur. Cette chaleur résiduelle est généralement récupérée à un niveau de température moyen à élevé.
- Condensation (cycles thermodynamiques) – De nombreux procédés utilisent le principe des cycles thermodynamiques. Un fluide liquide s'évapore, consommant de l'énergie, et est ensuite condensé, transformant l'énergie rejetée en chaleur. Les systèmes thermodynamiques sont très sensibles à la température et le niveau de température est moyen à faible.

Le niveau de chaleur résiduelle est un facteur important à prendre en compte pour la sélection d'un système de refroidissement industriel. Le Tableau 1.1 montre les plages de température du fluide à refroidir et les systèmes de refroidissement les plus adaptés. Plus le niveau de chaleur résiduelle est faible, et plus il sera difficile de le refroidir avec des systèmes de refroidissement à air. Dans la pratique, le refroidissement par air est souvent utilisé pour les températures de procédé supérieures à 60 °C. Les niveaux de chaleur supérieurs à 100 °C sont généralement pré-refroidis avec des refroidisseurs à air si aucune option de réutilisation n'est disponible. Le refroidissement par évaporation est, en principe, souvent utilisé pour refroidir les fluides de procédé ayant des températures moyennes ou faibles. Pour les températures faibles, les systèmes à passage unique sont également utilisés, notamment si des puissances importantes sont requises.

Les plages de température ne devraient pas être considérées comme fixes lors du choix d'un système de refroidissement. Pour les plages de températures élevées, on utilise 50 °C ou 60 °C comme mentionné précédemment. De plus, les températures dépendent énormément de la situation locale (climat, température du liquide de refroidissement) et l'utilisation potentielle d'un système variera en conséquence. Les systèmes à passage unique sont donc également utilisés à des niveaux de température élevés, à condition de ne pas dépasser les températures de rejet admissibles au niveau de la sortie dans l'eau de réception. Pour les procédés qui fonctionneront toute l'année dans des conditions climatiques variables, il peut être nécessaire de combiner plusieurs systèmes de refroidissement.

Tableau 1.1 : Niveaux de température et type d'application

[tm139, Eurovent, 1998]

Plage de températures	Système de refroidissement adapté	Applications typiques
Basse température (10 – 25°C)	<ul style="list-style-type: none"> • systèmes à passage unique (direct/indirect) • tours de refroidissement par voie humide (tirage forcé/naturel) • tours de refroidissement hybrides • systèmes de refroidissement combinés 	<ul style="list-style-type: none"> • production d'électricité • procédés pétrochimiques
Température moyenne (25 – 60°C)	<ul style="list-style-type: none"> • systèmes à passage unique (direct/indirect) • tours de refroidissement par voie humide (tirage forcé/naturel) • tours de refroidissement en circuit fermé • condenseurs par évaporation • refroidisseurs à air • condenseurs à air • tours de refroidissement hybrides/condenseurs • tours de refroidissement hybrides en circuit fermé 	<ul style="list-style-type: none"> • cycles de réfrigération • compresseurs • refroidissement de machines • refroidissement d'autoclaves • refroidissement de fours rotatifs • aciéries • cimenteries • production d'électricité dans les régions plus chaudes (méditerranéennes)
Température élevée (supérieure à 60°C)	<ul style="list-style-type: none"> • systèmes à passage unique (direct/indirect) dans des cas particuliers • tours de refroidissement par voie humide (tirage forcé/naturel) • refroidisseur à air/condenseurs 	<ul style="list-style-type: none"> • usines d'incinération de déchets • refroidissement du moteur • refroidissement des gaz d'échappement • procédés chimiques

1.2. Niveau de système de refroidissement et influence sur l'efficacité du procédé

1.2.1 Applications sensibles à la température

De nombreux procédés chimiques et industriels sont des applications pour lesquelles la température est critique. L'efficacité du procédé est sensible à la température et/ou à la pression et, par conséquent, est liée à l'efficacité d'évacuation de la chaleur résiduelle. Pour ces procédés, « l'approche » horizontale de la meilleure technologie de refroidissement disponible est liée à « l'approche » verticale de la meilleure technologie de procédé disponible. Des exemples d'applications pour lesquelles la température est critique sont :

- la production d'électricité,
- les cycles thermodynamiques,
- les procédés exothermiques.

La prévention intégrée de la pollution signifie que la sélection de la meilleure technologie de refroidissement disponible et l'application de techniques, de traitements ou de modes de fonctionnement devraient prendre en considération non seulement les impacts environnementaux directs des différents systèmes de refroidissement, mais également les impacts environnementaux indirects en raison des efficacités variables des différents procédés. Il doit être décidé, au niveau local, s'il faut continuer à s'intéresser au système de refroidissement plutôt qu'au procédé de production. L'augmentation des impacts indirects peut être plus importante que la baisse des impacts directs du système de refroidissement sélectionné.

Les centrales électriques (cf. Annexe XII) sont la source la plus importante de chaleur résiduelle. La transformation de l'énergie fossile en énergie électrique est liée à de nombreux processus générant de la chaleur résiduelle, mentionnés dans la Section 1.1. La chaleur résiduelle est générée au cours de la combustion, par les frottements de la turbine, lors de la condensation de la vapeur et lors de la conversion en l'électricité. Un système annexe de refroidissement par eau, pour les systèmes auxiliaires utilisant de l'huile ou du gaz pour le bon fonctionnement du matériel, génère également une petite quantité de chaleur résiduelle. Si les besoins de refroidissement du système générant de l'électricité ne peuvent pas être atteints, il s'ensuit une baisse immédiate du rendement global et une hausse des émissions dans l'air.

Cette corrélation est illustrée par l'exemple suivant pour une centrale électrique, où le système de refroidissement alternatif, présumé moins efficace, entraîne une perte d'efficacité de la centrale électrique d'environ 3 % (Tableau 1.2). Il en résulte que la consommation de la centrale électrique et ses émissions dans l'air augmenteront également d'environ 3 %. Comme les émissions dépendent également du combustible utilisé, elles pourraient facilement être différentes dans une autre situation, mais aucune donnée n'est disponible pour évaluer davantage cet aspect.

Tableau 1.2 : Émissions d'une centrale électrique moyenne de l'Europe de l'Ouest liées à une perte d'efficacité de 3 %

[tm139, Eurovent, 1998]

Émissions dans l'air	Émissions/consommation énergétique en [g/kWh]	Émissions supplémentaires imputables à une perte d'efficacité de 3% [g/kWh]
CO ₂	485	14,6
SO ₂	2,4	0,072
NO _x	1,0	0,031
Poussières	0,2	0,006
Consommation énergétique primaire : 2,65 kW et consommation énergétique supplémentaire de 0,08 kW		

La manière dont le choix d'un système de refroidissement peut affecter la performance est bien illustrée par les exemples suivants tirés de Caudron [tm056, Caudron, 1991]. Ces chiffres illustrent les conséquences du choix d'un système de refroidissement dans des conditions climatiques données. C'est la raison pour laquelle il faut être prudent, car la perte d'efficacité qui peut se produire dépend du choix du système de refroidissement, des conditions climatiques et de la conception de la turbine. Les pressions dans le condenseur varieront en conséquence comme le montre le Tableau ci-dessous. Dans des zones ayant une température ambiante plus élevée, les niveaux de vide sont plus élevés avec des systèmes par voie sèche et peuvent atteindre 425 mbar. Mais de nombreux autres facteurs, tels que l'encrassement, l'entartrage, la corrosion et la conception sous-dimensionnée peuvent conduire à des pertes d'efficacité similaires.

Dans le tableau, le système à passage unique est pris comme point de référence pour la comparaison des autres systèmes. Les approches des aéroréfrigérants sont supplémentaires à l'approche de l'échangeur de chaleur (condenseur), supposée égale pour tous les systèmes.

À partir de ce tableau, il est clair que le choix d'un système de refroidissement, comme celui d'un système par voie sèche à la place d'un système par voie humide, demande une réflexion attentive. Le tableau montre également pourquoi de nombreuses centrales électriques se situent de préférence sur les côtes ou à proximité de rivières importantes. Du point de vue de la production, les systèmes à passage unique sont plus efficaces que le système de référence (à tirage naturel par voie humide).

Pour les cycles combinés, la pression du condenseur et la puissance électrique fournies varient de façon similaire selon le type de système de refroidissement choisi et la perte relative de puissance devient même encore plus évidente.

Tableau 1.3 : Effet relatif sur la fourniture de puissance électrique en fonction de l'utilisation de tours de refroidissement par voie humide ou par voie sèche, pour des unités de 1300 MW_{th}

[EDF, pers. comm., 1999] [tm056, Caudron, 1991].

Type de système de réfrigération			Tour à refroidissement par voie humide		Tour à refroidissement par voie humide/sèche	Tour de refroidissement par voie sèche	
	À passage unique	Par voie humide à tirage naturel	À tirage naturel	À tirage forcé	À tirage forcé	À tirage naturel	À tirage forcé
Approche K (air sec 11[°C]/air humide 9[°C])	-	12	12,5	12,5	13,5	16	17
pression de condensation nominale (mbar)	44	68	63	63	66	82	80
Puissance thermique (MW _{th})	1 810	1 823	2 458	-	-	-	-
Puissance électrique fournie (MWe)	955	937	1 285	1 275	1 275	1 260	1 240
Écart de puissance électrique fournie (%)	+ 1,9	0	0	- 0,8	- 0,8	- 2	- 3,5

Tableau 1.4 : Effet relatif sur la fourniture de puissance électrique en fonction de l'utilisation de tours de refroidissement par voie humide ou par voie sèche, pour une unité de cycle combiné de 290 MW_{th}

[EDF, pers. comm., 1999]

Type de système de refroidissement	Tour à refroidissement par voie humide			Condenseur à air
	À passage unique	À tirage naturel	À tirage forcé	
Approche K (air sec 11[°C]/air humide 9[°C])	/	≈8	≈8	≈29
Pression de condensation nominale (mbar)	34	44	44	74
Puissance thermique (MW _{th})	290	290	290	290
Différence de puissance électrique fournie (MWe)	+ 0,65	0	-1,05	-5,65

1.2.2 Applications non sensibles

D'autres applications sont moins sensibles à la température. L'efficacité de ces procédés est moins liée à la température ou à la pression. Pour ces procédés, il faudrait privilégier les systèmes de refroidissement les plus efficaces des points de vue économique et écologique pour évacuer la chaleur résiduelle qui persiste une fois que les options possibles de réutilisation ont été exploitées.

1.3. Optimisation du procédé primaire et de réutilisation de la chaleur

L'optimisation du rendement énergétique global du procédé primaire ne sera pas abordée en détail dans ce document de référence. Toutefois, dans « l'approche » préventive de l'IPPC, cette optimisation devrait être effectuée avant l'évacuation de la chaleur résiduelle. En d'autres termes, le besoin de rejet de chaleur doit être minimisé, ce qui affectera simultanément la configuration et la taille du système de refroidissement requis. De plus, un système de refroidissement n'implique pas obligatoirement un rejet dans l'environnement, comme le prouvent les tentatives réussies de valorisation de cette énergie.

1.3.1 Optimisation du procédé primaire

L'optimisation du procédé primaire peut réduire de façon significative les effets globaux sur l'environnement. Dans de nombreux États Membres, la majorité de la chaleur non récupérable qui sera traitée par les systèmes de refroidissement est imputable à la production d'électricité. En fonction de l'efficacité globale, jusqu'à 60 % de l'énergie consommée (sous forme de combustible) est perdue sous forme de chaleur résiduelle. Si l'efficacité du procédé de production d'électricité augmente, les effets sur l'environnement peuvent être réduits et le système de refroidissement joue un rôle crucial à ce niveau. Pour d'autres secteurs industriels, ce principe peut également être utilisé et permettre de réduire les coûts énergétiques, la quantité de chaleur rejetée dans l'environnement ainsi que les émissions dans l'air (CO₂). En général, plus le niveau de chaleur est élevé, plus il est facile de la réutiliser.

Quelques exemples des techniques actuellement utilisées sont :

- le préchauffage du combustible ou des matières premières (métaux) ;
- la méthode du pincement ;
- les applications externes (ex. chauffage de serres/zones résidentielles) ;
- la cogénération dans l'industrie électrique.

Au lieu d'utiliser de l'eau ou de l'air de refroidissement uniquement, il est courant dans les raffineries de préchauffer les combustibles en utilisant un flux froid d'hydrocarbures pour refroidir un flux chaud raffiné à la sortie de l'unité. Par conséquent, il y a un besoin réduit de préchauffage du carburant brut (froid) et une faible demande d'eau de refroidissement. En fonction du procédé, le nombre de flux froids peut être limité et les besoins en eau de refroidissement ou en air resteront. La cogénération, ou génération combinée de chaleur et d'électricité, est utilisée dans l'industrie électrique et dans d'autres secteurs industriels (p. ex. industries papetière ou pétrochimique). Lorsque ces deux formes d'énergie sont requises, leur génération peut être combinée. Cela permet d'économiser de l'énergie, de réduire les émissions de CO₂ et de SO₂, et réclame à peine des besoins en refroidissement, évitant ainsi d'avoir besoin d'un système de refroidissement important.

1.3.2 Utilisation de la chaleur résiduelle hors site

Si l'optimisation du procédé générant la chaleur résiduelle n'en réduit pas le niveau, l'« approche » MTD consisterait à chercher comment réutiliser cette chaleur résiduelle. Ce problème ne s'inscrit pas dans le périmètre de l'IPPC, car il concerne également la gestion énergétique respectueuse de l'environnement. La valorisation peut être effectuée sur un site existant, mais également intervenir dans le choix d'un site (voir le chapitre suivant). La recherche des consommateurs idéaux n'est toutefois pas une tâche triviale. Souvent, les besoins des consommateurs ne sont pas conciliables avec les demandes en refroidissement. Dans certains cas, les consommateurs de chaleur ont besoin d'un niveau de température plus élevé que celui prévu. S'il est techniquement possible de faire fonctionner le procédé primaire à un niveau de température plus élevé, le bilan énergétique global doit être observé avec attention. Souvent, la perte d'efficacité énergétique du procédé primaire l'emporte sur les économies réalisées dans la consommation de l'énergie « rejetée ». Il faut également veiller à ne pas créer de situation de dépendance de la disponibilité de la « chaleur résiduelle ».

On peut trouver un certain nombre d'exemples d'utilisation externe de la « chaleur résiduelle » des centrales électriques, dans des réseaux de chauffage urbains, des habitations privées et des bureaux au cours des mois d'hiver, ou dans le chauffage de serres en utilisant la cogénération ou un cycle combiné. Les applications peuvent augmenter le rendement d'utilisation du carburant d'environ 40 % et jusqu'à 70 % et donc réduire les besoins en refroidissement de l'installation. Dans les exemples donnés, une tour de refroidissement hybride ayant une vitesse de ventilation variable est utilisée pour s'adapter aux besoins en chauffage urbain. Dans un autre exemple, la tour n'avait besoin de fonctionner en mode sec qu'à environ 10 % de sa capacité totale dès que la température extérieure chutait de 5 °C, simplement

parce que l'utilisation externe maximale de chaleur avait été atteinte à ce stade. On peut donc se demander dans quelle mesure les options potentielles de réutilisation peuvent influencer le choix d'un système de refroidissement où la souplesse de fonctionnement est requise. À l'heure actuelle, aucun exemple montrant comment les options de réutilisation se reflètent dans la sélection d'un système de refroidissement n'est recensé.

1.4. Choix d'un système de refroidissement répondant aux exigences du procédé et aux conditions du site

1.4.1 Besoins du procédé

Une fois le niveau de chaleur évalué (élevé, moyen, faible), un premier choix grossier pourrait être effectué en utilisant le Tableau 1.1. En plus du niveau de chaleur, plusieurs autres facteurs sont également impliqués dans le choix d'un système de refroidissement afin de répondre aux besoins du procédé et aux conditions générales du site, tels que :

- la température minimale finale requise pour le fluide à refroidir ;
- le besoin en puissance de refroidissement ;
- les besoins d'un circuit indirect, ce qui augmente l'approche thermique ;
- les conditions climatiques, la disponibilité en eau et les besoins d'espace.

En ce qui concerne les effets indirects d'un refroidissement non optimal du procédé, la température finale minimale requise du procédé à refroidir est cruciale. Cela signifie que le(s) système(s) de refroidissement utilisé(s) ou choisi(s) doit/doivent atteindre cette température finale, et en même temps répondre aux autres exigences liés au procédé. La performance du système de refroidissement devrait idéalement être optimisée en prenant en compte la plage de température annuelle du fluide de refroidissement. Pour le refroidissement par voie humide, la température de bulbe humide est importante et il y a une certaine flexibilité dans le choix de la température de conception qui, à son tour, affectera la taille du système de refroidissement et ses besoins en électricité. La réduction de la taille des systèmes de refroidissement doit être évaluée avec soin et acceptée uniquement au cas par cas. Certaines installations doivent fonctionner toute l'année avec une efficacité acceptable et avoir une puissance nominale maximale. Par exemple, lorsque des tours à tirage forcée ou des refroidisseurs à air sec sont utilisés, on peut faire fonctionner le système de façon économique si les refroidisseurs ont plusieurs cellules. Certains refroidisseurs peuvent être neutralisés pour économiser de l'eau et de l'énergie sans perte d'efficacité notable.

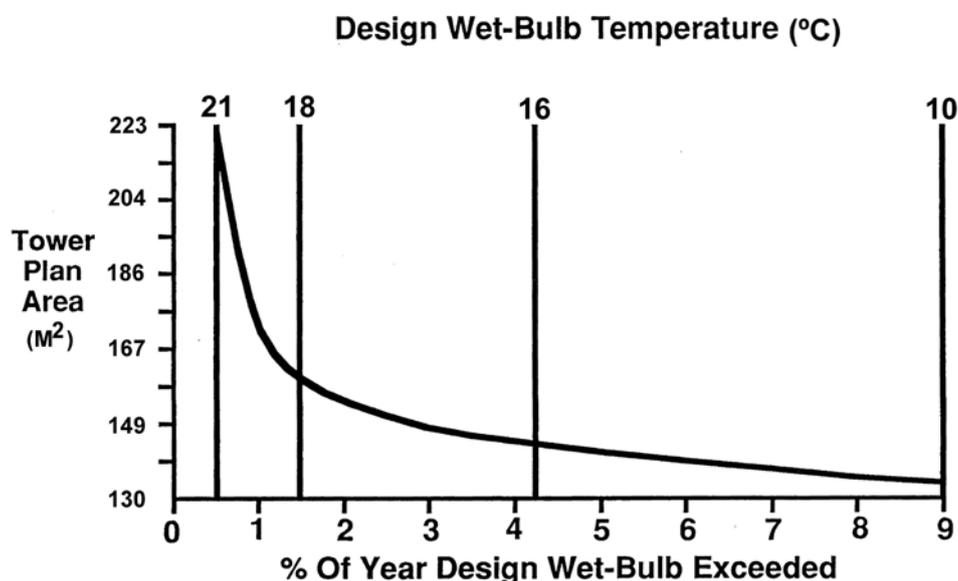


Figure 1.2 : Surface de la tour en fonction du pourcentage de temps où la température de bulbe humide est dépassée (températures de conception 40/24/18°C),

[tm083, Adams and Stevens]

En ce qui concerne l'industrie de production d'énergie, la Figure 1.2 n'est pas applicable car l'optimisation du refroidissement se fait en utilisant des températures validées :

- pour les tours de refroidissement par voie humide ou sèche, la température de l'air humide (ou sec) est prise durant toute l'année, à raison d'une mesure toutes les trois heures.
- pour les systèmes à passage unique, la température de l'eau est mesurée de préférence une fois par mois.

Puis, l'optimisation se fait en prenant en compte la valorisation de l'énergie sur l'ensemble de l'année. Cette méthode, appelée bilan actualisé global, est décrite dans l'Annexe XII.

En général, dans la plupart des industries, une marge de sécurité est appliquée pour assurer que le système de refroidissement pourra satisfaire la demande de refroidissement, notamment au cours des mois d'été. Dans des situations où la température de bulbe humide reste à tout moment inférieure à la température de bulbe humide de conception, ou lorsque la charge thermique est inférieure, l'échangeur thermique peut être en surcapacité. Si cela doit se produire, des mesures opérationnelles telles que le fonctionnement variable des ventilateurs pourraient être considérées, permettant au système de tourner au-dessous de sa capacité et donc de réduire sa demande énergétique directe.

Dans de nombreuses industries, il est courant de surdimensionner le système de refroidissement au moment de sa phase d'installation pour laisser suffisamment de place à une augmentation de la capacité de production : la capacité d'extension est ensuite graduellement utilisée jusqu'à l'ajout d'une nouvelle tour. Lorsqu'un accroissement de production et de capacité de refroidissement est envisagé, il faut toujours évaluer la capacité d'extension du système de refroidissement existant, qu'elle soit inefficace (car sous-utilisée) ou avec une mauvaise maintenance.

Cette stratégie permet de déterminer la capacité de refroidissement requise (en kW_{th} ou en MW_{th}), la taille du système de refroidissement (échangeur de chaleur) et peut-être même le choix du fluide de refroidissement (eau ou air). En Europe, les industries qui ont besoin de puissances de refroidissement très importantes pour de faibles températures de procédé (production d'énergie et industrie pétrochimique) préfèrent les sites avec des ressources en eau disponible importantes, et où on peut utiliser des systèmes à passage unique. Lorsque l'approvisionnement en eau est limité, des tours de refroidissement ouvertes par voie humide ou sèche sont utilisées.

La nécessité de refroidir des substances (potentiellement) nocives peut également affecter la taille du système de refroidissement, comme pour la température finale potentielle (voir le principe de sécurité de la VCI dans le Chapitre 3, Annexe VI). Dans cette situation, « l'approche » MTD peut amener à la conclusion que les effets des fuites peuvent être évités de façon efficace seulement si un système secondaire (indirect) est utilisé. Cela signifie qu'une seconde circulation doit être conçue, et que la température de conception augmentera, avec au final une augmentation de l'approche. Ceci conduira à des températures finales de la substance à refroidir plus élevées, et finalement à une réduction de l'efficacité globale.

1.4.2 Choix du site

Il est évident qu'il existe une limite à l'idée que les caractéristiques propres à chaque site seront optimisées par le choix d'un site optimal. Pour les systèmes existants, le site est une valeur donnée et l'optimisation environnementale devra être prise en compte avec les contraintes du site. Par exemple, réduire l'utilisation d'eau en adoptant un refroidissement par air sec semble un choix évident. Toutefois, les conditions climatiques peuvent l'empêcher si la température de bulbe sec risque de dépasser la température de fonctionnement au cours d'une grande partie de l'année, sauf si l'on accepte une réduction du rendement du procédé de fabrication ainsi qu'une réduction simultanée de l'efficacité globale de l'installation.

Si la sélection du site est une possibilité, les besoins du procédé en refroidissement peuvent être influencés de façon significative. Aussi, il est important qu'au cours de la phase de conception les aspects suivants soient considérés dans le processus de choix du site :

- la quantité, la qualité et les coûts du fluide de refroidissement disponible (eau et air),
- la taille disponible (aire, hauteur, poids des installations de refroidissement),
- l'effet sur la qualité de l'eau et sur les organismes aquatiques,
- l'effet sur la qualité de l'air,
- les effets météorologiques,
- les rejets de substances chimiques dans l'eau,
- les émissions sonores,
- les aspects esthétiques du bâtiment,

- les dépenses en capital pour les systèmes de refroidissement, les pompes, le traitement des conduits et de l'eau,
- les coûts de fonctionnement des pompes, des ventilateurs et du traitement de l'eau,
- les coûts annuels de maintenance et de réparation,
- les paramètres de fonctionnement tels que la durée de vie minimale, le temps de fonctionnement annuel, la charge moyenne dans le taux de production thermique et le débit d'eau,
- les exigences de fonctionnement tels que l'approche requise et la disponibilité des systèmes.
- les exigences de la législation sur l'environnement concernant les émissions de chaleur, les émissions de panache, les émissions acoustiques, la taille globale, etc.
- pour les centrales électriques : les pertes d'efficacité de l'installation, les dépenses en capital pour compenser les pertes de puissance produite, la durée de vie de l'installation et les pertes de revenus énergétiques imputables à la faible efficacité de l'installation.

Espace

Des systèmes de refroidissement différents ont des besoins d'espace spécifiques pour atteindre la même performance de refroidissement ; ils ont des exigences, une hauteur et un poids différents. Tout dépend du principe du transfert thermique qu'ils utilisent (voir l'Annexe I).

Pour les systèmes importants, la limitation de l'espace peut être un problème et fait partie de l'évaluation du site. Elle concerne les procédés qui seront entièrement refroidis par air où des constructions multi-cellules importantes sont nécessaires pour assurer la puissance de refroidissement requise. Pour les puissances plus petites, les restrictions spatiales ne devraient pas être un facteur limitant car il existe des structures de toit spécifiquement conçues pour ces situations.

Les limitations d'espace sur des sites existants, par exemple dans des zones d'habitat urbain densément peuplées ou des sites industriels très denses, sont un facteur important dans le choix des systèmes de refroidissement. Par exemple, une tour de refroidissement située en haut d'un bâtiment n'a pas besoin d'espace au sol supplémentaire, mais l'emplacement sur le toit peut imposer des restrictions sur son poids.

Les besoins en espace et en hauteur sont un critère important pour les systèmes hydriques et ceux refroidis par air. La ventilation de l'air peut être obtenue par tirage naturel ou par des ventilateurs (tirage forcé). Pour la même capacité de refroidissement, les systèmes de refroidissement par tirage naturel doivent être plus importantes et plus élevés que les systèmes à tirage forcé.

Évaluation du site

Concernant le choix du site dans plusieurs États Membres, pour les sites importants il est courant de procéder à l'évaluation de l'impact sur l'environnement dans le cadre des procédures d'autorisation. De plus, en raison de l'impact potentiellement élevé du choix du site sur les performances de refroidissement, des initiatives ont été prises pour la pré-sélection des sites de refroidissement optimaux dans le cadre de programmes de planification régionaux.

Un exemple de l'évaluation d'un site pour les systèmes de refroidissement ayant d'importants besoins en eau tels que ceux utilisés dans les centrales électriques est donné dans le Tableau 1.5 [tm012, UBA, 1982]. La combinaison de critères locaux permet d'aboutir au classement des conditions d'un site (favorables, moyennes, défavorables). Il faut souligner que ce type d'évaluation n'est qu'une partie de l'évaluation totale et qu'un site de type 3 (pertinence en doute) pourrait apparaître favorable avec un bilan global.

Un exemple des conséquences de la sélection du site est présenté lorsque « l'approche » MTD est utilisée pour un site qualifié de type 3.

Tableau 1.5 : Critères relatifs à la sélection d'un site avec une demande de refroidissement importante
(Issu de [tm012, UBA, 1982])

Critère	Degré 1 (bonne aptitude)	Degré 2 (aptitude satisfaisante)	Degré 3 (doute sur aptitude)	Explications
Approvisionnement suffisant en eau de refroidissement	$NNQ > \frac{W}{\zeta c \Delta T}$ <p>Approvisionnement important en eau de refroidissement</p>	$NNQ \approx \frac{W}{\zeta c \Delta T}$ <p>Approvisionnement suffisant en eau de refroidissement</p>	$NNQ < \frac{W}{\zeta c \Delta T}$ <p>Approvisionnement insuffisant en eau sans mesures techniques</p>	<p>NNQ : le plus faible débit en eau de surface</p> <p>W : le flux de chaleur devant être transféré dans l'eau</p> <p>ζ : densité de l'eau</p> <p>c : capacité thermique spécifique de l'eau</p> <p>ΔT : hausse de température autorisée de l'eau de surface</p>
Qualité d'eau suffisante	Catégorie de la qualité d'eau II modérément polluée II/III gravement polluée	Catégorie de la qualité d'eau III sévèrement contaminée	Sans respect de la catégorie de la qualité	(Classification allemande de la qualité de l'eau) I non polluée II modérément polluée II/III gravement polluée III-IV très sévèrement polluée IV excessivement polluée
Conforme avec les pertes par évaporation autorisées	$V < A a$ Pertes par évaporation mineures	$V \approx A a$ Pertes par évaporation supportables	$V > A a$ Pertes par évaporation non acceptable sans mesures techniques	V: pertes par évaporation au niveau du site sélectionné (débit volumétrique) A: évaporation permise pour le site a: fraction de A qui peut être utilisée limitée par les autres sources de chaleur résiduelle du site
Impact sur l'approvisionnement en eau potable	Le rejet d'eau de refroidissement n'a aucun impact sur l'approvisionnement en eau potable	Dans certains cas, le rejet d'eau de refroidissement peut avoir un impact sur l'approvisionnement en eau potable, les effets indésirables peuvent être évités	Le rejet d'eau de refroidissement a un impact sur l'approvisionnement en eau potable, les effets indésirables ne peuvent pas être neutralisés sans mesures techniques supplémentaires	Ce critère doit être pris en compte si, en aval du site, l'eau potable est obtenue à partir de l'eau de surface (actuellement ou à l'avenir)

Critère	Degré 1 (bonne aptitude)	Degré 2 (aptitude satisfaisante)	Degré 3 (doute sur aptitude)	Explications
Fréquence des longs panaches avec une faible altitude et un transfert de chaleur résiduelle à proximité directe du site (dans un rayon de 2 Km)	Panaches à fréquence très basse (<2 % p.a. en moyenne), longs (<100 m), faible altitude (≤300 m) et transfert de chaleur résiduelle < 10 000 MW	Longs panaches à basse altitude plus fréquents et transfert de chaleur résiduelle < 10 000 MW	Transfert de chaleur résiduelle > 10 000 MW	
Situation topographique à proximité du site	Pas ou peu d'élévations ayant une altitude supérieure à la tour de refroidissement dans un rayon de 20 Km du site	Plusieurs élévations à une hauteur supérieure à celle de la tour de refroidissement dans un rayon de 2 à 20 Km du site	Plusieurs élévations supérieures à celle de la tour de refroidissement situées à moins de 2 Km du site	
Valorisation économique possible de la chaleur résiduelle	Potentiel important pour une utilisation envisageable sur le plan économique pour du chauffage urbain	Potentiel réduit d'une utilisation envisageable pour du chauffage urbain	Pas de possibilité d'une utilisation de la chaleur résiduelle a priori ; ou pas suffisamment analysé	La possibilité d'une valorisation économique de la chaleur résiduelle augmente l'attractivité d'un site et peut pallier d'autres inconvénients et diminue le rejet de chaleur

L'évaluation devrait commencer par la sélection des options de réutilisation de la chaleur, car cela pourrait avoir un effet sur la demande en eau de refroidissement. Ce critère ne peut pas être satisfait si aucune utilisation externe de chaleur n'est possible et la totalité de la chaleur non récupérable devra être évacuée. L'approvisionnement en eau et l'évaporation permise sont limités et les panaches peuvent créer des perturbations à proximité du site. Si, pour des raisons propres au procédé, un système refroidi par voie humide est nécessaire, les méthodes permettant de faire des économies d'eau devront être utilisées et, par exemple, un système à recirculation forcée (comme une tour de refroidissement par voie humide) sera préférable à un système à passage unique. Cela impliquera l'application d'un traitement de l'eau en fonction de la qualité de l'eau et des cycles de concentration. La contrainte supplémentaire pourrait être la suppression du panache, conduisant nécessairement à une configuration hybride. S'il y a suffisamment d'espace et que les conditions climatiques sont favorables, l'utilisation du refroidissement par air peut également être envisagée. « L'approche » intégrée serait suivie d'une comparaison de l'utilisation de l'énergie et des coûts. Le processus de sélection du site requiert que, pour le « candidat final », une évaluation détaillée du choix des systèmes de refroidissement possibles soit conduite afin de trouver la solution globale optimale.

1.4.3 Conditions climatiques

Le climat, exprimé à travers les températures de bulbe sec et humide, est une condition extrêmement importante spécifique à chaque site. Il influence à la fois les choix et le type de refroidissement et la température finale possible du procédé à refroidir. La contradiction du refroidissement avec de l'air et/ou de l'eau repose sur le fait que lorsque la demande en refroidissement est importante, il devient plus difficile d'atteindre les performances requises. En particulier dans les zones où les températures de l'air et de l'eau sont élevées et coïncident avec une faible disponibilité en eau pendant une partie de l'année, une certaine flexibilité opérationnelle du système de refroidissement peut s'avérer cruciale ; elle peut être obtenue en combinant le refroidissement par eau et par air. Toutefois, une certaine perte d'efficacité doit parfois être acceptée.

Pour atteindre la température de procédé requise, il est évident que tous les systèmes de refroidissement exigent que le fluide de refroidissement ait une température inférieure à celle du fluide à refroidir, mais cela dépend des températures de bulbe sec et humide. Pour les systèmes de refroidissement par air sec et par eau, les variations saisonnières de la température du fluide de refroidissement peuvent limiter le choix d'un système de refroidissement et peuvent exiger un certain mode de fonctionnement.

La température de bulbe humide est toujours inférieure à la température de bulbe sec (Tableau 1.6). La température de bulbe humide dépend de la température atmosphérique mesurée, de l'humidité et de la pression de l'air. Pour le transfert de chaleur latente (par évaporation), la température de bulbe humide est la température appropriée. C'est en théorie la température la plus basse à laquelle l'eau peut être refroidie par évaporation. Pour le transfert de chaleur sensible, la température de bulbe sec (air sec) est appropriée, lorsque l'air est le fluide de refroidissement.

Pour sélectionner le type et la conception du système de refroidissement, la température de calcul est essentielle et se rapporte généralement aux niveaux estivaux des températures de bulbe sec et humide. Plus la différence entre ces températures est grande et plus les températures de bulbe sec sont élevées, et plus il sera difficile d'atteindre des températures finales basses avec les systèmes de refroidissement par air sec. Comme nous l'avons déjà mentionné, cela peut provoquer des pertes de rendement. Il est possible de prendre des mesures pour prévenir les pertes, mais elles nécessitent un investissement conséquent. Pour des raisons économiques, il est utile de déterminer la variation de ces températures au cours de l'année, et le pourcentage de l'année sur lequel ces températures sont en effet atteintes.

Par exemple, le Tableau 1.6 montre comment le choix d'un système de refroidissement sec ou humide peut affecter le rendement du procédé (cycle de Carnot), pour différentes conditions climatiques en Europe. Dans cet exemple, on considère que l'approche pour le refroidissement humide est de 4 K, qu'il faut ajouter à la température de bulbe humide pour obtenir la température finale minimale du fluide de refroidissement. L'approche pour le refroidissement sec est de 12 K, devant être ajouté à la température de bulbe sec. Plus la différence entre la température finale sèche et la température finale humide est importante, plus la perte de rendement est grande. Dans cet exemple, des pertes de 0,35% par K en moyenne apparaissent. En même temps, avec par exemple une perte de rendement de 5%, le rendement d'une centrale électrique classique s'élèverait à 38,6 % au lieu de 40 % (voir ANNEXE XII.6).

Tableau 1.6 : Conditions climatiques en Europe
(extrait de [tm139, Eurovent, 1998])

Pays et station							
	Temp. de bulbe sec (1%) ² (°C)	Temp. de bulbe humide (1%) ² (°C)	Écart K	Temp. finale par voie sèche (°C)	Temp. finale par voie humide (°C)	ΔT humide-sec (K)	Perte de rendement ⁵ (%)
Grèce, Athènes	36	22	14	48	26	22	7,7
Espagne, Madrid	34	22	12	46	26	20	7,0
France, Paris	32	21	11	44	25	19	6,7
Italie, Rome	34	23	11	46	27	19	6,7
Autriche, Vienne	31	22	9	43	26	17	6,0
Allemagne, Berlin	29	20	9	41	24	17	6,0
Pays-Bas, Amsterdam	26	18	8	38	22	16	5,6
France, Nice	31	23	8	43	27	16	5,6
Royaume-Uni, Londres	28	20	8	40	24	16	5,6
Allemagne, Hambourg	27	20	7	39	24	15	5,3
Norvège, Oslo	26	19	7	38	23	15	5,3
Belgique, Bruxelles	28	21	7	40	25	15	5,3
Espagne, Barcelone	31	24	7	43	28	15	5,3
Finlande, Helsinki	25	19	6	37	23	14	4,9
Danemark, Copenhague	26	20	6	38	24	14	4,9
Portugal, Lisbonne	32	27	5	44	31	13	4,6
Royaume-Uni, Glasgow	23	18	5	35	22	13	4,6
Irlande, Dublin	23	18	5	35	22	13	4,6

Note :

1. les données du Tableau 1.4 illustrent les variations climatiques en Europe. Les autres références peuvent fournir des données légèrement différentes. Les données exactes et un site peuvent être analysés par un institut météorologique.
2. statistiquement, à peine 1 % des températures maximales sont supérieures à ces données
3. approche de 12 K
4. approche du système humide : 4 K
5. perte d'efficacité de 0,35% par ΔT (K) en moyenne

1.4.4 Modélisation mathématique, simulations sur des modèles et tests sur des boucles pilotes

Pour évaluer l'impact des systèmes de refroidissement nouveaux et existants et pour optimiser leur performance des modèles numériques peuvent être utilisés, en particulier dans le cas d'écosystèmes sensibles. Des simulations et des tests sur des boucles pilotes peuvent être conduits, permettant la prévision de l'évolution de la température de l'eau de surface à proximité et dans les environs due aux décharges thermiques, et l'optimisation du traitement anti-encrassement.

L'objectif de la modélisation est d'étudier tous les impacts physiques et chimiques, et d'adapter les résultats de cette modélisation aux installations afin de les réduire le plus possible. Il est particulièrement important d'étudier :

- l'extraction de l'eau et les rejets,
- les aspects visuels du site,
- le développement de panaches,
- les impacts thermiques et chimiques sur l'environnement.

L'objectif des tests en boucle pilote est de définir le traitement optimum de l'eau de refroidissement contre l'entartrage et les développements biologiques. Pour ce faire, les installations pilotes représentatives des conditions réelles de fonctionnement commercial sont installées sur le site pendant environ une année. Cela permet de prendre en compte les écarts de qualité dans le cours d'eau au fil des saisons et de tester quelques options sur une échelle représentative (comme le choix du corps d'échange des tours de refroidissement ou le choix de l'alliage).

1.5. Sélection d'une technique de refroidissement permettant de satisfaire les exigences environnementales

Les exigences en matière d'environnement peuvent affecter l'utilisation des systèmes de refroidissement, et constituent une étape supplémentaire dans la sélection objective d'un nouveau système de refroidissement ou l'optimisation d'un système de refroidissement existant. En règle générale, on distingue cinq paramètres principaux ayant des conséquences sur le choix des systèmes de refroidissement :

- la réduction de la consommation d'énergie
- la réduction des émissions de chaleur
- la réduction des émissions de panaches importants
- la réduction des émissions dans l'eau
- la réduction des émissions sonores
- la minimisation des nuisances dans le sol et l'habitat terrestre.

Ces aspects sont liés et chaque choix a potentiellement des conséquences sur l'un des autres aspects. L'objectif est de prévenir les émissions dans l'environnement provenant des opérations de routine. Dans cette étape d'évaluation, les différences entre le refroidissement à eau, air et air/eau devraient devenir claires ainsi que les conséquences opérationnelles du choix d'une conception ou d'un matériau particuliers.

1.5.1 Comparaison générale entre les systèmes refroidis à l'air et à l'eau

La minimisation des aspects environnementaux se traduit souvent par une comparaison entre les systèmes de refroidissement à eau et à air. Il fut préconisé plus tôt dans ce document de ne pas choisir entre système de refroidissement à l'eau et à l'air à partir de considérations générales, car les contraintes locales peuvent limiter l'utilisation de chacun de ces systèmes. Toutefois, il pourrait s'avérer opportun de considérer ou de reconsidérer les besoins en eau d'un système de refroidissement à la vue des programmes pour la conservation de l'eau et de la demande croissante d'une eau de bonne qualité à d'autres fins (publiques et industrielles) que celle du refroidissement.

Le point de bascule économique dans le choix entre les systèmes à refroidissement par air sec et par eau n'est pas fixe et, selon les sources, se situera pour des températures finales requises entre 50 et 65°C, en fonction des conditions climatiques locales.

Certaines remarques générales ont été faites dans une comparaison des caractéristiques des systèmes de refroidissement par air sec et par voie humide avec la même puissance de refroidissement requise : [tm001, Bloemkolk, 1997]

Exigences en termes d'espace :

- Le refroidissement par air nécessite un fort besoin d'espace en raison de la faible capacité calorifique de l'air. L'espace peut être maintenu au minimum en installant des refroidisseurs d'air au-dessus d'un autre équipement du procédé ou d'un support de conduite ;
- Les systèmes de refroidissement par air ont des limites par rapport à leur positionnement : ils ne doivent pas se situer trop près des bâtiments, à cause de la circulation d'air obtenue, du blocage de l'approvisionnement en air et des risques liés à la circulation forcée.

Coûts de maintenance

- En général, les coûts de maintenance pour les systèmes de refroidissement par air sont considérés comme inférieurs, car le traitement anti-tartre et le nettoyage mécanique de la surface de l'eau n'est pas nécessaire ; de plus, ils ne nécessitent pas de surface supplémentaire pour compenser la perte de surface causée par la pollution du côté de l'eau.

Contrôle du procédé

- Le contrôle de la température du procédé est plus facile avec un refroidissement par air ou à recirculation qu'avec un système à passage unique où le bilan entrée/sortie de l'eau restreint le contrôle du flux d'eau et la hausse de température. Avec les systèmes de refroidissement à tirage forcé ou par évaporation, il n'y a pas de limite à la quantité d'air disponible, et le débit d'air peut être ajusté en fonction de la demande du procédé par le fonctionnement cyclique de ventilateurs, l'installation de plusieurs ventilateurs ou la modulation de puissance.
- Le contrôle des fuites dans l'eau de refroidissement est facile à détecter, même si la détection de fuites dans les condenseurs s'avère être plus délicate. En principe, cela affecte l'efficacité du procédé.

1.5.2 Facteurs de conception et choix des matériaux

Conformément à « l'approche » MTD, la conception du système de refroidissement et le choix des matériaux à utiliser sont une étape préventive importante. Chacun de ces paramètres peut influencer le fonctionnement, tout comme la consommation d'énergie directe, l'occurrence des émissions contrôlées (traitement de l'eau) et incontrôlées (fuites) dans l'environnement, les émissions sonores et le sens des émissions de chaleur (eau ou air). De plus, la conception et les matériaux sélectionnés nécessiteront un certain niveau d'investissement. Là encore, on cherche l'équilibre entre le niveau de prévention des émissions par la conception et les matériaux utilisés et les investissements impliqués. Il s'agit à nouveau d'un problème complexe, propre à chaque site, pour lequel les facteurs suivants doivent être pris en compte :

- type de fonctionnement (à passage unique ou à recirculation forcée par exemple)
- conception du refroidisseur et disposition du système de refroidissement (direct/indirect)
- niveau de pression (condenseur)
- composition et corrosivité de l'eau de refroidissement
- composition et corrosivité du fluide à refroidir
- longévité et coûts requis

Toute une gamme de matériaux est disponible et, par ordre croissant de résistance, les plus couramment utilisés sont l'acier carbone, l'acier galvanisé, l'aluminium/laiton, le cuivre/nickel, les types adaptés d'acier inoxydable et le titane. Dans ces groupes, on utilise une sous-classification relative à la qualité. En particulier, la résistance à la corrosion, l'érosion mécanique et la pollution biologique sont grandement déterminées par la qualité de l'eau combinée à d'éventuels agents de conditionnement.

L'Annexe IV donne quelques considérations sur le choix des matériaux pour des systèmes à passage unique et des systèmes aérorefrigérants en circuit ouvert. Pour chaque système de refroidissement industriel, on peut faire une évaluation similaire. Pour les systèmes par voie humide et hybrides, le matériau qui peut être sélectionné dépend à la fois du liquide de refroidissement et du fluide de procédé, tandis qu'avec les systèmes par voie sèche à circuits primaires fermés, le fluide de procédé est plus important.

Il est évident que, pour les différentes parties de l'installation, des matériaux différents peuvent être utilisés. La préférence va aux matériaux les moins sensibles à la corrosivité de l'eau ou aux conditions du procédé. Si des matériaux plus sensibles sont utilisés (alliages), un traitement complexe de l'eau de refroidissement ainsi qu'un programme de contrôle pourront s'avérer nécessaires, générant alors des émissions et des coûts supplémentaires.

Le Tableau 1.7 donne un exemple de l'effet causé par des différences de conception. Trois tours sont conçues pour les mêmes performances de refroidissement et environnementales requises. Le choix d'un système de refroidissement signifie différentes tailles, mais, en particulier, un supplément énergétique d'environ 7 kW est requis pour que la tour de refroidissement en circuit fermé donne la même performance avec le même niveau de puissance sonore. Dans ce cas, les coûts de fonctionnement peuvent amener à choisir l'une des autres options. Pour les autres facteurs de conception, des comparaisons similaires peuvent être faites, les effets obtenus pouvant favoriser une autre option.

Tableau 1.7: Comparaison des différents systèmes de refroidissement avec un niveau de puissance sonore maximum requis

[tm139, Eurovent, 1998]

	Tour de refroidissement à tirage forcé par voie humide	Tour de refroidissement en circuit fermé	Tour de refroidissement hybride en circuit fermé
Climat :			
Température de bulbe sec		26 °C	
Température de bulbe humide		18 °C	
Caractéristiques imposées :			
Puissance		1200 kW	
Température d'entrée		38 °C	
Température de sortie		32 °C	
Débit		47,8 l/s	
Niveau de puissance sonore	90 dB(A)	90 dB(A)	90 dB(A)
Données spécifiques :			
Longueur	3,7 m	3,7 m	5,2 m
Largeur	2,8 m	2,4 m	2,0 m
Hauteur	3,2 m	4,2 m	3,0 m
Puissance de ventilation	5 kW	11 kW	5,0 kW
Puissance de la pompe de pulvérisation	1 kW	2,2 kW	1,0 kW

1.5.3 Options de modification technologique des systèmes existants

Pour un système de refroidissement nouveau, il y aura plus de flexibilité dans la sélection entre les différents systèmes complets, et l'évaluation des options alternatives, alors que pour une installation existante, un changement de technologie est souvent une solution drastique. Dans certains cas spécifiques, il est possible de changer de technologie, mais le nombre d'options permettant de réduire les émissions à l'aide de solutions technologiques est limité pour les installations existantes. Alors que « l'approche » MTD considère que la prévention des émissions prévaut, tenant compte également des aspects économiques, le changement de technologie est une option qui devrait être prise en compte avant d'évaluer l'optimisation d'un système de refroidissement en fonctionnement. Les paragraphes suivants présentent les observations et les expériences des fournisseurs pour illustrer les étapes possibles d'optimisation dans « l'approche » MTD (Voir également l'Annexe XI).

1.5.3.1 Mise à niveau technologique (Retrofit) – raisons et considérations

Le retrofit des installations existantes peut être considéré pour les raisons suivantes :

1. remplacement de la technologie existante par une technologie différente avec des demandes fonctionnelles inférieures,
2. remplacement du matériel d'une technologie obsolète par un matériel moderne ayant une plus grande efficacité,
3. modification du matériel existant pour améliorer la performance ou pour satisfaire des demandes supplémentaires.

A la différence d'une nouvelle installation, où les paramètres du site peuvent être plus ou moins définis, dans les scénarios de retrofit, les paramètres suivants sont généralement fixés :

- l'espace – l'installation retrofitée doit s'adapter à l'espace existant,

- la disponibilité en ressources de fonctionnement – la nouvelle installation ne doit pas dépasser les ressources de fonctionnement qui étaient nécessaires à l'ancienne installation ; la nouvelle infrastructure entraînerait une hausse des coûts,
- les obligations réglementaires – les impacts sur l'environnement, tels que le niveau sonore, doivent être en principe au même niveau que ceux de l'ancienne installation.

L'espace est souvent lui-même une raison importante pour le rétrofit. Si une usine ou un bâtiment est construit sur un site dont l'espace est restreint, la solution pourrait être de sélectionner un nouveau type de système de refroidissement qui peut être placé sur le toit d'un bâtiment ou qui nécessite moins d'espace que le précédent.

La solution préférentielle serait une nouvelle installation avec des besoins de fonctionnement inférieurs, si bien que le rétrofit est également associé à de plus faibles coûts de fonctionnement. Un faible coût de fonctionnement sera l'une des raisons principales pour le rétrofit. On préfère, toutefois, considérer un scénario de rétrofit qui réduit les émissions ainsi que la consommation des ressources de fonctionnement. En général, cela nécessite un coût d'investissement plus élevé. Si l'on considère les économies réalisées sur les coûts de fonctionnement et toutes les réductions potentielles des émissions, les coûts d'investissement plus élevés peuvent s'avérer rapidement rentabilisés.

Tous les scénarios de rétrofit doivent tenir compte à la fois de la technologie de refroidissement et du procédé à refroidir. Ces deux aspects doivent être considérés comme un seul système. Si l'on modifie le système de refroidissement, le procédé peut être affecté et vice versa. Le premier objectif d'un rétrofit doit être de maintenir, ou si possible d'améliorer, l'efficacité du procédé à refroidir. D'autre part, les modifications du procédé à refroidir entraîneront différentes demandes sur le système de refroidissement. Cela pourrait être une autre raison importante de rétrofit.

Les modifications du procédé à refroidir peuvent entraîner un changement dans les demandes du système de refroidissement.

- Grâce à une nouvelle technologie, moins de rejets thermiques sont générés par le procédé et la puissance de refroidissement requise est moins importante (exemple : terminaux informatiques, procédés avec friction).
- Le niveau de température de la chaleur résiduelle est modifié, à des températures plus basses ou plus élevées (procédé d'incinération par exemple).
- Une plus grande partie de la chaleur générée par le procédé est récupérée, une plus faible quantité de chaleur résiduelle devra alors être rejetée dans l'environnement.
- La sensibilité du procédé à la température augmente, un système de refroidissement plus efficace s'avère alors nécessaire.

Le Tableau 1.8 résume les options de mises à niveau technologiques qui, en fonction des informations données par les fournisseurs, peuvent être considérées comme étant techniquement faciles (F), possibles (P), difficiles (D), impossibles (I) ou non applicables (NA). En général, chaque système possède plusieurs options pour le rétrofit. I-F indique que l'utilisation dépend largement de la situation spécifique du fonctionnement du système de refroidissement. (Voir aussi Chapitre 3 et Annexes).

Tableau 1.8 : Options de mise à niveau technologique des systèmes existants

(pers. comm.)

Option	Systèmes de refroidissement industriel ¹					
	SRPU	TROH	TROHS	TRFH	TRFS	TRFHS
Général	F	F	F	F	F	F
Augmenter puissance	F	F	D	D	D	D
Réduire consommation électrique kW _e	D	F	D	F	D	D
Réduire l'utilisation d'eau	NA	I-F	D	I-F	NA	D
Réduire le panache	NA	I-F	NA	F	NA	NA
Réduire le bruit	NA	F	D	F	D	F
Réduire l'entraînement d'eau	NA	F	F	F	NA	F
Note :						
¹ Code système (voir également le Chapitre 2) :						
SRPU – système de refroidissement à passage unique						
TROH – tour de refroidissement ouverte par voie humide						
TROHS – tour de refroidissement ouverte par voie humide/sèche (hybride)						
TRFH – tour de refroidissement fermée par voie humide						
TRFS – tour de refroidissement fermée par voie sèche						
TRFHS – tour de refroidissement fermée par voie humide ou sèche						

Il existe plusieurs façons de rétrofiter un procédé de refroidissement et les paragraphes qui suivent contiennent des considérations importantes ainsi que les scénarios possibles.

1.5.3.2 Changement de technologie de transfert thermique

En principe, de plus faibles coûts opérationnels associés à une nouvelle technologie ou des restrictions légales sont les principales raisons du remplacement d'une technologie de transfert de chaleur par une autre.

Un exemple typique est le remplacement d'un système à passage unique par un système à circulation forcée qui permet de réduire les coûts opérationnels (eau et eaux usées) et de se conformer aux restrictions relatives aux émissions de chaleur dans les eaux de surface. La performance économique du système à recirculation forcée dépend des coûts spécifiques de l'eau, des eaux usées et de l'énergie électrique. Partant du principe que les coûts moyens pour l'eau et les eaux usées sont de 1 €/m³ et les coûts d'électricité de 0,1 €/kWh, les coûts opérationnels pour cet exemple sont de 38 800 € pour le système à passage unique et de 48 000 € (2 100 € pour l'eau et 27 000 € pour l'électricité) pour le système à circulation forcée. L'économie annuelle est de 34 000 €; elle est supérieure aux coûts d'investissement de 21 000 €. Si le bilan penche en faveur de l'environnement en premier lieu et que les coûts d'investissement sont supérieurs aux coûts annuels, le temps de retour sur l'investissement deviendra un facteur important.

Dans cet exemple, ce sont à la fois l'environnement, en ce qui concerne les besoins en eau, et l'entreprise qui bénéficient en même temps d'un changement de technologie. Toutefois, les coûts environnementaux sont liés à des besoins énergétiques supplémentaires pour les ventilateurs et la pompe. L'utilisation d'eau dans cet exemple est largement affectée par la perte par évaporation qui a été calculée sur une base de 1,8 % de la circulation par 10 K de refroidissement (voir Annexe V.3).

Cet exemple montre simplement comment approcher les changements de technologie. Avec différents niveaux de prix, le résultat sera complètement différent et pourrait favoriser le système à passage unique. Par exemple, en Italie où les coûts d'électricité sont d'environ 0,05 €/kWh, et les coûts en eau pour un circuit ouvert de 0,01 €/m³ par opposition à 0,1-0,2 €/m³ pour un circuit fermé, les systèmes à circuit ouvert seraient davantage favorables d'un point de vue économique.

Tableau 1.9 : Exemple de conversion d'un système à passage unique en un système à circulation forcée
[tm139, Eurovent, 1998]

Exemple : Compresseur d'air 500 kW	Système à passage unique	Système à circulation forcée
Température d'entrée	15 °C	27 °C
Température de sortie	35 °C	35 °C
Débit	6 l/s	15 l/s
Heures annuelles de fonctionnement	1 800 h	1 800 h
Pertes par évaporation	-	1 400 m ³ /a
Purges de déconcentration	-	700 m ³ /a
Utilisation annuelle d'eau	38 800 m ³ /a	2 100 m ³ /a
Energie du ventilateur et de la pompe supplémentaires	-	15 kW
Coûts d'investissement	-	€ 21 000

Si un changement de la configuration de refroidissement est envisagé, les effets sur l'efficacité globale doivent être pris en compte. Si possible, l'efficacité devrait être augmentée. Pour les procédés sensibles à la température, il faut vérifier si une technologie de refroidissement peut fournir des températures finales moins élevées avec le même niveau de sécurité.

L'exemple du remplacement d'un condenseur refroidi par eau avec une tour de refroidissement ouverte par un condenseur par évaporation a un effet sur la température finale et l'efficacité du système. Un tel remplacement technologique peut potentiellement réduire la température de condensation de 4 à 6 K en fonction des conditions réelles. Le gain d'efficacité peut être estimé de l'ordre de 12 à 15 % des besoins énergétiques du compresseur [tm139, Eurovent, 1998].

Pour les applications sensibles à la température dans la plage de températures moyennes, l'introduction de systèmes hybrides pourrait être favorable, si l'utilisation de l'eau et/ou les coûts d'eau et d'eaux usées doivent être réduits. Généralement, un tel changement n'augmente pas les besoins en électricité, mais peuvent réduire considérablement la consommation annuelle en eau. En fonction des conditions réelles et de la taille requise, les concepts hybrides peuvent nécessiter de l'espace supplémentaire.

1.5.3.3 Remplacement des technologies de transfert thermique désuètes par des technologies modernes

Souvent, un changement de technologie de refroidissement n'est pas approprié pour différentes raisons. Toutefois, une modification de la technologie existante peut également permettre d'obtenir des gains de rendement, de performance, réduire les émissions et les coûts de fonctionnement. Le développement des systèmes d'entraînement d'air, des surfaces de transfert thermique, ainsi que l'utilisation de matériaux de construction plus durables, sont les principales raisons des scénarios de remplacement.

Comme en principe les températures de procédé ne changent pas (même technologie), le principal intérêt de ce scénario est de réduire les ressources opérationnelles et les impacts sur l'environnement ainsi que d'augmenter la durée de vie du matériel. Une augmentation de la durée de vie du matériel de plus de 10 ans peut être obtenue en utilisant de nouveaux matériaux durables. Il est fort probable que tout matériel installé il y a 15 ou 20 ans puisse être remplacé par un matériel moderne ayant une plus grande efficacité opérationnelle et de meilleures performances environnementale et économique.

Un exemple typique de l'amélioration des systèmes de refroidissement à passage unique est l'utilisation d'échangeurs à plaque. Pour les systèmes de refroidissement par évaporation par exemple, les principaux développements ont consisté à améliorer la performance des corps d'échange et des systèmes d'entraînement d'air, permettant des conceptions plus compactes et une meilleure efficacité énergétique. Pour les systèmes de refroidissement par air, de nouvelles technologies pour former les ailettes de différentes manières a permis d'obtenir des résultats similaires. Un exemple des

effets de ce qu'il peut être obtenu sur la consommation d'énergie en appliquant ces techniques plus efficaces est illustré dans le Tableau 1.10. Dans ce cas, le bilan doit être fait entre les coûts d'investissement et les coûts annuels de fonctionnement pour la consommation d'énergie et la maintenance du corps d'échange.

Tableau 1.10 : Exemple de conversion d'une tour de refroidissement obsolète par voie humide à tirage forcé par une conception moderne

[tm139, Eurovent, 1998]

Exemple : Tour de refroidissement humide à tirage forcé	Conception dépassée : concept à tirage forcé avec un corps d'échange peu efficace et un système de ventilation	Conception moderne : concept à tirage induit avec un corps d'échange à haute efficacité et un système de ventilation
Puissance	1200 kW	
Température d'entrée	38 °C	
Température de sortie	28 °C	
Température de bulbe humide	21 °C	
Débit d'eau	28,7 l/s	
Puissance de ventilation requise	7,5 kW	4 kW
Consommation d'énergie pour les ventilateurs	9 MWh/an	4,8 MWh/an
Coûts d'investissement	-	€ 14000

1.5.3.4 Optimisation de la technologie de transfert de chaleur existante

Souvent, il n'est pas nécessaire de remplacer la totalité d'un système de refroidissement. La performance des systèmes de refroidissement existants peut également être améliorée grâce à une mise à niveau technologique (ou surclassement technologique). La plupart des composants ou des accessoires du système sont remplacés ou réparés tandis que l'installation existante reste in situ. Le surclassement technologique peut augmenter l'efficacité du système et réduire l'impact environnemental. Des exemples de mise à niveau sont les nouveaux corps d'échange plus efficaces des tours de refroidissement et l'utilisation de systèmes d'atténuation sonore.

Les exemples dans les Tableaux 1.11 et 1.12 devraient être considérés comme des illustrations simplifiées. Pour une évaluation intégrée des bénéfices sur l'environnement, d'autres facteurs devraient également être pris en compte. Par exemple, avec le remplacement du corps d'échange d'une tour de refroidissement, les coûts environnementaux de l'élimination de l'ancien corps doivent également être inclus.

Tableau 1.11 : Exemple du remplacement d'un corps d'échange désuet d'une tour de refroidissement à tirage forcé par voie humide par un corps moderne à haute efficacité

[tm139, Eurovent, 1998]

Exemple : tour de refroidissement humide à tirage forcé	Corps d'échange désuet	Corps d'échange à haute efficacité
Puissance	3600 kW	
Température d'entrée	38 °C	
Température de sortie	28 °C	
Température de bulbe humide	21 °C	
Débit d'eau	86,1 l/s	
Espace de cellule de surface au sol existant	26 m ²	
Puissance de ventilation requise	22,5 kW	13,5 kW
Consommation d'énergie pour les ventilateurs	81 MWh/an	48,6 MWh/an
Coûts d'investissement	-	€ 29000

Tous les changements n'ont pas que des effets positifs, comme le montre le Tableau 1.12 où une réduction importante du niveau sonore a été atteinte. Toutefois, la réduction du bruit entraîne généralement une baisse de pression qui doit être compensée par une performance plus élevée des ventilateurs. À son tour, elle entraînera une hausse de la

consommation d'énergie directe du système de refroidissement. Le choix d'une moindre consommation d'énergie ou d'un niveau sonore moins élevé dépendra des contraintes locales. Les coûts d'investissement et de maintenance devraient être comparés avec les coûts réduits pour la consommation d'énergie.

La mise à niveau technologique de la stratégie opérationnelle est un autre exemple d'une amélioration efficace. Les cycles on/off des ventilateurs peuvent être modifiés en régulation modulante avec des variateurs de fréquence. Cela peut entraîner des économies significatives d'énergie électrique qui, selon les conditions, peuvent atteindre 70 % ou plus.

Les coûts d'investissement pour la mise à niveau technologique peuvent diverger énormément et dépendent du type de mise à niveau et de l'âge de l'installation existante. L'investissement s'accompagne de coûts de fonctionnement inférieurs résultant d'une plus grande efficacité. Les coûts d'investissement seront généralement inférieurs à ceux impliqués par un changement de technologie ou de remplacement de matériel.

Tableau 1.12 : Exemple d'amélioration de la performance acoustique en utilisant du matériel d'insonorisation [tm139, Eurovent, 1998]

Exemple : tour de refroidissement humide à tirage forcé	Tour de refroidissement humide existante	Mise à niveau avec insonorisation
Puissance	1200 kW	
Température d'entrée	38 °C	
Température de sortie	28 °C	
Température de bulbe humide	21 °C	
Débit d'eau	28,7 l/s	
Puissance de ventilation requise	15 kW	18 kW
Niveau de puissance sonore	90 dB(A)	81 dB(A)
Coûts d'investissement	-	€ 12000

1.6. Considérations économiques

Les coûts font toujours partie des facteurs les plus importants intervenant dans le choix d'un système de refroidissement et peuvent uniquement être évalués au niveau de chaque projet. On distingue trois types importants de coûts :

- les coûts d'investissement,
- les coûts de maintenance,
- les coûts de fonctionnement liés aux besoins en énergie (et en eau),
- les coûts environnementaux tels que les taxes et les coûts d'élimination des déchets.

Les coûts absolus et la relation entre les différents coûts peuvent varier et dépendre du système de refroidissement. Le système de refroidissement impliquant les coûts d'investissement les plus faibles n'est pas nécessairement le système qui requiert les sources de fonctionnement minimales. Les solutions techniques permettant de réduire la consommation de ressources entraînent souvent des coûts d'investissement plus élevés.

Par conséquent, il est important que les considérations économiques ne se limitent pas à de simples comparaisons de coûts d'investissement, mais également aux coûts de fonctionnement d'un système de refroidissement. Pour les centrales de production électrique, les coûts de fonctionnement sont liés à l'efficacité énergétique globale. L'effet financier d'une variation de l'efficacité causé par le choix d'un système de refroidissement différent doit être évalué. En général, pour les centrales électriques, la comparaison entre les différentes solutions se fait en utilisant la méthode technico-économique mentionnée précédemment en utilisant un ratio « actualisé » ou « valorisé » qui peut être différent selon les pays. [tm056, Caudron, 1991].

2. ASPECTS TECHNOLOGIQUES DES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT INDUSTRIELS

2.1. Introduction

Ce chapitre donne une brève description des principes utilisés dans quelques configurations de systèmes de refroidissement dans l'industrie européenne. Dans ces configurations, on trouve un ensemble d'applications qui visent à satisfaire les exigences en termes de procédé, de site ainsi que sur le plan environnemental et économique. La taille et le type d'échangeur de chaleur, le type de ventilateur et les pratiques opérationnelles peuvent également varier. Les différents types de systèmes de refroidissement peuvent être classés selon différents critères. En général, les critères suivants sont cités dans la littérature :

- refroidissement par air sec et refroidissement humides par évaporation : en fonction du principe thermodynamique dominant – respectivement le transfert de chaleur sensible et une combinaison de transfert de chaleur latente et sensible. Dans le refroidissement par évaporation, les deux principes sont combinés, mais l'essentiel de la chaleur est transféré sous forme latente. En cas de refroidissement par voie sèche, seul le transfert de chaleur sensible se produit.
- systèmes ouverts ou fermés : dans un système ouvert, le fluide de procédé ou le fluide de refroidissement est en contact avec l'environnement ; dans un système fermé, le fluide de procédé ou le fluide de refroidissement circule dans les tubes, serpentins et conduites et n'entre jamais en contact avec l'environnement.
- systèmes directs ou indirects : dans un système direct, il y a un seul échangeur de chaleur où le fluide de refroidissement et le fluide à refroidir échangent de la chaleur ; dans un système indirect, il y a au moins deux échangeurs de chaleur et un circuit de refroidissement secondaire fermé entre le procédé ou le fluide à refroidir et le fluide de refroidissement primaire. Du fait de la présence de l'échangeur de chaleur supplémentaire, les systèmes indirects ont une approche plus élevée (environ 5 K). Les systèmes directs et indirects sont également connus sous le nom de systèmes primaires et secondaires. En principe, chaque système de refroidissement direct peut être transformé en système indirect ; cette option sera envisagée dans des situations où des fuites du fluide de procédé pourraient menacer l'environnement.

Les systèmes de refroidissement à contact direct (à ne pas confondre avec les systèmes directs/indirects) ne sont pas présentés dans ce BREF, car leurs caractéristiques dépendent fortement du procédé industriel auquel ils sont appliqués (par exemple, acier formé à chaud). Un autre type de refroidissement est un système à passage unique avec des condenseurs barométriques, où un flux de gaz est refroidi directement par une dose d'eau. On les trouve dans l'industrie agroalimentaire. Ces systèmes ne sont pas décrits dans ce document : il s'agit soit de systèmes utilisant des techniques de vide, soit des fluides frigorigènes spécifiques tels que les HCFC.

Dans la pratique, plusieurs noms sont utilisés pour désigner le matériel de refroidissement et les configurations de refroidissement que l'on trouve en Europe et ailleurs. La nomenclature est souvent liée à l'objectif de l'application et, dans les sites de production électriques, la typologie se réfère aux procédés de condensation (voir Annexe XII). En général, la liste suivante des systèmes habituellement utilisés dans l'industrie européenne obéit aux principes énoncés précédemment.

- systèmes à passage unique (avec ou sans tour de refroidissement)
- systèmes aéroréfrigérants ouverts (tours de refroidissement par voie humide)
- systèmes de refroidissement en circuit fermé
 - systèmes de refroidissement par air
 - systèmes de refroidissement en circuit fermé par voie humide
- systèmes de refroidissement combinés par voie sèche/humide (hybride)
 - tours hybrides ouvertes
 - tours hybrides fermées

Pour les systèmes aéroréfrigérants fermés, on peut distinguer les petites applications pré-assemblées et les applications plus grandes sur mesure qui sont construites ou assemblées sur site.

En général, les systèmes à passage unique et les tours ouvertes sont utilisés dans les grandes installations de l'industrie de production électrique et la pétrochimie.

Le terme « tour » s’applique à la fois aux constructions à virole (par exemple, les grandes tours à tirage naturelle) et aux constructions modulaires qui peuvent être petites et que l’on trouve dans des applications en toiture.

À titre de comparaison, certaines caractéristiques techniques et thermodynamiques des systèmes de refroidissement les plus répandus sont décrites dans le Tableau 2.1. Ces données sont un exemple provenant de plusieurs hypothèses (voir légende du tableau). Il est important de tenir compte du fait que les approches peuvent varier et dépendent énormément de la conception de l’échangeur de chaleur et de la température de l’air ambiant. Les températures finales minimales du fluide de procédé varieront en conséquence. Pour les centrales de production électrique, l’approche se calcule différemment (voir l’Annexe I).

Tableau 2.1 : Exemple de caractéristiques techniques et thermodynamiques des différents systèmes de refroidissement pour des applications industrielles (autres que des centrales électriques)

[tm139, Eurovent, 1998]

Système de refroidissement	Fluide de refroidissement	Principale technique de refroidissement	Approches minimales (K) ⁴⁾	Température minimale possible du fluide de procédé ⁵⁾ (°C)	Puissance du procédé industriel (en MW _{th})
Système ouvert direct à passage unique	Eau	Conduction / Convection	3 – 5	18 – 20	<0,01 - > 2000
Système ouvert indirecte à passage unique	Eau	Conduction / Convection	6 – 10	21 – 25	<0,01 - > 1000
Tour ouverte humide - système direct	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation ³⁾	6 – 10	27 – 31	< 0,1 - >2000
Tour ouverte humide - système indirect	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation ³⁾	9 – 15	30 – 36	< 0,1 - > 200
Tour humide fermée	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation + convection	7 – 14 ⁷⁾	28 – 35	0,2 – 10
Tour sèche fermée	Air.	Convection	10 – 15	40 – 45	< 0,1 – 100
Système hybride ouvert	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation + convection	7 – 14	28 – 35	0,15 - 2,5 ⁶⁾
Système hybride fermé	Eau ¹⁾ Air ²⁾	Évaporation + convection	7 – 14	28 – 35	0,15 - 2,5 ⁶⁾

Note :

1. L’eau est l’agent de refroidissement secondaire en grande partie recyclé. L’évaporation de l’eau transfère la chaleur dans l’air.
2. L’air est le moyen de refroidissement dans lequel la chaleur est transférée dans l’environnement.
3. L’évaporation est le principal moyen de refroidissement. La chaleur est également transférée par conduction/convection, mais avec un ratio moins important.
4. Les approches de l’échangeur de chaleur et de la tour de refroidissement doivent être ajoutées.
5. Les températures finales dépendent du climat du site (les données s’appliquent à un climat européen tempéré avec une température de bulbe humide/sec de 30°/21° et une température maximale de l’eau de 15°C.
6. La puissance des petites unités – avec une combinaison de plusieurs unités ou des systèmes de refroidissement sur mesure, des puissances plus élevées peuvent être obtenues.
7. Lorsqu’un système indirect est utilisé ou que la convection est également impliquée, l’approche dans ce cas augmente de 3-5K et entraîne une température de procédé plus élevée.

L’exemple du Tableau 2.1 montre que les configurations ont différentes plages de températures et que la plage de température souhaitée pour un procédé peut nécessiter une configuration particulière. Pour une question d’espace et de coût, les systèmes de refroidissement par air sec ne sont généralement pas utilisés pour les capacités très importantes, alors que le refroidissement par eau peut être utilisé pour évacuer jusqu’à 2 000 MW_{th} de chaleur voire plus.

Pour les condenseurs, les approches sont plus élevées. L’approche pour les systèmes à passage unique correspond à la somme de la « différence terminale » et de la hausse de température de l’eau de refroidissement. Le terme « différence terminale » désigne l’écart de température entre la température de la vapeur entrant dans le condenseur (ou de la vapeur

condensée quittant le condenseur) et la température du fluide de refroidissement (eau) quittant le condenseur. Les valeurs vont de 3 à 5 K. Les données applicables sont présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Exemples de puissance et caractéristiques thermodynamiques des différents systèmes de refroidissement pour des applications dans l'industrie de production électrique

[Note EDF/[tm056, Caudron, 1991][tm056, Caudron, 1991][tm056, Caudron, 1991]]

Système de refroidissement	Approches appliquées (K)	Puissance du procédé de production d'électricité (en MW _{th})
Systèmes ouverts à passage unique	13 -20 (différence terminale 3 -5)	< 2700
Tour humide ouverte	7-15	< 2700
Tour hybride ouverte	15-20	< 2500
Condenseur à air en régime sec	15-25	< 900

Ce chapitre donne un aperçu des systèmes de refroidissement industriels les plus courants et identifie les aspects environnementaux qui s'y rattachent. Un complément d'information sur les échangeurs de chaleur et les matériaux est disponible dans les Annexes III et V, ainsi que dans les documents listés en référence. Dans les paragraphes suivants, les termes techniques utilisés sont ceux que l'on trouve le plus souvent dans la documentation spécialisée. Pour vous aider à trouver les bonnes références, une indication vous sera donnée lorsque d'autres termes sont également utilisés.

2.2. Échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont les éléments de transfert de chaleur les plus importants car ils font à la fois partie du procédé à refroidir et du système de refroidissement. Après l'échangeur de chaleur, différents systèmes sont utilisés pour rejeter la chaleur dans l'environnement. Deux types d'échangeurs de chaleur sont couramment utilisés : le type tube et calandre (le plus courant) et à plaques et joints.

2.2.1 Échangeurs de chaleur tube et calandre

De nombreuses expériences ont été conduites avec ce type d'échangeur de chaleur dans l'industrie, et ont prouvé la fiabilité de ces équipements. Il existe différentes conceptions, avec des tubes droits ou en forme de U, ou avec un échangeur de chaleur spécifiquement conçu pour des conditions de pression élevées, des températures élevées, le fonctionnement avec de la vapeur ou avec des fluides thermiques. En principe, les tubes contiennent l'eau de refroidissement, et le fluide de procédé se déplace autour des tubes dans la calandre. Pour en savoir plus sur les échangeurs de chaleur à tubes et calandre, reportez-vous à l'Annexe II.

2.2.2 Échangeurs de chaleur à plaques et joints

Les échangeurs de chaleur à plaques et joints sont de plus en plus utilisés pour un ensemble d'applications dans les raffineries de sucre, l'industrie pétrochimique et les centrales électriques. Ils sont particulièrement adaptés pour être utilisés à une approche plus faible ainsi que dans les applications froides (<0°C). Toutefois, ces échangeurs sont moins adaptés pour refroidir la vapeur et les volumes de gaz élevés, et dans les situations présentant un risque de sédimentation et/ou d'encrassement et pour les différences de pression élevées entre le fluide de procédé et le fluide de refroidissement. Certaines conceptions ont une double enveloppe permettant de garantir un fonctionnement sans fuites, mais semblent très difficiles à gérer. Les échangeurs de chaleur à plaques et joints sont économiques car ils sont beaucoup plus compacts que ceux à tubes et calandre, à surface d'échange équivalente.

2.2.3 Problèmes environnementaux liés aux échangeurs de chaleur

D'un point de vue environnemental, les problèmes suivants sont importants pour les deux types d'échangeurs de chaleur :

- une conception adéquate pour un échange de chaleur efficace ;
- une construction adaptée pour prévenir les fuites du fluide de procédé dans le réfrigérant;

- le choix des matériaux pour l'efficacité du transfert de chaleur, pour la résistance à la corrosion dans l'eau et à la corrosion liée au fluide de procédé ;
- la possibilité d'utiliser des dispositifs de nettoyage mécanique.

2.3. Systèmes de refroidissement à passage unique

2.3.1 Systèmes de refroidissement directs à passage unique

Description technique

Dans les systèmes à passage unique directs, l'eau est pompée dans une source (rivière, lac, mer ou estuaire) et apportée directement dans le process via d'importantes conduites. Après son passage dans les échangeurs de chaleur ou dans les condenseurs, l'eau réchauffée est rejetée directement dans l'eau de surface. La chaleur est transférée du process vers le réfrigérant à travers les parois, dans un échangeur de chaleur de type tubes et calandre ou de type plaques et joints. Les systèmes à passage unique sont désignés par plusieurs noms [tm010, Betz, 1991].

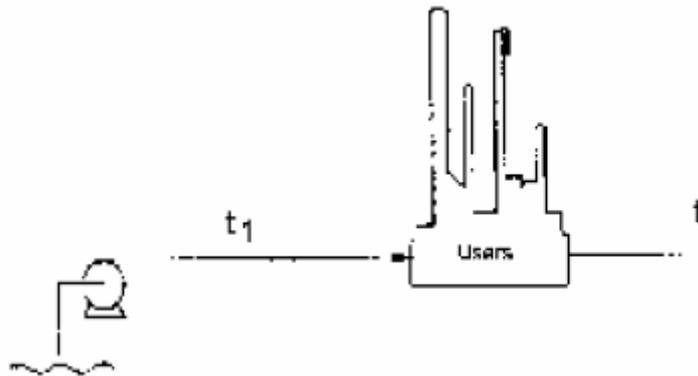


Figure 2.1 : Illustration schématique d'un système de refroidissement à passage unique

[tm001, Bloemkolk, 1997]

Puissance de refroidissement

Les systèmes à passage unique sont essentiellement conçus pour de grosses puissances de refroidissement ($>1\ 000\ \text{MW}_{\text{th}}$), mais peuvent également être conçus pour de petits systèmes ($< 10\ \text{kW}_{\text{th}}$). Les flux d'eaux habituels pour refroidir $1\ \text{MW}_{\text{th}}$, pour les grosses installations de production d'énergie, vont de $0,02\ \text{m}^3/\text{s}$ ($\Delta T = 12\text{K}$) à $0,034\ \text{m}^3/\text{s}$ ($\Delta T = 7\text{K}$). Avec le refroidissement à passage unique, on peut obtenir de faibles températures finales avec une approche correspondante de 3 à 5K.

Aspects environnementaux

Pour les systèmes à passage unique, les principaux aspects environnementaux mentionnés sont :

- l'utilisation de grandes quantités d'eau,
- les émissions de chaleur,
- le risque d'entraînement de poissons,
- la sensibilité au bio-encrassement, à l'entartrage et à l'érosion,
- l'utilisation d'additifs et les émissions dans l'eau qui en résultent,
- la consommation d'énergie, essentiellement pour les pompes,
- le risque de fuite provenant du flux du procédé, et
- l'ensablement des tamis au niveau de la prise d'eau.

Application

Les systèmes à passage unique sont utilisés par les procédés industriels importants tels que la production d'électricité, l'industrie chimique et les raffineries. L'eau utilisée pour le refroidissement à passage unique est essentiellement de l'eau de surface. Pour les utilisations à plus petite échelle telles que le refroidissement de pompe, l'eau du robinet ou les eaux souterraines sont également utilisées. Une source d'eau fiable à proximité du site et à une température idéalement faible est une condition essentielle pour les systèmes à passage unique. La qualité de l'eau de surface et les limites d'écoulement peuvent également affecter l'applicabilité, mais en général la qualité de l'eau et sa chimie sont moins restrictives que dans le cas de systèmes fermés. [tm005, Van Donk and Jenner, 1996]

2.3.2 Systèmes de refroidissement à passage unique avec tour de refroidissement

Puisque le procédé de génération d'électricité fonctionne dans des conditions sous vide, toute fuite dans le condenseur d'une centrale électrique entraîne généralement la pollution de l'eau du procédé par l'eau du circuit de refroidissement. Sur certains sites, les systèmes à passage unique peuvent être associés à une tour de refroidissement pour pré-refroidir les rejets avant de les renvoyer dans l'eau de surface de réception. Cette configuration est utilisée dans des situations où l'eau de refroidissement peut recirculer et pourrait atteindre la température d'entrée de l'eau de refroidissement dans la même installation ou dans d'autres industries. La capacité de la rivière, le mouvement des marées, la taille de l'installation et la température de l'eau de surface sont également des facteurs. Ce type de pré-refroidissement est utilisé dans les centrales électriques côtières (estuariennes) et à l'intérieur des terres au bord des fleuves.

Les aspects environnementaux des tours de refroidissement ouvertes par voie humide s'appliqueront à ces systèmes de refroidissement. La croissance biologique et les dépôts doivent être pris en compte lorsqu'on choisit le corps d'échange des tours de refroidissement. En général, les tours de refroidissement avec un système de dispersion ou d'éclaboussement sont utilisées.

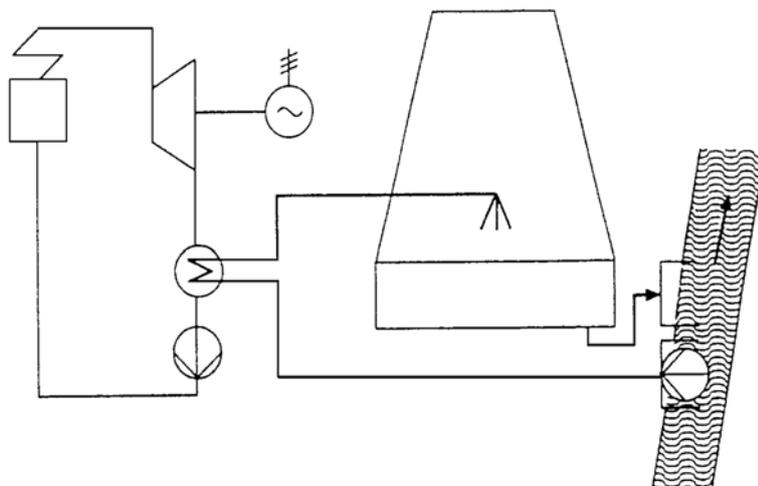


Figure 2.2 : Illustration schématique d'un système de refroidissement direct à passage unique avec tour de refroidissement utilisé dans l'industrie électrique

[tm132, Eurelectric, 1998]

2.3.3 Systèmes de refroidissement indirects à passage unique

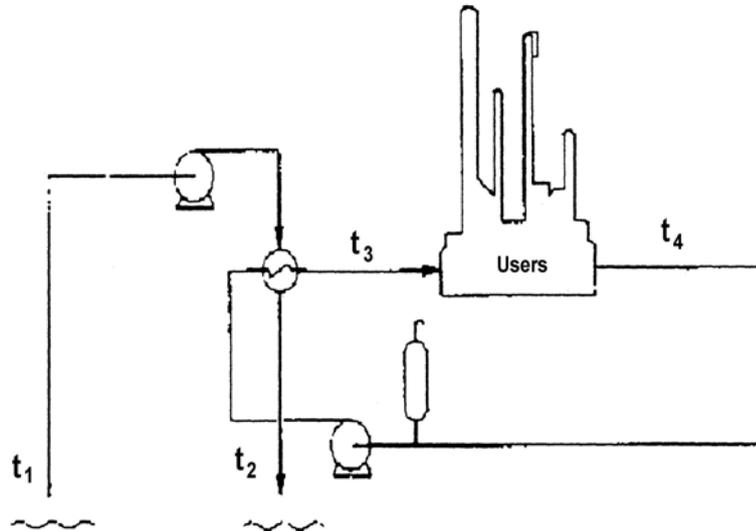


Figure 2.3 : Illustration schématique d'un système de refroidissement indirect à passage unique
[tm001, Bloemkolk, 1997]

Description technique

Cette configuration de refroidissement est identique à celle du système direct à passage unique, mais elle est indirecte car il n'y a pas de transfert direct du fluide de procédé/vapeur vers le réfrigérant qui est rejeté. Dans ce type de système, l'expression de système de refroidissement secondaire est également employée. La chaleur est transférée du fluide de procédé ou du produit vers un fluide de refroidissement qui circule dans un circuit fermé (t_3 et t_4). Le réfrigérant dans ce circuit de refroidissement secondaire transfère sa chaleur via les échangeurs de chaleur vers le réfrigérant (par exemple, de l'eau de surface) qui passe par les échangeurs de chaleur une seule fois, ainsi appelée eau de refroidissement primaire (t_1 et t_2). L'eau est directement rejetée dans l'eau de surface, tandis que le fluide de refroidissement secondaire reste dans le circuit fermé.

Puissance de refroidissement

On peut obtenir des températures finales basses identiques avec un refroidissement indirect par voie humide, mais en raison de la présence d'un échangeur de chaleur supplémentaire, l'approche peut augmenter de 3 à 5 K, en fonction de l'efficacité de l'échangeur de chaleur.

Aspects environnementaux

Voir aussi système direct à passage unique. La conception implique que le risque de décharge des fuites des fluides de procédé dans l'eau de surface est minimal ou nul.

Application

Le système de refroidissement indirect à passage unique est utilisé lorsqu'il y a un risque élevé de fuites de fluides de procédé dans l'eau de refroidissement. La disponibilité et la qualité de l'eau de surface sont également importantes pour ce système de refroidissement. Ce système crée également une charge thermique dans l'eau de surface de réception. Une variante du système indirect à passage unique consiste à recycler une partie de l'eau du circuit primaire. Cette partie est refroidie par de l'air avant d'être mélangée avec la nouvelle eau de refroidissement entrante. Cette capacité de refroidissement supplémentaire peut être utilisée à des périodes de l'année où l'eau de refroidissement n'est pas disponible en quantité suffisante.

En général, du fait de la présence de l'échangeur de chaleur supplémentaire (donc une approche plus élevée), les températures finales de procédé qui peuvent être atteintes ne sont pas aussi basses qu'avec un refroidissement direct à passage unique.

2.4. Tours aéroréfrigérantes ouvertes

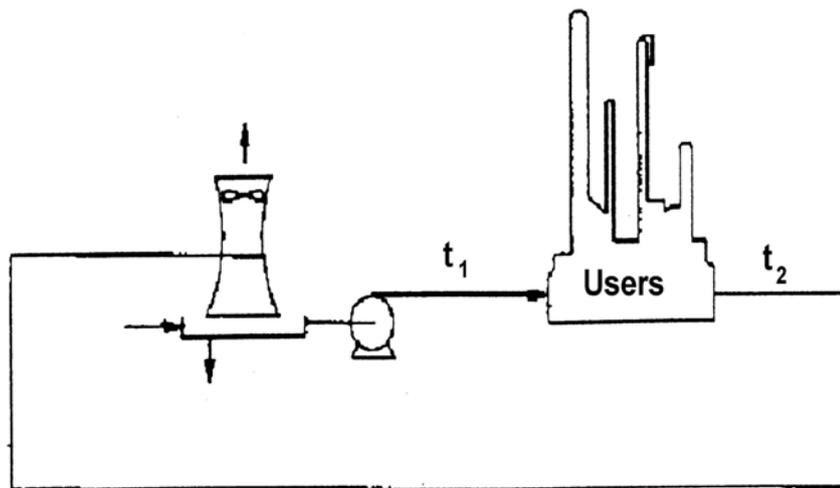


Figure 2.4 : Illustration schématique d'un système ouvert aéroréfrigérant
[tm001, Bloemkolk, 1997]

Description technique

Les tours aéroréfrigérantes ouvertes sont également appelées systèmes de refroidissement évaporatifs ouverts. Dans ce type de système, l'eau de refroidissement qui traverse l'échangeur de chaleur est refroidie dans une tour de refroidissement où l'essentiel de la chaleur sera rejeté dans l'environnement. Dans la tour de refroidissement, l'eau chauffée est dispersée sur le corps de refroidissement de la tour, puis est refroidie par contact avec de l'air, et est collectée dans un réservoir. Après quoi elle sera pompée de nouveau vers la source de chaleur pour être réutilisée en tant que réfrigérant. Le mouvement de l'air est créé naturellement, ou à l'aide de ventilateurs qui poussent/aspirent l'air dans la tour. Le refroidissement de l'eau est le résultat de l'évaporation d'une petite partie de l'eau et de la perte de chaleur sensible par refroidissement direct de l'eau par l'air, également appelé convection. Les températures de bulbe humide et sec influencent largement le niveau auquel ces systèmes peuvent fonctionner.

Une grande partie de l'eau (pas toute) qui est refroidie dans la tour recircule et peut être utilisée à nouveau comme eau de refroidissement. Les principales causes de perte d'eau sont l'évaporation, l'extraction (entraînement vésiculaire, purge (déconcentration intentionnelle)) et les fuites. La purge de déconcentration intentionnelle est le drainage de l'eau du circuit qui permet d'éviter l'épaississement de l'eau de refroidissement (Annexe VI). Pour compenser la purge de déconcentration et l'évaporation, on ajoute de l'eau, appelée eau d'appoint. En général, le flux d'eau d'appoint utilisé par un système ouvert aéroréfrigérant représente entre 1 et 3 % du flux d'un système à passage unique ayant la même puissance de refroidissement. Pour l'industrie de production électrique, il peut être de 1 à 5 %. Cela correspond à un besoin d'environ « 0,25 % x plage de refroidissement » qui est la quantité d'eau d'appoint exprimée sous forme de pourcentage du flux d'eau circulant. La purge représente en général entre 0,15 et 0,80 m³/s par tranche de 1 000 MW_{th} refroidi (la demi-vie de l'eau varie entre un et quatre jours). Ce système nécessite des quantités d'eau disponibles suffisantes toute l'année et, en général, un traitement de l'eau de refroidissement s'avère nécessaire.

Puissance de refroidissement

Les systèmes aéroréfrigérants ouverts sont principalement utilisés pour les applications industrielles ayant une puissance thermique comprise entre 1 et 100 MW_{th}, mais également pour les centrales électriques ayant des puissances plus importantes. Ces systèmes sont surtout utilisés à l'intérieur des terres où la quantité d'eau disponible reste insuffisante, ou lorsque aucune hausse supplémentaire de la température de l'eau de réception n'est acceptable, une situation que l'on trouve au bord des rivières avec de faibles débits au cours des mois d'été [tm005, Van Donk and Jenner, 1996]. Les tours de refroidissement par voie humide transfèrent dans l'atmosphère environ 80 % de la chaleur résiduelle sous forme de chaleur latente (vapeur d'eau) et environ 20 % par chaleur sensible [tm132, Eurelectric, 1998].

Des approches de 4K sont techniquement et économiquement réalisables entre 15 et 30°C. Les approches et les températures finales minimales dépendent des conditions climatiques sur site.

Aspects environnementaux

Les aspects environnementaux des systèmes à circulation forcée dépendent notamment du type de tour de refroidissement et de la façon dont elle fonctionne. Ce sont :

- les additifs dans l'eau de refroidissement et leurs émissions via les purges vers l'eau de surface,
- l'utilisation d'énergie pour les pompes et les ventilateurs,
- les émissions dans l'air,
- la formation de panache, la condensation et la formation de glace,
- le bruit,
- les déchets liés au remplacement du remplissage des tours de refroidissement
- les aspects sanitaires pour l'homme.

Application

Les systèmes à circulation forcée sont utilisés dans une vaste gamme de procédé. Une caractéristique est la réduction de la charge thermique vers un cours d'eau de réception, en faisant passer une partie de la chaleur résiduelle de l'eau de surface vers l'air. Une autre caractéristique est la réduction de la quantité d'eau utilisée pour le refroidissement. Une pratique commune consiste toutefois à transformer les systèmes de refroidissement à passage unique en systèmes de refroidissement évaporatifs ouverts par évaporation en utilisant une ou plusieurs tours de refroidissement.

Les configurations aérorefrigérantes ouvertes sont :

- les tours de refroidissement ouvertes par voie humide
- les tours de refroidissement ouvertes hybrides (humide/sèche)

2.4.1 Tours de refroidissement par voie humide à tirage naturel

Construction

Aujourd'hui, les grosses tours sont circulaires et sont en béton armé. Les constructions ont essentiellement des profils hyperboliques présentant des avantages sur les aspects thermodynamiques et statiques. Les coûts d'investissement sont élevés, tandis que les coûts d'exploitation sont comparativement faibles. Les tours de refroidissement à tirage naturel par voie humide sont généralement utilisées pour les centrales électriques et les installations industrielles de grandes tailles.

Système de distribution d'eau

L'eau qui revient de l'échangeur de chaleur est apportée dans la tour grâce à un système de distribution d'eau. Ce système crée de fines gouttelettes ou un film d'eau. La distribution uniforme améliore l'échange de chaleur. Des options sont proposées pour le fonctionnement partiel du système de distribution d'eau, afin de réduire si besoin la puissance de refroidissement. De plus, des modes de fonctionnement hivernaux sont proposés, se basant sur le préchauffage de l'air de refroidissement.

Corps d'échange de la tour de refroidissement

Le corps d'échange est la partie importante de la tour ouverte, créant la surface de contact pour l'échange de chaleur de l'eau vers l'air. Il peut s'agir d'un échangeur sur lequel les gouttelettes d'eau s'écoulent en formant un film, ou sur lequel l'eau s'éclate en gouttes successives. L'échangeur de type film se compose habituellement d'un empilement de parois ondulées et verticales ou de parois en matériaux organiques, qui entraînent l'eau à travers la tour dans un film très mince. Ce corps est très efficace et peut être utilisé dans de nombreuses des applications. Quelques types peuvent nécessiter une certaine qualité d'eau car ils sont susceptibles de s'encrasser.

Le corps de type gouttes peut se trouver dans différentes configurations et peut être conçu dans différents matériaux (par exemple, le bois). Ce type de corps a une efficacité bien inférieure à celle de type film, mais il est plus particulièrement utilisé dans des situations où l'eau est fortement contaminée ou de faible qualité, ou lorsque l'échangeur de type film aurait des problèmes en raison d'une surface contaminée. Lorsque la teneur en particules en suspension est élevée, des parois fibrociment sont également utilisées.

Pare-gouttelettes

Pour économiser de l'eau, des pare-gouttelettes sont installés au dessus des distributeurs à eau pour empêcher que les gouttelettes d'eau ne soient entraînées par le débit d'air. De nos jours, les pare-gouttelettes se composent de plusieurs matériaux, tels que le plastique ou le fibrociment ; ils sont conçus de sorte à minimiser les pertes de charge.

Caractéristiques des tours de refroidissement à tirage naturel par voie humide :

- le débit d'air est le résultat des différences de densité de l'air et de la forme de la tour, comme dans la construction d'une cheminée ;
- la hauteur est considérable (80-200 m) ; [la hauteur de construction est un obstacle pour les gens, l'aviation, les transmissions électroniques et les panaches] ;
- il n'y a aucun besoin énergétique pour les ventilateurs, sauf s'ils y a une assistance par des ventilateurs, ce qui permet des hauteurs moins élevées ;
- elles sont conçues avec un corps d'échange interne à contre-courant, ou un échangeur externe à courants croisés (voir Figure 2.5 et Figure 2.6) ;
- elles requièrent un fonctionnement en base, c'est-à-dire une tour qui fonctionne pendant plus de 60 % de l'année ;
- elles sont généralement utilisées pour une puissance thermique rejetée de plus de 200 MW_{th} (installations importantes de type centrale électrique ou usine chimique) ;
- elles offrent la possibilité pour les émissions de gaz de combustion désulfurés d'utiliser la tour de refroidissement comme une cheminée, ce qui permet d'éviter de devoir réchauffer les gaz de combustion, nécessaire pour des raisons environnementales.



Figure 2.5 : Tour de refroidissement à tirage naturel à contre-courant
[tm103, BDAG, 1996]

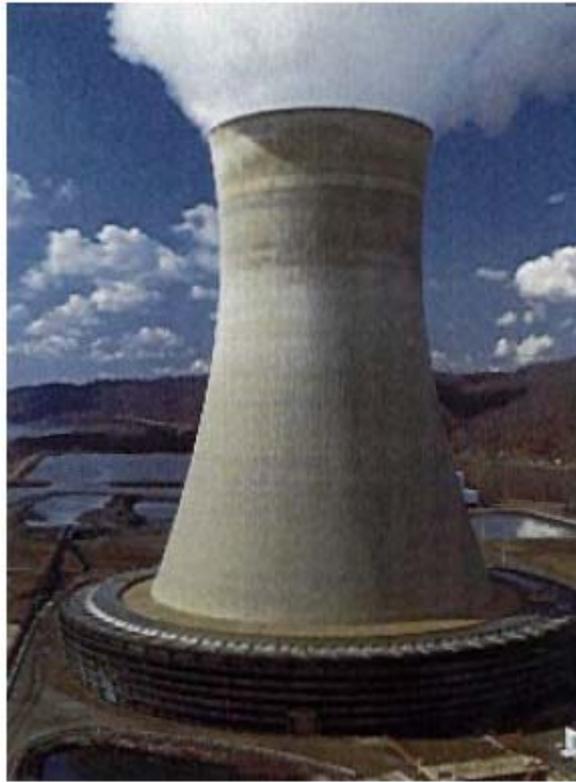


Figure 2.6 : Tour de refroidissement à tirage naturel à courants croisés
[tm010, Betz, 1991]

2.4.2 Tours de refroidissement par voie humide à tirage mécanique

Construction

Les tours de refroidissement à tirage mécanique sont utilisées dans différents types de construction. Une large variété de matériaux est utilisée pour la construction de ces tours de refroidissement en fonction de la taille, du type et des contraintes liées à l'emplacement, la durée de vie et les dépenses en capital. Les plus grosses peuvent être en béton armé, les plus petites peuvent varier considérablement, mais elles utilisent surtout des matériaux synthétiques, de la tôle d'acier, des constructions gainées d'acier et du béton coulé sur place ou préfabriqué. Pour les tours relativement petites (5 MW_{th}), le bois de construction est encore utilisé. Il est économique, peut être utilisé pour la construction toute l'année et peut permettre d'édifier plus rapidement que les tours en béton.

On peut également utiliser un système modulaire, à savoir plusieurs tours en parallèle dans la même structure de béton. Ainsi, le système peut fonctionner de la façon la plus économique possible, en choisissant le nombre d'éléments en fonctionnement, en fonction des conditions ambiantes et de la quantité de chaleur.

Les matériaux, le type de construction et la conception affectent la performance environnementale de la tour de refroidissement. Par référence à la forme, la taille ou la marque, plusieurs noms sont utilisés dans la littérature pour décrire l'utilisation et l'application de ces tours. Par exemple, les tours de refroidissement circulaires et les tours de refroidissement cellulaires peuvent être à tirage naturel ou induit.

La conception des systèmes de **distribution de l'eau, des corps d'échange et des pare-gouttelettes** peuvent être différents de celles d'une tour de refroidissement à tirage naturel, mais les principes de fonctionnement sont identiques.

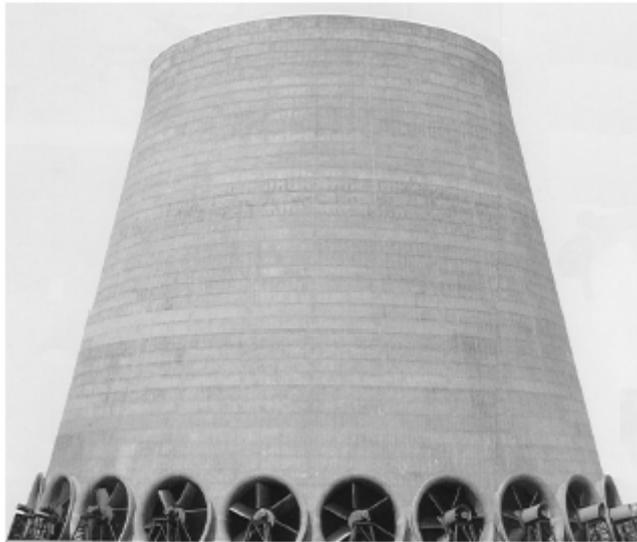


Figure 2.7 : Tour de refroidissement à tirage naturel, assistée par ventilateur
[tm103, BDAG, 1996]

Ventilateurs

Les tours de refroidissement à ventilation mécanique utilisent des ventilateurs pour créer le débit d'air et peuvent par conséquent être plus petites que les grandes tours à tirage naturel. Un grand nombre de types de ventilateurs sont utilisés dans ce type de tours (quelles soient par voie sèche, humide ou hybride). Selon les besoins, les ventilateurs ont des diamètres, des tailles de lames et des positions différentes (radiales ou axiales). De plus, leur fonctionnement à une vitesse ou à plusieurs vitesses confère une grande flexibilité. Le choix du type de ventilateur et des moteurs affecteront la consommation énergétique et le niveau d'émission sonore de la tour de refroidissement. En fonction de la façon dont le débit d'air est créé, il faut distinguer les tours à tirage forcé et les tours à tirage induit.

La tour à tirage assisté est une conception spéciale utilisée dans de nombreux cas où la situation locale impose de construire une tour plus basse.

2.4.2.1 Tours de refroidissement à tirage forcé par voie humide

Caractéristiques de la tour de refroidissement à tirage forcé :

- les ventilateurs à la base de la tour de refroidissement envoient l'air dans la tour ;
- la performance thermique est ajustable en plusieurs étapes ou en modulant ;
- les conceptions à un ou plusieurs ventilateurs sont utilisées ;
- la taille de la tour de refroidissement est limitée, elle nécessite moins d'espace qu'une tour à tirage naturel ;
- la tour peut être adaptée au terrain environnant (installation sur le toit) ;
- la consommation directe d'énergie est supposée faible ;
- elle est en principe conçue en contre-courant ;
- elle peut être conçue pour une large gamme d'applications ; pour les pointes de charge à rejets thermiques élevés, et des charges de base aux charges moyennes en opération standard ;
- elle est utilisée pour des puissances évacuées de moins de 100 kW_{th} à plus de 100 MW_{th} environ ;
- l'investissement en capital est faible par rapport à celui des tours à tirage naturel ;
- lorsqu'on utilise des tours de refroidissement à tirage mécanique, il faut respecter les réglementations relatives aux émissions sonores, à l'humidité (panache) et aux bactéries.

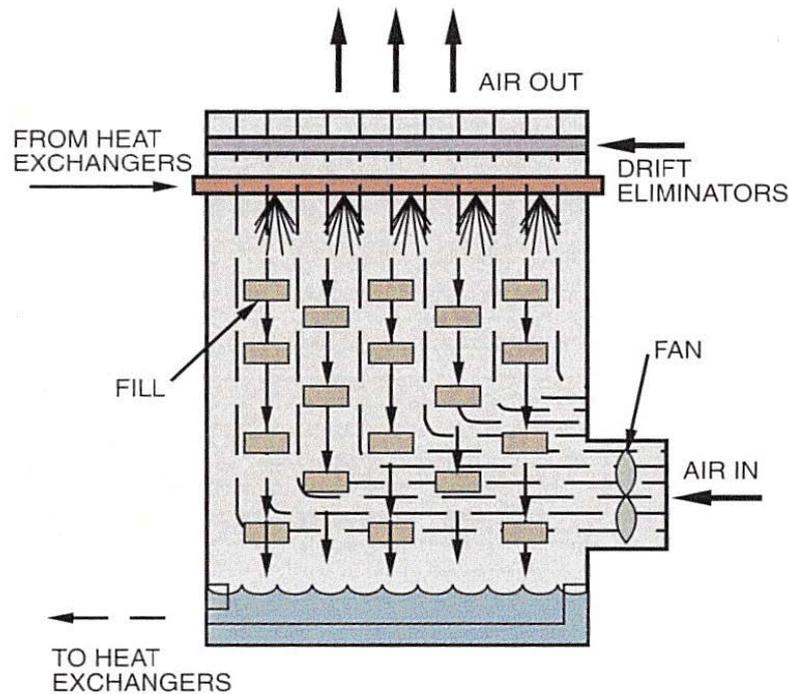


Figure 2.8 : Illustration schématique d'une tour à tirage forcé à contre-courant
[tm010, Betz, 1991]

2.4.2.2 Tours de refroidissement à tirage induit par voie humide

Caractéristiques de la tour de refroidissement à tirage induit :

- les ventilateurs au sommet de la tour de refroidissement aspirent l'air dans la tour ;
- la performance thermique est contrôlable dans les limites définies ;
- une construction relativement simple est souhaitable (éléments préfabriqués, produits pré-assemblés) ;
- la taille de la tour est limitée ; elle nécessite moins d'espace qu'une tour à tirage naturel ;
- la puissance de refroidissement peut être augmentée en travaillant avec plusieurs sections ;
- la tour peut être adaptée au terrain environnant (construction sur le toit) ;
- la consommation directe d'énergie est supposée faible ;
- elle est conçue en contre-courant ou flux croisés ;
- elle est utilisée pour une large gamme d'applications : pour les pointes de charge à rejets thermiques élevés, et des charges de base aux charges moyennes en opération standard Elle s'applique pour une puissance évacuée d'au moins 100 MW_{th} ;
- l'investissement en capital est faible par rapport à celui des tours à tirage naturel ;
- lorsqu'on utilise des tours de refroidissement à tirage mécanique, il faut respecter les réglementations relatives aux émissions sonores, à l'humidité (panache) et aux bactéries.

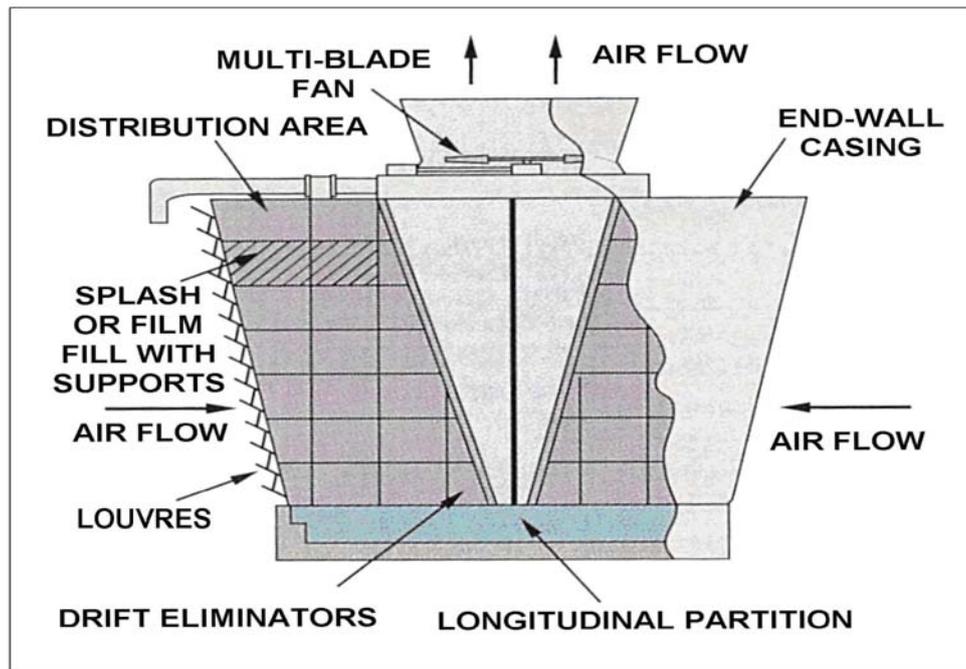


Figure 2.9 : Illustration schématique d'une tour de refroidissement à tirage induit de type cellulaire, en flux croisés

[tm010, Betz, 1991]

2.5. Systèmes de refroidissement en circuit fermé

2.5.1 Systèmes de refroidissement à l'air

Dans les systèmes de refroidissement à l'air (ou systèmes de refroidissement par voie sèche), la substance (fluide, vapeur) circule dans des serpentins, tubes ou conduites qui sont refroidis par un flux d'air. En général, le refroidissement par air sec est utilisé pour les applications suivantes :

- le refroidissement d'un agent d'à peu près n'importe quelle composition chimique peut être utilisé, nécessitant seulement un matériau approprié pour l'échangeur de chaleur;
- dans des situations où l'eau d'appoint de la tour de refroidissement n'est pas disponible ou pour une courte période uniquement ;
- lorsque la formation de panache n'est pas autorisée.

Description technique

En fonction de l'application, les systèmes de refroidissement par air en circuit fermé se composent d'éléments tubulaires (à ailettes), de serpentins ou de conduits d'un condenseur, de ventilateurs à moteurs et d'une structure en acier ou d'une tour. Le fluide de procédé lui-même ou un fluide de refroidissement (système indirect) circule dans les tubes. Un flux d'air est créé, naturellement ou par les ventilateurs. Il circule entre les tubes en refroidissant donc le fluide par conduction et convection. Dans la plupart des cas, le flux d'air circule en diagonale à travers l'échangeur de chaleur. Le fluide de procédé passe dans l'échangeur de chaleur dans une configuration à passage unique ou en plusieurs passes.

Le fluide de procédé est un fluide, le système de refroidissement est appelé un refroidisseur de fluide refroidi à l'air. Si une vapeur (gaz ou réfrigérant) est directement refroidie pour condenser le liquide, le système de refroidissement est appelé un condenseur refroidi par air. L'application peut être une associée aux conceptions de tours à tirage mécanique ou naturel.

Une grande variété de matériaux résistants à la corrosion est utilisée pour leur fabrication. Les options de fabrication sont nombreuses. Les systèmes de refroidissement par air peuvent se trouver sous forme de grosses unités indépendantes ou de petites unités sur toiture. Ils peuvent être horizontaux, rectangulaires de type toiture, verticaux ou en V pour s'adapter aux exigences de configuration de l'installation.

Puissance de refroidissement

Dans la pratique, le refroidissement par air est souvent utilisé pour refroidir les fluides de procédé ayant une température élevée ($>80^{\circ}\text{C}$) jusqu'à un niveau auquel le refroidissement par eau sera plus approprié. L'intensité de l'échange de chaleur est liée à la différence de température entre l'air de refroidissement et le fluide de procédé. La température maximale de conception de l'air de refroidissement ne devrait, en pratique, être dépassée que quelques heures par an. La température de conception dépend de la température de bulbe sec, et les conditions climatiques sont très importantes.

Étant donné que la capacité thermique de l'air est faible ($1,0 \text{ kJ/kg.K}$) et que le coefficient de conduction et de convection est faible, il faut une plus grande quantité d'air et une surface d'échange thermique plus importante qu'avec le refroidissement par eau. C'est la raison pour laquelle des ailettes sont souvent placées à la surface du tube pour augmenter la surface effective d'échange de chaleur. Sur la base de considérations économiques, une approche minimale de 10 à 15°C est utilisée dans la conception des refroidisseurs par air. Cela entraîne généralement des températures finales plus élevées (minimum $40\text{-}45^{\circ}\text{C}$), même si dans des zones où les températures de l'air ambiant sont plus élevées, les approches et les températures finales dépassent les valeurs moyennes citées dans les Tableaux 2.1 et 2.2. Pour les configurations indirectes, l'approche ($13\text{-}20^{\circ}\text{C}$) et les températures finales réalisables ($50\text{-}60^{\circ}\text{C}$) augmenteront en conséquence.

Aspects environnementaux

Les principaux aspects environnementaux sont le bruit et l'utilisation d'énergie pour le fonctionnement des ventilateurs. Il n'y a pas de consommation d'eau, sauf si elle est utilisée comme fluide de refroidissement secondaire dans une conception indirecte. Toutefois, le système étant fermé, cette eau nécessite peu ou pas de maintenance. Le nettoyage de l'extérieur des tubes (à ailettes) est nécessaire et parfois des problèmes peuvent se poser du fait de l'accumulation de débris atmosphériques et de petits insectes.

Application

Les échangeurs de chaleur par air sec sont utilisés dans de nombreuses industries de petite et de grande taille. Ils servent à refroidir les produits dans l'industrie chimique et pétrochimique, pour la condensation à vide dans les centrales électriques et pour le refroidissement des gaz d'échappement.

Pour une même puissance, le refroidissement par air sec requiert une plus grande surface que le système de refroidissement par voie humide, et les systèmes par voie sèche sont généralement considérés comme étant plus onéreux. Dans les sites de production électrique, le refroidissement par air sec est toutefois utilisé dans des situations spécifiques où la production d'électricité est prévue sur des emplacements où les approvisionnements en eau sont insuffisants pour le refroidissement par voie humide.

2.5.1.1 Tour de refroidissement à tirage naturel par voie sèche

Caractéristiques d'une tour de refroidissement à tirage naturel par voie sèche :

- fonctionnement en base, c'est à dire pendant plus de 60% de l'année,
- chaleur évacuée supérieure à $200 \text{ MW}_{\text{th}}$ (installations importantes telles que les centrales électriques, installations chimiques, etc.),
- utilisation pour des situations totalement sans bruit,
- utilisation dans des situations où l'eau d'appoint de la tour de refroidissement n'est pas disponible ou pour une courte période uniquement.

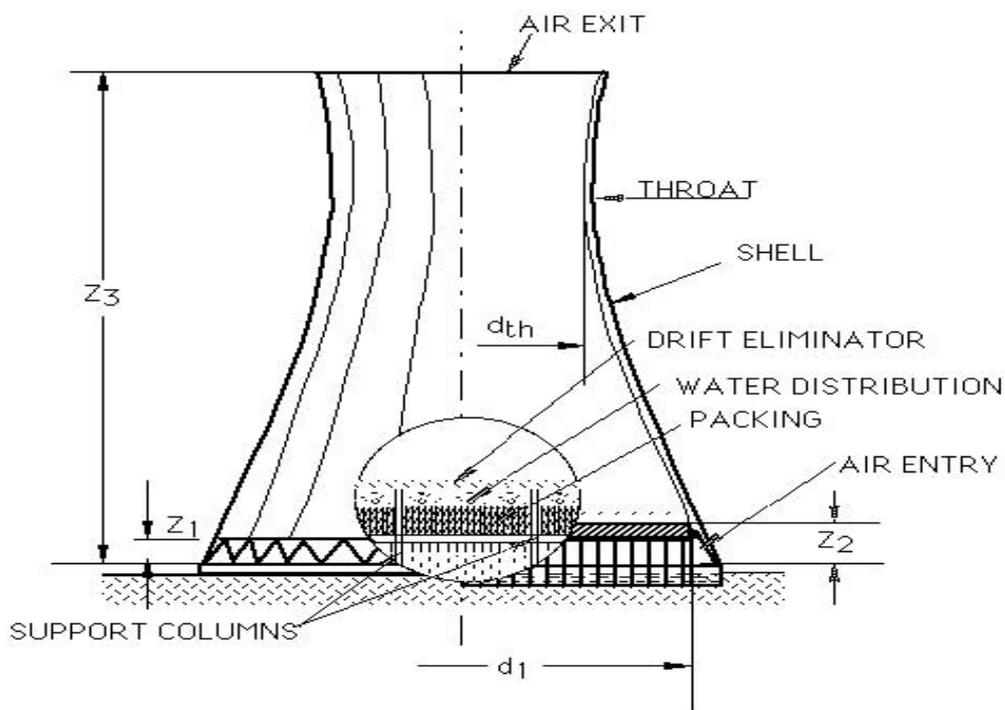


Figure 2.10 : Illustration schématique du principe d'une tour de refroidissement à tirage naturel par voie sèche [Eurovent, 2000]

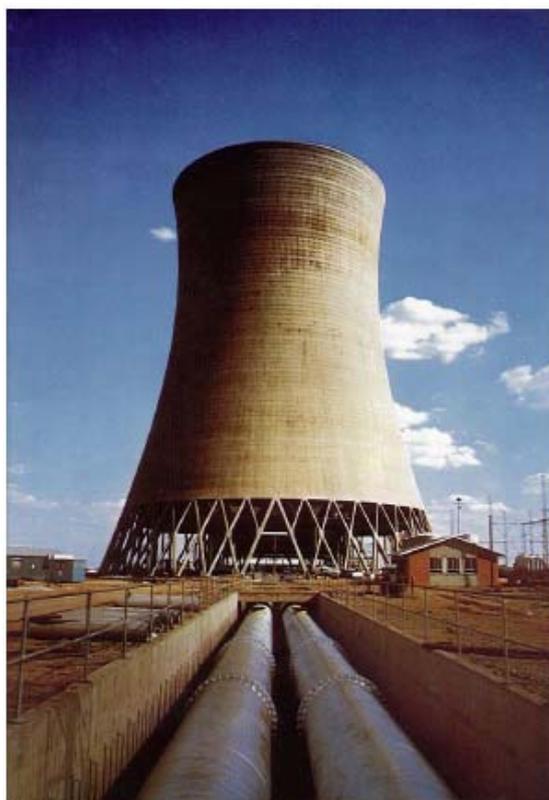


Figure 2.11 : Exemple de tour de refroidissement à tirage naturel par voie sèche dans une centrale électrique [VGB, 2000]

2.5.1.2 Systèmes de refroidissement de liquides par voie sèche

Caractéristiques d'une tour de refroidissement de liquides par voie sèche :

- performance thermique ajustable par le contrôle des ventilateurs ;
- circuit fermé est nécessaire ;
- le tirage forcé et induit sont utilisés ;
- le coût de la consommation électrique interne est supposé être plus élevé que pour les tours de refroidissement par voie humide ;
- faible niveau de chaleur évacuée, c'est-à-dire moins de 100 MWth ;
- un changement de température du réfrigérant presque linéaire à celui de la température de l'air (bulbe sec) doit être acceptable pour le procédé à refroidir ;
- les coûts d'exploitation sont essentiellement constitués de coûts énergétiques ;
- les aspects environnementaux sont notamment le bruit et l'énergie.

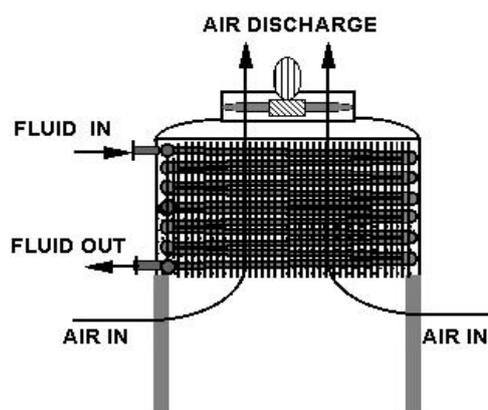


Figure 2.12 : Figure schématique du principe d'un système de refroidissement par voie sèche
[Courtesy of Eurovent, 2000]



Figure 2.13 : Exemple d'un refroidisseur de liquide par air sec dans un procédé chimique
[Pers. archive]

2.5.1.3 Condenseurs à air

Les condenseurs à air (voir Annexe XII) sont très répandus dans l'industrie de production d'électricité et dans les installations chimiques pour la condensation de vapeur. L'air est aspiré par les ventilateurs sous les éléments du condenseur, puis poussé à travers l'échangeur. La circulation de l'air refroidit la vapeur qui entre dans les faisceaux de tubes du condenseur (voir Figure 2.14). Dans un système indirect, le condenseur est refroidi par un flux d'eau de refroidissement qui, à son tour, est refroidi dans une tour de refroidissement à tirage naturel.

Caractéristiques des condenseurs à air :

- évacuation de chaleur dans les petites et des grandes installations,
- aucune eau de refroidissement n'est requise,
- le coût de la consommation directe d'énergie est supposé être plus élevé que pour les condenseurs par voie humide ou pour les tours de refroidissement par voie humide,
- une hauteur globale relativement faible,
- les conduits de sortie de la vapeur peuvent être courts,
- l'espace situé à proximité immédiate du générateur de vapeur doit être considérable,
- adaptation nécessaire pour de larges variations de charge et de température, nécessitant une vitesse variable du ventilateur,
- les aspects environnementaux sont notamment le bruit et l'énergie.

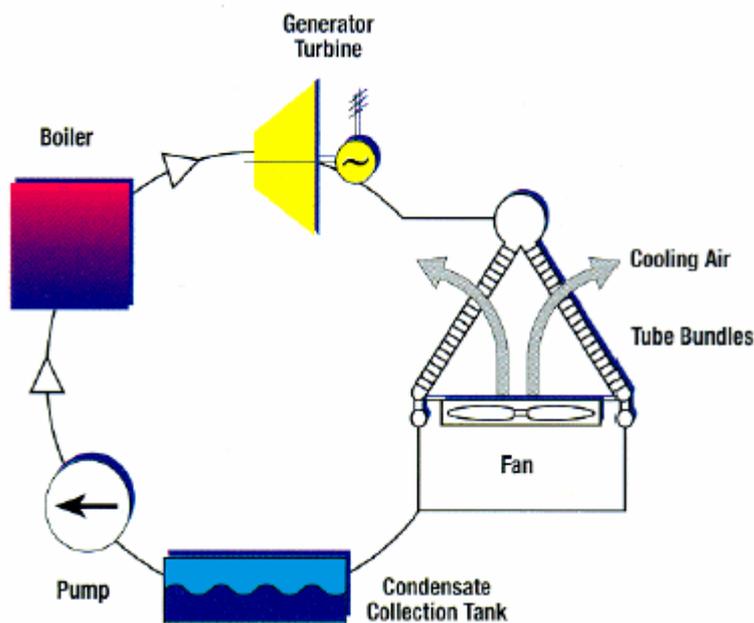


Figure 2.14 : Présentation schématique du principe d'un condenseur direct à air
[Balcke Dürr, 2000]



Figure 2.15 : Exemple d'un condenseur à air pour la condensation des fumées d'échappement d'une turbine [tm111, BDAG, 1996]

2.5.2 Systèmes de refroidissement par voie humide en circuit fermé

Dans des systèmes en circuit fermé, le fluide à refroidir circule dans un circuit fermé sans aucun contact avec l'environnement. Le fluide est conduit à travers un échangeur tubulaire ou « serpentín » (circuit primaire). Les serpentins sont mouillés sur leur face externe (circuit secondaire ou pulvérisation). La chaleur est transférée du fluide vers l'eau pulvérisée (transfert de chaleur sensible). L'évaporation d'une petite partie de l'eau amène à un refroidissement par évaporation et la chaleur est transférée de l'eau vers l'air. Il y a un transfert de chaleur sensible supplémentaire du serpentín dans l'air. En pratique, dans le cadre d'un refroidissement par évaporation, les transferts de chaleur sensible et latente sont toujours couplés. L'eau est traitée pour éviter les dommages causés au matériel. Les pertes par évaporation, fuites et entraînement vésiculaire entraînent une augmentation de la concentration en minéraux, aussi faut-il purger le circuit d'eau et ajouter de l'eau d'appoint.

Puissance de refroidissement

La puissance de refroidissement est inférieure à celles des systèmes ouverts en raison de la plus faible efficacité de transfert de chaleur du serpentín. En combinant les unités, on peut atteindre des capacités plus importantes de 150-400 kW_{th} à 2,5 MW_{th}. Des approches de 4 K peuvent en principe être atteintes. L'avantage est une boucle de refroidissement primaire risques de contamination (c'est le cas de tous les refroidissements fermés) qui, dans certains cas, élimine la nécessité d'échangeurs de chaleurs internes. En termes de ressources, les besoins énergétiques pour la boucle de pulvérisation d'eau doivent être pris en compte. Avec le refroidissement en circuit fermé, les températures finales entre 25 et 30°C peuvent être obtenues, en fonction des conditions climatiques du site [tml139, Eurovent, 1998]. Les températures dans le film d'eau au niveau des surfaces de l'échangeur de chaleur sont de l'ordre de 5°C supérieures aux températures de l'eau dans le réservoir, qui se situent en principe entre 40 et 50°C, même si dans la pratique les températures peuvent atteindre 70-80°C.

Aspects environnementaux

Si les systèmes de refroidissement en circuit fermé utilisent de l'eau comme fluide de refroidissement secondaire, il s'agit le plus souvent d'eau alcaline déminéralisée ou d'eau potable. Les durées de résidence dans ces systèmes peuvent atteindre jusqu'à 6 mois. L'apport en eau d'appoint n'est nécessaire qu'en cas de fuite et d'évaporation au niveau du remplissage des pompes, ou lorsque l'eau a été drainée pour permettre de réparer le système. Puisqu'il faut peu d'eau d'appoint, elle peut généralement être d'une excellente qualité et c'est la raison pour laquelle les dépôts de calcaire ne sont pas un problème. L'entartrage peut être causé par l'eau utilisée à l'extérieur des tubes ou des échangeurs et un traitement (nettoyage) peut s'avérer nécessaire [tm010, Betz, 1991]. En fonction du concept technique, du mode de fonctionnement et des conditions climatiques, un panache peut se former. On peut économiser de l'eau car la tour peut fonctionner comme une tour par voie sèche lorsque la température ambiante est peu élevée. Le bruit causé par le ventilateur peut être un problème.

Application

Les systèmes de refroidissement en circuit fermé sont utilisés dans de nombreuses applications. Ils sont bien adaptés au refroidissement des moteurs à gaz et des compresseurs, et peuvent s'avérer fiables pour contrôler les températures de procédés industriels [tm010, Betz, 1991]. Ils peuvent être utilisés à la fois pour les grosses et les petites applications. On peut s'en servir comme refroidisseurs de liquides (huiles lubrifiantes, eau de refroidissement pour les compresseurs), refroidisseurs de gaz (moteurs diesel, gaz de procédé) et condenseurs à air (cycles combinés, turbines à vapeur). Si le fluide de procédé dans le serpentin ou dans les tubes est sous forme de vapeur (gaz ou fluide frigorigène) à refroidir pour condenser en liquide, ce système de refroidissement est également appelé condenseur évaporatif.

2.5.2.1 Systèmes de refroidissement à tirage mécanique en circuit fermé

Caractéristiques des systèmes de refroidissement à tirage mécanique en circuit fermé :

- refroidissement des petites et grandes installations,
- de faibles températures de refroidissement peuvent être atteintes,
- conception compacte par rapport au matériel refroidi à l'air,
- faibles besoins énergétiques,
- besoins en approvisionnement d'eau et en circuit d'eau pulvérisée,
- suppression de panache réalisable par des échangeurs adaptés et/ou le fonctionnement par voie sèche en hiver,
- aspects environnementaux : traitement de l'eau et récupération des effluents.

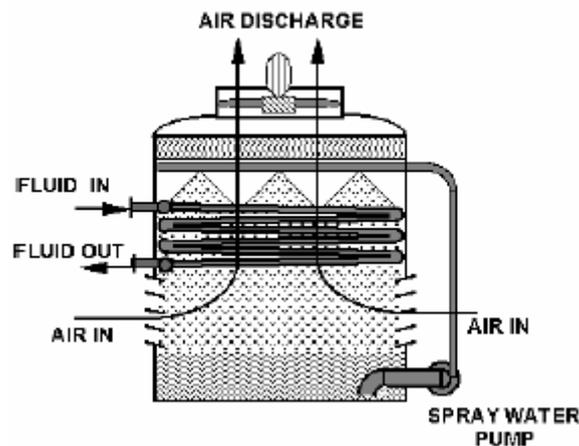


Figure 2.16 : Présentation schématique du principe de la tour aéroréfrigérante fermée par voie humide à tirage induit

[Eurovent, 2000]

2.5.2.2 Condenseurs évaporatifs

Caractéristiques des condenseurs évaporatifs :

- refroidissement des installations moyennes à grandes,
- plus faibles températures de refroidissement qu'avec les condenseurs évaporatifs refroidis à l'air,
- faibles besoins énergétiques,
- en général, plus hauts que les condenseurs évaporatifs refroidis à l'air, mais avec de plus petites prises au sol,
- aspects environnementaux : traitement de l'eau et récupération des effluents.

2.6. Systèmes de refroidissement par voie humide/sèche combinés

2.6.1 Tours de refroidissement ouvertes par voie humide/sèche (hybrides)

Description technique

Une tour de refroidissement ouverte par voie humide/sèche, ou tour de refroidissement « hybride », est une conception spécifique qui a été envisagée pour résoudre le problème posé par l'utilisation de l'eau de refroidissement et par la formation de panache. Il s'agit d'une combinaison d'une tour de refroidissement par voie humide et d'une par voie sèche soit, en d'autres termes, d'un procédé évaporatif et d'un non-évaporatif. La tour de refroidissement hybride peut fonctionner soit comme une tour de refroidissement par voie humide, soit comme une tour de refroidissement combinée

par voie humide/sèche en fonction de la température ambiante. L'eau de refroidissement réchauffée passe d'abord par une section sèche de la tour de refroidissement, où une partie de la chaleur est extraite par un courant d'air souvent induit par un ventilateur. Après être passée par la section sèche, l'eau est encore refroidie dans la section humide de la tour qui fonctionne comme une tour aéroréfrigérante ouverte. L'air réchauffé provenant de la section sèche est mélangé avec la vapeur issue de la section humide dans la partie supérieure de la tour, réduisant donc l'humidité relative avant que le courant d'air ne quitte la tour de refroidissement. Ceci réduit (presque) complètement la formation d'un panache au dessus de la tour.

Optimiser l'effet d'une tour de refroidissement hybride revient à optimiser la quantité de transfert de chaleur sèche pour satisfaire aux exigences de contrôle du panache. Parallèlement, la section humide est utilisée pour la plus grande partie du refroidissement.

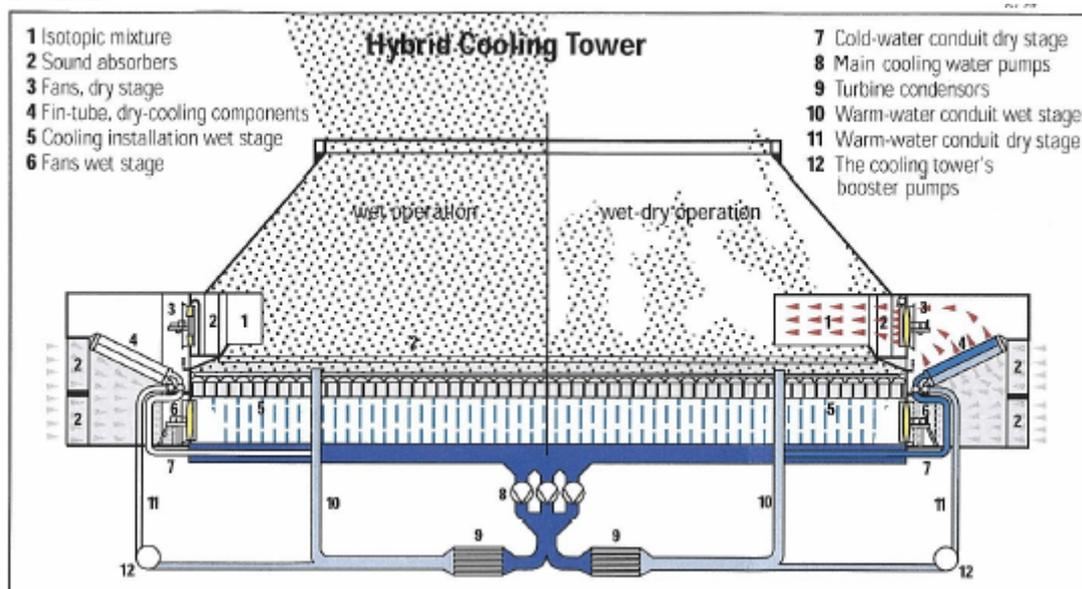


Figure 2.17 : Représentation schématique du principe d'une tour de refroidissement hybride (exemple appliqué dans la production d'électricité)

[Eurelectric, 1999]

Caractéristiques des tours de refroidissement hybrides ouvertes :

- le fonctionnement en charge de base et en charge partielle pour toutes les puissances
- le réfrigérant est exclusivement de l'eau
- l'eau d'appoint requise par la tour de refroidissement pour la plupart de la durée d'exploitation
- la performance thermique est la même que dans le cas des tours de refroidissement par voie humide
- la réduction de la quantité d'eau d'appoint
- les réglementations en matière de protection de l'environnement ; par exemple : réduction de la hauteur totale (en raison de l'aide des ventilateurs) et la réduction du panache
- le matériel d'insonorisation requis en raison des réglementations relatives aux émissions sonores.

Pour faire fonctionner efficacement une tour de refroidissement hybride, plusieurs dispositifs sont utilisés :

- des ventilateurs à vitesse variable
- des dispositifs de fermeture pour les entrées d'air (tels que les jalousies ou les portes coulissantes)
- des valves pour les circuits d'eau dans les sections humides et sèches
- des systèmes de dérivation
- des pompes de mise en charge (pour les constructions spéciales)
- un système de mélange du panache humide et du panache sec.

Construction d'une tour hybride

Actuellement, seules les tours de refroidissement hybrides à tirage mécanique sont disponibles. Une tour de refroidissement hybride est différente de la conception caractéristique d'une tour ouverte par voie humide car elle est dotée d'une section sèche et d'une section humide, chacune de ces sections ayant sa propre entrée d'air et les

ventilateurs correspondants. On trouve des tours de refroidissement hybrides en systèmes modulaires, dans des grosses tours de refroidissement circulaires équipées de systèmes de tirage forcé ou dans des tours de refroidissement de type cellulaire à tirage induit. Le garnissage (ou corps d'échange), le système de distribution d'eau, l'élimination des gouttelettes et l'insonorisation sont des caractéristiques communes à toutes les conceptions de tours.

Les tours de refroidissement par voie sèche/humide à tirage mécanique sont dotées de systèmes de mélange internes permettant de mélanger les courants d'air humides et secs. Elles peuvent être automatiquement contrôlées en fonction de la quantité de chaleur, du débit d'eau, de l'air ambiante et du conditionnement du panache.

Puissance de refroidissement

Elles peuvent être pré-assemblées, à tirage induit ou forcé et, à une échelle plus importante, avec des tours de refroidissement de type cellulaire ou circulaire avec une puissance de refroidissement située entre 1 MW_{th} et $2\,500 \text{ MW}_{\text{th}}$.

Aspects environnementaux

La différence la plus importante entre une tour de refroidissement hybride et une tour de refroidissement classique est son utilisation d'eau relativement faible (il s'agit d'eau d'appoint), représentant 20 % de moins qu'une tour de refroidissement par voie humide [tm132, Eurelectric, 1998].

La consommation énergétique annuelle d'une tour de refroidissement hybride à tirage mécanique peut être réduite de 1,1 à 1,5 fois par rapport à la tour de refroidissement à tirage mécanique par voie humide, puisque dans des conditions nominales, le débit d'air est pratiquement double (sections humide et sèche). Les tours de refroidissement à tirage naturel par voie sèche/humide sont actuellement étudiées.

Application

La décision d'installer une tour de refroidissement hybride doit se faire à la lumière des exigences propres au site (limitation de la hauteur et réduction du panache). On en trouve plusieurs dans les sites de production d'électricité, notamment en Allemagne et au Royaume-Uni (dans les systèmes de cogénération). Son utilisation se limite à des plages de températures situées entre 25 et 55°C. En effet, au-delà de 55°C, on observe une précipitation de carbonate de calcium sur les tubes plus importante. Cela ne signifie pas qu'aucune précipitation ne se peut se produire au-dessous de 55°C, et il ne faut pas en faire une règle générale.

2.6.2 Systèmes de refroidissement hybrides en circuit fermé

Description technique

Pour les systèmes hybrides en circuit fermé, les caractéristiques peuvent être décrites de façon similaire à celles des systèmes aérofrigorifères en ce qui concerne les ventilateurs (axiaux et radiaux), la direction du débit d'air (flux transversal ou contre-courant) et les systèmes d'insonorisation (voir § 2.4). En général, ces unités ont de faibles besoins d'espace. Trois techniques peuvent être appliquées aux tours de refroidissement hybrides en circuit fermé : pulvérisation d'eau sur batterie à surface lisse, refroidissement adiabatique ou modes combinés.

Aspects environnementaux

Les tours de refroidissement hybrides en circuit fermé combinent les avantages du refroidissement en boucle fermée avec des économies d'eau substantielles par rapport aux tours de refroidissement en circuit fermé par voie humide.

Par rapport aux tours de refroidissement en circuit fermé par voie sèche, elles offrent l'avantage de températures de refroidissement inférieures. En terme de taille, de consommation d'énergie et d'émissions sonores, elles sont comparables aux tours de refroidissement en circuit fermé par voie humide. En fonction de leur conception (pulvérisation d'eau sur batterie d'échange), il faut prêter une attention particulière à la qualité du traitement de l'eau. Les coûts supplémentaires seront plus que compensés par les économies d'eau réalisées, car les produits ne consomment de l'eau que pendant une très courte période de l'année. Les refroidisseurs hybrides en circuit fermé suppriment de façon significative et voire même, dans certaines conceptions, éliminent la formation de panache.

2.6.2.1 Pulvérisation d'eau sur la batterie à surface lisse

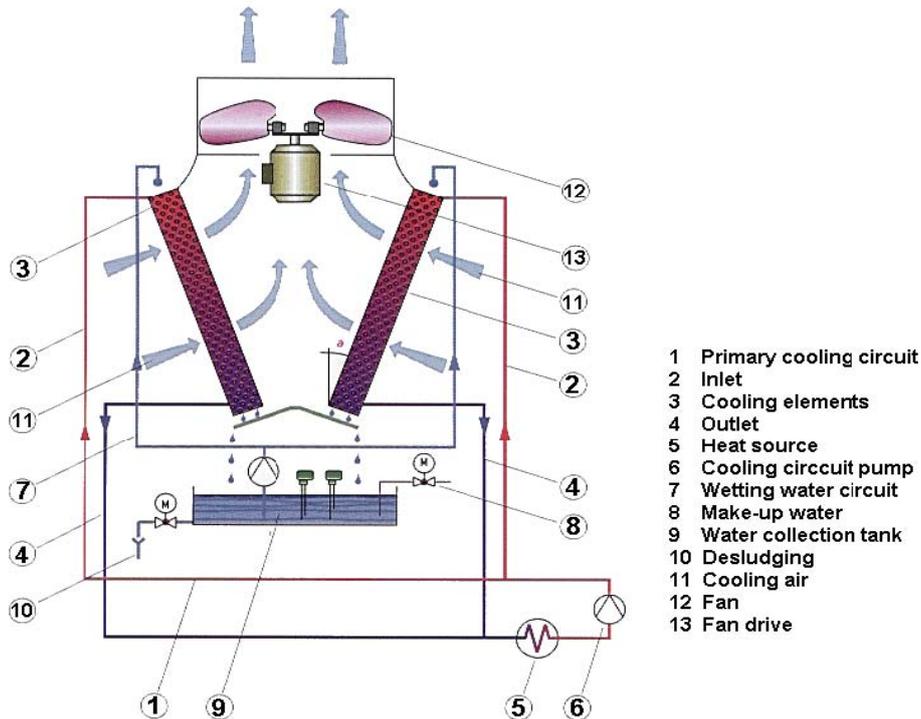


Figure 2.18 : Présentation schématique du principe de la tour de refroidissement hybride en circuit fermé

Dans une tour de refroidissement en circuit fermé, le fluide de procédé circule dans les éléments de refroidissement (échangeurs à tubes/plaques ou batterie à ailette) dans une boucle fermée, le circuit de refroidissement primaire. Ces éléments de refroidissement sont mouillés via un circuit d'eau secondaire et l'air traverse les éléments pour créer un transfert de chaleur par évaporation. L'eau de refroidissement qui ressort des éléments est collectée dans un bassin et peut recirculer plusieurs fois, parfois en utilisant une autre tour de refroidissement ou après la purge (voir Figure 2.19). Dans une configuration indirecte, le fluide qui circule dans le circuit de refroidissement primaire n'est pas le fluide à refroidir, mais un autre réfrigérant qui, à son tour, refroidit le fluide de procédé dans un second échangeur de chaleur.

2.6.2.2 Refroidisseurs adiabatiques, humidification et pré-refroidissement de l'air qui refroidit les batteries

En mode adiabatique, le fluide à refroidir contourne la batterie à surface lisse. L'eau de refroidissement dégouline sur le corps d'échange et l'air qui passe sur le corps est humidifié le plus possible. L'air humidifié passe dans les batteries à ailettes et prendra plus de chaleur que l'air sec ne le permettrait. Par rapport au matériel de refroidissement par évaporation classique, la consommation d'eau est vraiment réduite (Voir Figure 2.19).

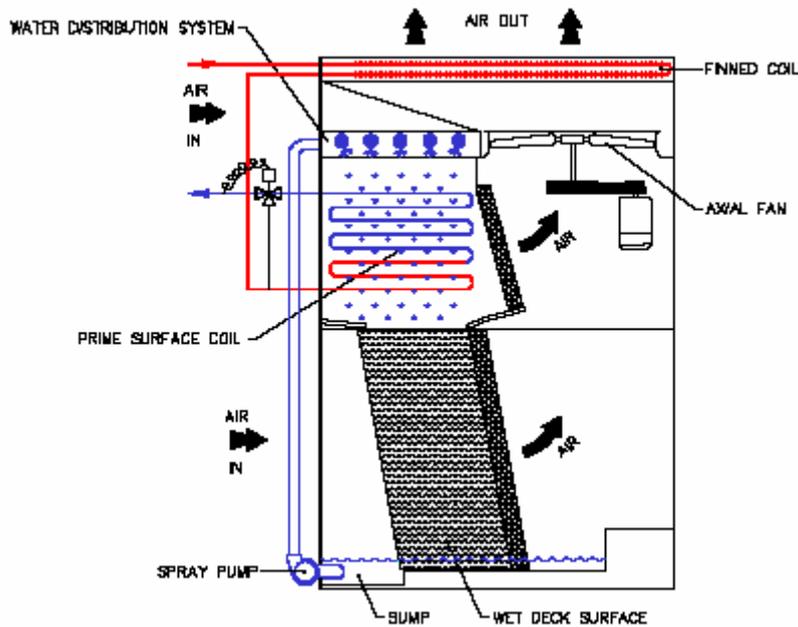


Figure 2.19 : Fonctionnement combiné par voie sèche/humide d'un système de refroidissement hybride
 [tm151, BAC, 1999]

2.6.2.3 Mode combiné

Dans un mode combiné, on utilise la batterie sèche, la batterie à surface lisse et la surface de ruissellement. En mode sec, il est alors possible de fermer tous les pulvérisateurs d'eau et d'amener le fluide à refroidir par la batterie sèche et la batterie à surface lisse qui seront refroidies par de l'air sec exclusivement. En mode humide/sec, le fluide, après son passage dans les batteries sèches, passe par la batterie à surface lisse avant de retourner dans le procédé en tant que fluide refroidi. L'eau réchauffée dégouline le long des batteries lisses et retombe sur la surface de ruissellement. L'air est aspiré et passe à la fois dans la batterie à surface lisse et la surface de ruissellement où il sera saturé et récupérera de la chaleur. Au moment de son passage dans la batterie à ailettes, il peut récupérer davantage de chaleur (voir aussi Figure 2.19).

2.6.2.4 Coûts des systèmes hybrides

Dans l'utilisation des systèmes hybrides, on se réfère toujours aux coûts d'investissement et aux coûts d'exploitation impliqués. En général, les systèmes hybrides requièrent des coûts d'investissement plus élevés. Le coût de la suppression du panache varie en fonction du système de refroidissement. Par rapport à une tour de refroidissement ayant la même performance de refroidissement, Fluor [1995] a calculé que pour une installation d'une tour de refroidissement ouverte par voie humide de 300 MW, les coûts de l'installation de refroidissement sont environ 2,5 fois plus élevés que pour les tours de refroidissement sans suppression de panache. Pour les tours de refroidissement en circuit fermé par voie humide, les coûts de suppression du panache sont estimés de 1,5 à 2 fois plus élevés que pour les tours sans suppression de panache (Eurovent). Les coûts doivent être ajustés pour faire des économies sur la consommation d'eau et la flexibilité opérationnelle. Les coûts annuels pour l'eau, incluant le traitement de l'eau et l'électricité, peuvent représenter dans certains cas à peine 10 % des coûts annuels d'une tour de refroidissement. Ces considérations économiques dépendent bien évidemment de l'utilisation individuelle et les prix de l'eau et de l'énergie [tm139, Eurovent, 1998].

Les indications de coûts données par l'industrie électrique montre des niveaux situés entre 40 000 € à 70 000 € par MW_{th} pour les tours de refroidissement hybrides à tirage mécanique. Dans ce secteur, cela signifie une installation à un coût 1,3 à 1,6 fois plus élevé que celui de tours ayant de même puissance sans suppression de panache.

2.7. Systèmes aéroréfrigérants

Les descriptions données précédemment des principales configurations de refroidissement expliquent les principes de refroidissement et les différentes conceptions techniques associées utilisées dans l'industrie en fonction des exigences du procédé, du site et de son environnement. Certaines définitions clés ont été expliquées dans l'introduction comme la différence entre le refroidissement par voie sèche et par évaporation, ou entre les systèmes fermés et ouverts utilisés

dans les descriptions des systèmes. L'utilisation du critère direct et indirect peut toutefois générer de la confusion s'il n'est pas replacé dans le contexte d'un système aérorefrigérant.

2.7.1 Systèmes aérorefrigérants directs

Comme nous l'avons dit précédemment, dans les systèmes de refroidissement directs, il y a un seul niveau d'échangeur de chaleur où le liquide de refroidissement et le fluide de procédé échangent de la chaleur et où le fluide de refroidissement (eau ou air) est en contact avec l'environnement. Toute fuite par la paroi entre le fluide de procédé et le fluide de refroidissement (air ou eau) signifierait que le fluide de procédé est rejeté dans l'environnement ou que, dans des conditions de vide (condenseurs), le procédé est affecté. Donc, même si le refroidissement du réfrigérant tel qu'il est fait dans une tour de refroidissement est également un procédé d'échange de chaleur, il est quand même considéré comme un système direct.

L'exemple d'une tour de refroidissement ouverte refroidissant le circuit hydraulique d'un condenseur refroidi à l'eau est par conséquent un système direct (même si, comme nous l'avons mentionné, les fuites affecteront le procédé et non le fluide de refroidissement).

2.7.2 Systèmes aérorefrigérants indirects

Pour définir un système indirect, l'élément clé est que les fuites du procédé ne contamineraient pas le fluide de refroidissement qui est en connexion ouverte avec l'environnement. Cela implique deux niveaux de refroidissement.

Dans le cas d'une tour aérorefrigérante ouverte, l'eau quittant la tour échangera de la chaleur dans un échangeur de chaleur avec l'eau qui se trouve dans une boucle fermée. L'eau dans la boucle fermée quittera l'échangeur de chaleur pour pénétrer dans un autre échangeur de chaleur où elle échangera sa chaleur avec le fluide de traitement.

Dans des tours aérorefrigérantes fermées, le principe est identique et les batteries ou les tubes sont remplis d'eau qui sera refroidie par l'eau et/ou l'air. L'eau refroidie pénètre dans un échangeur de chaleur ou dans un condenseur au cœur du procédé, pour échanger la chaleur avec le fluide de procédé à refroidir. Lorsque les systèmes aérorefrigérants fermés fonctionnent en hiver et nécessitent une protection contre le gel, le circuit fermé ne contient en principe pas que de l'eau, mais aussi un réfrigérant ou de l'eau additionnée d'anti-gel. En réalité, ces systèmes peuvent encore être classés comme des systèmes directs car l'agent frigorigène pourrait polluer le fluide de refroidissement qui est en contact direct avec l'environnement.

2.8. Coûts des systèmes de refroidissement

Pour chaque configuration, une indication des coûts a été donnée, mais les calculs des coûts des systèmes de refroidissement montrent des écarts importants. On peut en conclure que les écarts de coûts entre les différents systèmes n'indiquent pas nécessairement la solution la moins onéreuse. Des différents facteurs qui, au final, influencent les coûts, les besoins des utilisateurs et les besoins légaux sont très importants. C'est la raison pour laquelle, il faudrait estimer la faisabilité d'un système ou de l'utilisation d'une technique au cas par cas. Les prix de l'énergie doivent toujours être pris en compte. Ils seront importants, par exemple, dans des situations où la récupération de chaleur est prise en considération.

Un aspect important dans le calcul des coûts d'un système de refroidissement et des améliorations possibles est la comparaison entre les coûts d'investissements initiaux d'un système ou d'une mesure appliquée et des coûts annuels qui en découlent. Dans la pratique, des coûts d'investissement plus élevés peuvent générer des coûts de maintenance moins élevés, mais également des coûts fixes annuels plus élevés qui peuvent constituer un obstacle aux investissements eux-mêmes. Par souci de comparaison, les coûts doivent également être exprimés en termes de puissance thermique pour laquelle le système est conçu (kW_{th} ou MW_{th}).

Pour les applications industrielles (autres que les centrales électriques) [tm001, Bloemkolk, 1997] a établi la liste des éléments déterminant les coûts pour les systèmes refroidis à l'eau et à l'air, les coûts totaux calculés et la comparaison des différents systèmes. Les éléments et l'approche suivie sont expliqués ci-dessous et les résultats sont récapitulés dans l'Annexe X. Pour les centrales électriques, un modèle différent est utilisé, décrit dans l'Annexe XII.

Éléments

En général, les éléments énumérés ci-dessous déterminent les coûts et doivent être pris en compte :

Tableau 2.3 : Éléments de coûts pour les systèmes de refroidissement par l'air et par l'eau

[tm001, Bloemkolk, 1997]

Type de coût	Éléments de coûts	Systèmes de refroidissement par eau	Systèmes de refroidissement par air	
Fixe	Échangeurs de chaleur (type, taille et modèle)	x	x	
	Échangeur de chaleur (matériau)	x	x	
	Tubes dans le procédé, jonctions de tubes	x	x	
	Pompes/pompes de secours	x	x	
	Installations d'entrée	x		
	Prise d'eau/évacuation	x		
	Installations de débit	x		
	Tour(s) de refroidissement (possible)	x	x	
	Ventilateurs	x	x	
	Insonorisation	x	x	
	Système indirect (échangeur de chaleur supplémentaire, tuyaux, pompes)	x	x	
	Variable	Eau (souterraine, du robinet)	x	
Taxes eaux usées		x		
Surveillance des fuites		x	x	
Conditionnement de l'eau		x		
Consommation d'énergie (pompes et ventilateurs)		x	x	
Maintenance		x	x	

Méthodologie

Différentes méthodologies ont été développées pour comparer les coûts entre les différents systèmes de refroidissement. La méthode utilisée est brièvement décrite dans l'Annexe X.

Comparaisons

Les comparaisons devraient toujours être faites dans les mêmes conditions d'exploitation et pour la même puissance, exprimée en MW_{th} dissipés.

Les calculs ont montré que la sensibilité des coûts est largement influencée par le niveau d'investissement et la consommation d'énergie. La variation des coûts des échangeurs de chaleur (calandre & tube) due à la configuration choisie et au choix des matériaux est très importante. Les matériaux bon marché et les modèles déterminent les limites basses de calcul. Les matériaux spéciaux déterminent la limite supérieure. Il ne faudrait pas oublier que les matériaux de bonne qualité réduiraient considérablement les coûts de maintenance et de fonctionnement ainsi que l'utilisation de produits chimiques.

Calculés comme des coûts annuels, les coûts d'investissement et d'exploitation varient de façon significative. Les facteurs tels que les besoins en eau (d'appoint) et le prix ainsi que la consommation énergétique sont influents. Le choix des matériaux a également une incidence sur les coûts annuels. Lorsque le refroidissement par air sec est utilisé, la température finale qui peut être obtenue est importante et moins la température finale est élevée, plus le refroidissement par air sera onéreux. Avec le refroidissement à l'eau, la température finale basse est moins importante pour les estimations de coûts, sauf si de plus petites approches sont utilisées dans le calcul.

Le Tableau X.2 de l'Annexe X montre les plages de coûts de différents systèmes de refroidissement industriels. À partir des données utilisées dans cette méthode, les coûts d'exploitation d'une tour de refroidissement ouverte par voie humide se sont avérées être plus élevées que pour le refroidissement par air sec. D'autre part, les coûts d'investissement pour le refroidissement par air ont été généralement plus élevés que pour les autres systèmes. Cela suggère notamment qu'avec

les systèmes de refroidissement par eau, des investissements plus élevés impliquent des coûts d'exploitation plus faibles (maintenance, conditionnement).

Sur la base des données citées précédemment, on peut conclure que les écarts de coûts entre les différents systèmes n'indiquent pas nécessairement la variante la moins onéreuse. Tout dépend des besoins de l'utilisateur et des besoins en termes de niveaux d'émission définis par les autorités. Aussi, une estimation de ce qui pourrait être fait devrait être faite au cas par cas. Les données indiquées précédemment peuvent être utilisées comme des indications générales ; elles sont présentées dans l'Annexe X

3. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX DES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT INDUSTRIELS ET DES TECHNIQUES DE PRÉVENTION ET DE RÉDUCTION UTILISÉS

3.1. Introduction

Les aspects environnementaux des systèmes de refroidissement industriels sont propres à chacune des configurations décrites dans le Chapitre 2. La consommation directe et indirecte d'énergie, les émissions de chaleur et d'additifs du circuit d'eau de refroidissement dans les eaux de surface, le bruit et la formation de panache sont les aspects environnementaux des systèmes de refroidissement. Dans tous les cas, l'importance de ces questions (telles que le bruit) pour l'environnement devrait toujours être envisagée par rapport à la performance environnementale globale incluant celle du procédé industriel à refroidir. Tous ces problèmes ne revêtent pas la même importance pour chaque système. Ainsi, les besoins en eau ou la formation de panache ne jouent aucun rôle dans les systèmes de refroidissement par voie sèche. En ce qui concerne le système de refroidissement industriel, les problèmes qui sont potentiellement importants et qui devraient être pris en compte par le rédacteur d'autorisations sont présentés et récapitulés dans le Tableau 3.1. Bien entendu, lorsque des mesures appropriées sont prises, le problème deviendra moins important, mais cet aspect n'a pas été pris en compte dans ce tableau car il sera abordé dans les chapitres suivants. Le caractère et le niveau des émissions dans l'environnement ne sont pas uniquement le résultat de la configuration utilisée, mais dépendent dans une large mesure de la façon dont le système est piloté et de la façon dont les ressources qui sont requises pour faire fonctionner un système de refroidissement sont gérées.

Ce chapitre aborde les aspects environnementaux et les risques microbiologiques (ou sanitaires) qui peuvent avoir à être pris en compte lorsqu'une application pour une autorisation environnementale doit être envisagée. En même temps, les principes des techniques qui sont décrits peuvent être utilisés pour définir la MTD. Dans de nombreux cas, le système de refroidissement sera une installation existante et, bien entendu, les options d'amélioration sont limitées par rapport aux situations entièrement nouvelles. En général, la conception du process et le choix de la technologie et de la conception de refroidissement appropriée peuvent réduire la consommation et empêcher la plupart des émissions dans l'environnement. Dans certains cas particuliers, il s'agira de définir les priorités de ce qui devrait ou pourrait être fait lorsque la spécificité du site joue un rôle très important.

Pour déterminer la MTD, « l'approche » MTD est décrite séparément pour chaque problème environnemental et pour chaque technique en prenant en compte les effets croisés potentiels. L'évaluation suit « l'approche » générale décrite dans le Chapitre 1. Elle commence par la réduction de la demande en refroidissement et des rejets de chaleur dans l'environnement. Elle continue par l'évaluation des options de minimisation des ressources dédiées à la prévention ou à la réduction des émissions, en gardant à l'esprit que cela facilitera également le fonctionnement du procédé de refroidissement :

1. la prévention par des options technologiques :
 - mesures techniques intégrées
 - changement de configuration
 2. la prévention par l'optimisation du fonctionnement des systèmes
- l'utilisation d'une technologie au point de rejet ou de techniques complémentaires.

Les implications environnementales de chaque option sont examinées et chaque technique sera évaluée pour connaître ses effets sur la consommation totale d'énergie. Tout d'abord, ce chapitre montre comment les changements de conduite de l'opération de refroidissement affectent la consommation d'énergie. Les annexes fournissent des informations sur les techniques particulières et leurs performances respectives.

Tableau 3.1 : Problèmes environnementaux des différents systèmes de refroidissement
[tm001, Bloemkolk, 1997]

Système de refroidissement	Consommation d'énergie (directe) (§ 3.2)	Besoins en eau (§ 3.3) ⁽¹⁾	Entraînement des poissons ⁽²⁾ (§ 3.3)	Émissions dans l'eau de surface.		Émissions dans l'air (directes) (§ 3.5)	Formation de panache (§ 3.5)	Bruit (§ 3.6)	Risque		Résidus (§ 3.8)
				Chaleur (§ 3.3)	Additifs (§ 3.4)				Fuite (§ 3.7)	Risque micro bio. (santé) (§ 3.7)	
Refroidissement à passage unique (circuit direct)	Faible	++	+	++	+ (biocides)	--	--	--	++	--/faible	+ ⁽⁶⁾
Refroidissement à passage unique (circuit indirect)	Faible	++	+	++	+ (biocides)	--	--	--	Faible	--/faible	+ ⁽⁶⁾
Tour de refroidissement ouverte par voie humide (circuit direct)	+	+	--	Faible	+ ⁽³⁾	Faible (dans le panache)	+	+	+	+	--/faible
Tour de refroidissement ouverte par voie humide (circuit indirect)	+	+	--	Faible	+ ⁽³⁾	Faible (dans le panache)	+	+	Faible	+	+
Tour de refroidissement ouverte par voie humide/sèche	+	Faible	--	Faible	Faible ⁽³⁾		-- ⁽⁵⁾	+	Faible	?	+
Tour de refroidissement par voie humide en circuit fermé	+	+	--	--	Faible	Faible ⁽⁴⁾ (dans le panache)	--	+	Faible	Faible	--/faible
Refroidissement par voie sèche en circuit fermé	++	--	--	--	--	/Faible	--	++	Faible	--	--
Refroidissement par voie humide/sèche en circuit fermé	+	Faible	--	--	Faible ⁽³⁾	Faible	--	Faible	Faible	Faible	/faible
Notes :		1 : paragraphe dans le texte -- aucun / sans objet Faible importance inférieure à la moyenne + important ++ extrêmement important 2 : d'autres espèces peuvent également être entraînées 3 : biocides, antitartre, anticorrosion 4 : potentiellement en cas de fuite 5 : s'il fonctionne correctement, pas de problème 6 : Par déchet, on désigne la boue provenant de la prise d'eau et de la décarbonation									

3.2. Consommation d'énergie

Les besoins en énergie des systèmes de refroidissement industriels peuvent être considérés comme une consommation directe ou indirecte. La consommation directe est l'utilisation d'énergie nécessaire au fonctionnement du système de refroidissement. Les principaux consommateurs d'énergie sont les pompes et les ventilateurs. Plus la résistance qui doit être compensée pour maintenir le débit d'air ou d'eau nécessaire est élevée, plus un système de refroidissement aura besoin d'énergie.

S'il ne fonctionne pas correctement, un système de refroidissement pourra être indirectement responsable de l'augmentation de l'intrant énergétique ou de matières premières dans le process de production. Pour évaluer toute modification d'un système de refroidissement, le bilan énergétique global du système de refroidissement et du process industriel doit être pris en compte.

3.2.1 Consommation directe d'énergie

L'énergie dans les systèmes de refroidissement est nécessaire pour pomper l'eau de refroidissement et/ou pour créer un débit d'air. Elle est exprimée en consommation spécifique d'énergie en kW_e par MW_{th} de chaleur dissipée. La consommation spécifique d'énergie peut varier énormément et dépend de la configuration du système de refroidissement utilisé (conception (températures d'approche), pression de pompage) et le modèle de fonctionnement (annuel, en été ou en hiver seulement). Les circonstances locales entraîneront également des variations, le même système de refroidissement nécessitant typiquement une consommation énergétique plus élevée dans des climats chauds que dans les régions au climat plus frais. Dans certains cas, de l'énergie est nécessaire pour la préparation sur le site des additifs. Les principaux consommateurs d'énergie dans un système de refroidissement sont :

- les pompes (utilisées dans tous les systèmes avec de l'eau de refroidissement), pour la prise d'eau ainsi que pour la circulation de l'eau de refroidissement :
 - leur consommation d'énergie est déterminée par le débit, la quantité d'eau à pomper, la perte de pression dans le procédé (nombre d'échangeurs de chaleur, conception), les lieux d'approvisionnement et d'évacuation de l'eau de refroidissement et le fluide à pomper (gaz, fluide, solide).
 - les systèmes indirects ont deux circuits et davantage de pompes seront donc nécessaires.
 - dans le cas d'une tour de refroidissement, l'injection est plus élevée, ce qui nécessite davantage d'énergie par rapport à un système à passage unique.
- les ventilateurs, qui sont utilisés dans les tours de refroidissement à tirage mécanique et dans les condenseurs refroidis mécaniquement :
 - leur consommation d'énergie est déterminée par le nombre, la taille et le type de ventilateurs, la quantité et la portance de l'air,
 - en général, les systèmes par voie sèche nécessitent davantage d'air pour la même capacité de refroidissement que les systèmes par évaporation (par voie humide), bien que cela n'entraîne pas nécessairement une consommation d'énergie plus élevée.

Consommation d'énergie des activités associées

Pour une évaluation globale des besoins énergétiques des systèmes de refroidissement, il faudrait ajouter ceux des équipements auxiliaires nécessaires au fonctionnement d'un système de refroidissement. Peu de données ont été transmises sur ce sujet. La production sur site de substances chimiques pour l'eau de refroidissement telles que l'ozone constitue un exemple typique. La production de 1 kg d'ozone, destiné à éviter l'encrassement, varie entre 7 et 20 kWh en fonction du générateur. Considérant une concentration minimale requise au niveau du point d'injection située entre 0,5 et 1 $\text{g O}_3/\text{m}^3$ et le volume d'eau de refroidissement, il est possible d'estimer les besoins énergétiques.

3.2.2 Consommation indirecte d'énergie

La consommation d'énergie du process de production renvoie à la consommation indirecte d'énergie engendrée par le procédé de refroidissement. Avec un refroidissement inefficace, la consommation augmentera. Un plus faible transfert de chaleur (lié à l'encrassement par exemple) augmentera la température au niveau du process, ce qui consommera davantage d'énergie ; celle-ci devra être générée sur/hors site. L'inefficacité de refroidissement entraîne une perte de production et réduira l'efficacité du process.

Les paragraphes 1.2.1 et 1.4.3 analysent les effets sur les applications sensibles à la température. En raison du refroidissement réduit du condenseur, la conversion totale d'énergie peut être réduite de 0,25 %, ce qui correspond à une baisse de rendement d'environ 0,4 % par degré Celsius. Si une tour de refroidissement ouverte par voie humide est utilisée à la place d'un système à passage unique avec, par exemple, une température finale plus élevée de 5°C, la production d'électricité baissera au maximum de 2 %. Si la différence dans l'énergie requise pour le pompage pour la tour de refroidissement était prise en compte (soit 6-8 kW_e par MW_{th} refroidi), on obtiendrait 1% de perte de rendement

supplémentaire. Pour une centrale électrique classique alimentée au charbon, une baisse de 1 % signifierait que le rendement passerait de 40 à 39,6 %.

L'évaluation de l'impact du système de refroidissement sur l'environnement devrait inclure l'évaluation de la consommation indirecte d'énergie. Les conséquences d'un changement de consommation indirecte d'énergie dans la consommation totale d'énergie peuvent se traduire comme une conséquence de la hausse de la température au niveau du process en raison du refroidissement insuffisant. Ce calcul a été fait, puis comparé avec les autres principales configurations de refroidissement [tm059, Paping, 1995]. Les données du Tableau 3.2 concernent la consommation directe et indirecte d'énergie et les émissions de CO₂ de chaque configuration de refroidissement. Les trois variables sont considérées comme une fonction linéaire des paramètres de conception suivants :

- le débit d'eau de refroidissement
- la pression de pompage
- le rendement du pompage (inversement proportionnel)

Dans cet exemple, les données sont calculées en prenant pour référence un système à passage unique pour chacun des procédés de refroidissement. Le système à passage unique a une capacité de 100 m³/heure par MW_{th} (ou 8,6°C par MW_{th}) ; il a besoin d'une pression de 3 bars pour pomper l'eau à la hauteur requise. Ceci nécessite environ 10 kW_e/MW_{th}/an avec un rendement de pompage de 75 %. Pour le système indirect à passage unique, une perte de charge apparaît et il faut générer 4,5 bars supplémentaires, ce qui nécessitera 15 kW_e/MW_{th}. Une tour de refroidissement nécessite de l'énergie supplémentaire pour amener l'eau à une hauteur supérieure par exemple à 8 m, en plus des 7 HMT requis dans les gicleurs. Par rapport à un système de refroidissement à passage unique, elle nécessite 4,5 bars de pression supplémentaire et 15 kW_e/MW_{th}. On considère que les ventilateurs consomment 15 kW_e/MW_{th}. S'ils ne fonctionnent qu'en été (4 mois), l'énergie moyenne requise est égale à 5 kW_e/MW_{th}.

Dans le même tableau, l'énergie indirecte est exprimée comme une fonction de l'augmentation de la température d'entrée de l'eau de refroidissement. Cela entraînera une température en hausse au niveau du procédé. Le facteur représentant cette hausse est estimé à 1,4 kW_e/MW_{th}.°C (voir Annexe II). Ainsi, pour chaque degré de hausse de la température au niveau du procédé, l'énergie nécessaire augmente d'un facteur 1,4.

Connaissant la consommation totale d'énergie pour chaque configuration de refroidissement, on peut exprimer cette consommation en niveau de CO₂ émis par MW_{th} rejeté. L'énergie requise dans la production d'électricité pour produire l'énergie consommée par un système de refroidissement peut être calculée. Avec un rendement supposé de 40 % pour générer de l'électricité, chaque kW_e intrant nécessaire au fonctionnement du système de refroidissement doit être multiplié par 2,5, traduisant l'énergie requise pour rejeter l'énergie (=refroidissement) ou kW_e par kW_e (en ‰). Pour chaque ‰, une quantité de CO₂ est émise. On part du principe d'une moyenne de 2000 (1500-2500) tonnes de CO₂ par an par MWe (en fonctionnement continu) sont émis, soit 2 tonnes CO₂/‰. (Ce chiffre provient des données relatives aux émissions néerlandaises et dépend du combustible).

Les données du Tableau 3.2 se situent dans les plages de consommations relatives d'énergie que l'on trouve généralement en comparant plusieurs systèmes de capacités de refroidissement similaires. Les données ne sont pas exactes et ne devraient pas être utilisées en tant que tel. En aucun cas, elles ne signifient qu'il faut préférer tel ou tel système à tel autre. Ce que le tableau montre de façon explicite, c'est que l'effet lié à la perte de rendement du refroidissement peut être considérable et que les conséquences dans le bilan énergétique total peuvent être tout aussi importantes. Ce tableau montre l'importance de tenir compte à la fois de la consommation directe et indirecte d'énergie lors du fonctionnement d'un système de refroidissement.

Tableau 3.2 : Exemple d'une comparaison de la demande énergétique annuelle directe et indirecte spécifique de plusieurs systèmes de refroidissement, et des conséquences pour les émissions de CO₂ par MW_{th} [tm059, Paping, 1995]

Système de refroidissement	Consommation directe spécifique d'énergie (kW _e /MW _{th})			Hausse de T des pompes (°C)	Consommation indirecte spécifique d'énergie (kW _e /MW _{th})	Consommation total d'énergie (kW _e /MW _{th})	E _{intran} par E _{rejeté} (en ‰)	CO ₂ (tonnes/an/MW _{th})
	Pompes	Ventilateurs	Total					
À passage unique - direct	10 (9-12)	-	10	0	0	10	25	50
-indirect	15 (12-18)	-	15	5	7	22	55	110
Tour de refroidissement ouverte par voie humide	15 (13-17)	5	20	5	7	27	68	136
Refroidissement hybride	15 (13-17)	8	23	5	7	30	75	150
Tour de refroidissement en circuit fermé	>15 (13-17)	8	>23	8	11	>34	>85	>170
Refroidissement par air sec	-	20	20	20	28	48	120	240

¹⁾ pour le calcul du facteur de correction, voir l'Annexe II

3.2.3 Réduction de l'énergie nécessaire au refroidissement

La réduction de l'utilisation d'énergie requise par les systèmes de refroidissement est un problème de bilan environnemental. Là encore, les mesures intégrées dans le procédé industriel pour réutiliser la chaleur réduiront les besoins de rejet de la chaleur excédentaire dans l'environnement. Si une capacité de refroidissement inférieure est requise, en général et de façon absolue il faudra moins d'énergie pour faire fonctionner le système de refroidissement. Un matériel plus efficace ainsi qu'un bon fonctionnement du système de refroidissement en évitant la hausse de température au niveau du procédé permettra d'obtenir des baisses supplémentaires.

Le choix du bon matériel ainsi qu'une conception adéquate permettront de réduire la consommation d'énergie nécessaire aux systèmes de refroidissement. C'est un problème particulièrement complexe qui met en jeu de nombreux facteurs et qu'il est difficile de généraliser. Les pratiques suivantes sont utilisées et peuvent être citées comme des options qu'il faut connaître :

4. l'agencement adéquat du système de refroidissement, à savoir, des surfaces lisses et quelques modifications du sens du flux, permettront d'éviter les turbulences et réduiront la résistance à l'écoulement du fluide de refroidissement ;
5. dans les tours de refroidissement à tirage mécanique, le choix du type, la position des ventilateurs et la possibilité d'ajuster le débit d'air permettent de réduire la consommation d'énergie ;
6. le choix du bon corps d'échange (en fonction des conditions de fonctionnement) permet de sécuriser l'échange de chaleur maximal à tout moment ;
7. le choix des éliminateurs de gouttes avec une résistance minimale au débit d'air.

Les changements de matériaux et de conception ne semblent pas être des options économiques permettant de réduire les besoins énergétiques des systèmes existants, notamment des gros systèmes. Le remplacement des éléments internes de la tour de refroidissement (ventilateurs, corps d'échange et éliminateurs de gouttes) est une option dans certains cas. Pour les systèmes plus petits tels que les systèmes de refroidissement humides ouverts et fermés qui sont sur le marché sous forme de produits préassemblés, un changement du système de refroidissement est techniquement plus facile.

Un bon exemple de l'effet de la conception est l'utilisation de piliers de soutien lisses (à ailettes) à l'entrée d'une grande (178 m) tour de refroidissement à tirage naturel équipant une centrale nucléaire. La conception améliore le débit d'air et réduit la perte de charge en permettant d'obtenir une température plus froide de 0,3°C ; sachant qu'une baisse de 1°C représente une économie de 250 000 €/an.

Il y a très peu de retours sur les options permettant de réduire la consommation d'énergie sur une tour de refroidissement en optimisant l'efficacité énergétique des ventilateurs, ou par un fonctionnement plus flexible. Dans les informations des fournisseurs, des données sont disponibles sur les différents types de ventilateurs et leurs besoins énergétiques. Il existe des ventilateurs qui peuvent fonctionner à des vitesses variables [tm97, Immel, 1996] ou il peut être conseillé d'utiliser un système à ventilateurs multiples pour gagner en flexibilité dans l'ajustement du débit d'air requis.

Concernant l'effet des éliminateurs de gouttes sur la performance des ventilateurs liée à la baisse de perte de charges, [tm092, Becker et Burdick, 1994], on peut conclure qu'il existe des différences entre les différentes conceptions d'éliminateurs, et que leur effet sur la performance des ventilateurs requière une attention particulière, tenant compte des systèmes dans leur contexte global. Cela signifie qu'il faut faire une évaluation complexe impliquant la configuration de la tour et la distribution du flux à travers le ventilateur et l'éliminateur de gouttes. À partir de là, une comparaison très utile entre les différentes conceptions de ventilateur pourra être faite.

Des exemples de modification du corps d'échange de la tour de refroidissement ont montré des hausses considérables de l'efficacité de l'échange de chaleur, abaissant la température de l'eau de refroidissement quittant la tour et permettant un meilleur refroidissement ([tm034, Hobson et al., 1995], [tm041, Burger, 1994], [tm117, Remberg et Fehndrich, 1993]).

L'amélioration de l'efficacité du corps d'échange optimisera le refroidissement du fluide dans l'échangeur de chaleur. Par conséquent, le fonctionnement du ventilateur pourra être réduit tout en permettant d'obtenir le même niveau de refroidissement que précédemment. Avec un niveau de fonctionnement inchangé, la puissance de refroidissement sera supérieure. L'utilisation d'une mauvaise configuration de corps d'échange peut créer des résistances non nécessaires à l'écoulement de l'air, mais la géométrie de la tour est également importante. Des corps d'échange denses créent des pertes de charges plus importantes et nécessitent en principe une énergie pour le tirage

plus importante. Les corps de type gouttes entraînent une perte de charge plus faible. Toutefois, en raison de leur plus faible efficacité, ce garnissage nécessite des tours plus importantes ou davantage de cellules, qui n'est pas compensé par le gain énergétique pour le fonctionnement du ventilateur.

Des expériences pratiques montrent un effet évident de la maintenance sur la réduction de la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement des systèmes de refroidissement. En général, pour les systèmes refroidis à l'eau, cela consiste à adopter un traitement approprié à chaque système pour réduire la résistance dans le système liée à l'entartrage, à la corrosion, à l'encrassement, etc. Le système de traitement permettra de garder une surface lisse dans les échangeurs, les conduites et le garnissage des tours de refroidissement. Cela empêchera la résistance au débit d'eau, réduira la puissance de pompage requise et optimisera l'échange de chaleur. Un traitement approprié de l'eau de refroidissement (voir Section 3.4), en équilibrant l'utilisation d'additifs à l'eau de refroidissement par rapport à la hausse de la température de procédé, réduira la consommation directe et indirecte d'énergie. Aucune quantification de la réduction du kW_e par MW_{th} rejeté suite à l'optimisation de la maintenance n'a été faite.

3.3. Consommation et émission de l'eau de refroidissement

3.3.1 Consommation d'eau

3.3.1.1 Prise d'eau et besoins en eau

L'eau est un élément important des systèmes de refroidissement, notamment pour les gros systèmes à passage unique, tandis que pour les systèmes à air sec elle n'a aucune importance. L'eau de surface, l'eau souterraine et l'eau potable sont utilisées. En principe, l'eau salée, l'eau saumâtre et l'eau fraîche peuvent être utilisées à des fins de refroidissement. L'eau salée est disponible en grande quantité sur les côtes, mais sa corrosivité est un inconvénient. L'utilisation des eaux souterraines à des fins de refroidissement devrait se réduire dans les années à venir, car l'utilisation des nappes phréatiques pour des utilisations telles que le refroidissement par exemple sera de moins en moins autorisée, sauf si elle combinée avec l'extraction indispensable des eaux souterraines associée à d'autres besoins. Des exemples sont l'abaissement du niveau des eaux souterraines pour l'exploitation des mines à ciel ouvert ou de l'eau provenant des stations de pompage destinées à l'hydroélectricité. La disponibilité réduite de l'eau souterraine pourrait entraîner une hausse de la consommation de l'eau de surface pour le refroidissement.

L'utilisation et la consommation d'eau sont des expressions que l'on utilise pour désigner les exigences des systèmes de refroidissement humides. L'utilisation d'eau signifie que le même volume d'eau de refroidissement chauffée est redirigé vers la source à partir de laquelle elle a été prélevée (systèmes à passage unique). La consommation en eau signifie que seule une partie de l'eau utilisée pour le refroidissement (purge des systèmes à circulation forcée) est redirigée dans l'eau de réception, le reliquat ayant disparu par évaporation et drainage au cours du procédé de refroidissement. La consommation est particulièrement importante lorsque l'eau souterraine est utilisée à des fins de refroidissement dans des zones sensibles à la sécheresse.

Le volume d'eau utilisé est étroitement lié au type d'industrie concerné. Différentes sources montrent que l'utilisation d'eau pour le refroidissement en Europe est considérable [Correia, 1995]. En général, la part la plus importante de l'eau de surface est utilisée par les centrales électriques. Le reste est utilisé par un petit nombre d'industries plus importantes, dont l'industrie chimique est la plus représentée.

Le volume d'eau requis varie entre les différents systèmes de refroidissement (Tableau 3.3). Pour les systèmes à passage unique (direct et indirect), l'utilisation d'eau dépend de :

- des exigences du procédé (condenseur)
- de la température de l'eau d'appoint
- de la hausse de température maximale autorisée de l'eau de réception
- de la température maximale autorisée de l'eau de refroidissement qui est rejetée.

Tableau 3.3 : Besoins en eau des différents systèmes de refroidissement [tm001, Bloemkolk, 1997]

Système de refroidissement	Utilisation moyenne d'eau [m ³ /h/MW _{th}]	Utilisation relative d'eau [%] ¹
Système à passage unique – direct	86	100
Système à passage unique – indirect	86	100
Tour de refroidissement ouverte par voie humide - direct	2	2,3
Tour de refroidissement ouverte par voie humide - indirect	2	2,3
Tour de refroidissement ouverte (hybride) par voie humide/sèche	0,5	0.6
Tour de refroidissement par voie humide en circuit fermé	variable	Variable
Tour de refroidissement par air sec en circuit fermé	0	0
Tour de refroidissement par voie humide/sèche en circuit fermé	1,5	1,7
¹ hypothèse : capacité de refroidissement ΔT 10 K tour de refroidissement ouverte par voie humide : cycles de concentration entre 2 et 4 refroidissement ouvert par voie humide/sèche : 75 % fonctionnement par voie sèche Tour hybride en circuit fermé : fonctionnement par voie sèche allant de 0 à 25 %		

Dans les systèmes ouverts à circulation forcée, les tours de refroidissement par voie humide en circuit fermé et les tours de refroidissement par voie humide/sèche en circuit fermé, la plus grosse partie de l'eau est recyclée et la chaleur est rejetée dans l'atmosphère essentiellement par évaporation. Dans ces systèmes, l'utilisation d'eau varie considérablement et aucune donnée spécifique n'est disponible car la performance dépend du facteur de concentration utilisé (régulé par la purge), de l'évaporation et, dans une moindre mesure, de la température ambiante.

Les tours de refroidissement indirectes par voie sèche en circuit fermé peuvent utiliser de l'eau comme fluide de refroidissement secondaire, mais cette utilisation n'est pas vraiment significative par rapport à celle des systèmes de refroidissement humides. En principe, le réapprovisionnement ou l'appoint d'eau ne sont nécessaires qu'en cas de fuite, au niveau des ensembles de pompes, des brides ou vannes ou lorsque l'eau a été drainée pour permettre de réparer le système par exemple. Dans ce contexte, les quantités sont très petites on peut utiliser de l'eau potable ou même déminéralisée de façon économique.

Législation

Dans les états membres, différentes autorités s'occupent de l'eau comme une ressource ou comme un environnement de réception. Dans tous les cas, l'eau devrait faire partie d'une autorisation environnementale intégrée, notamment lorsque son approvisionnement est limité. Dans l'ensemble de l'Europe, on s'attend à ce que la pression sur les ressources en eau de bonne qualité augmente la pression sur les mesures de conservation de l'eau dans les systèmes de refroidissement, en limitant les volumes d'extraction autorisés d'une source donnée. En ce qui concerne l'utilisation de l'eau, la principale législation au niveau européen est la Directive Cadre sur l'Eau. Elle s'intéresse à la qualité de l'eau, et au statut quantitatif de l'eau souterraine défini en termes d'effet sur le niveau d'eau souterraine sur les écosystèmes de surface associés, et en termes de viabilité de l'approvisionnement en eau. Au niveau national, certains états membres ont une législation spécifique en ce qui concerne la prise et l'utilisation d'eau de surface.

Effets croisés

Le problème posé par la restriction de l'eau est lié aux aspects environnementaux suivants :

- l'émission de chaleur dans les eaux de surface,
- l'utilisation d'additifs dans l'eau de refroidissement,
- la consommation d'énergie du système de refroidissement et du procédé de production,
- les émissions indirectes.

Chacun de ces facteurs doit être évalué pour permettre de savoir si la réduction des besoins en eau pour le refroidissement est la meilleure solution. Les paragraphes suivants tentent de décrire les options de techniques de réduction utilisées et leurs effets croisés.

3.3.1.2 Techniques utilisées pour réduire la consommation en eau

La réduction de la consommation en eau pour le refroidissement est d'un intérêt particulier lorsque la disponibilité en eau est faible pour des raisons naturelles ou écologiques. Des zones sensibles à la sécheresse ou des zones avec de faibles pluies saisonnières peuvent être concernées. Le danger de l'épuisement des ressources en eau souterraine et des situations avec d'importants besoins en eau de refroidissement, lorsque les besoins approchent ou pourraient dépasser le débit de la rivière, ou lorsque les émissions de chaleur dans les eaux de surface sont restreintes sont d'autres exemples types.

1. Technologie de refroidissement

Afin de réduire la quantité d'eau nécessaire aux systèmes de refroidissement, le choix du système est important. Dans une situation entièrement nouvelle, on suggère d'envisager le refroidissement par air, en utilisant des tours de refroidissement ouvertes par exemple. Pour les systèmes importants, la puissance de refroidissement requise pourrait limiter les options pour le refroidissement par air sec, car elle requiert une surface d'échange de chaleur importante. Dans la mesure du possible, il faut veiller au changement global d'efficacité, à la hausse des coûts de fonctionnement du ventilateur et aux coûts d'insonorisation. L'utilisation de systèmes de refroidissement par air sec entraîne généralement une baisse de rendement du procédé. Par conséquent, les systèmes par voie humide doivent être privilégiés. Seulement dans le cas où aucun approvisionnement en eau (eau d'appoint) n'est possible, le refroidissement par voie sèche est inévitable.

Pour les systèmes à passage unique existants, l'utilisation de systèmes à circulation forcée (tours de refroidissement ouvertes par voie humide) est une option utilisée pour réduire les besoins en eau. Les tours équipées d'éliminateurs de gouttes sont une technique standard permettant de réduire davantage la perte en eau par évaporation. En général, la recirculation forcée signifie qu'il faut prendre des mesures pour protéger les surfaces des échangeurs de chaleur contre l'entartrage ou la corrosion. D'autre part, l'utilisation de la recirculation de l'eau de refroidissement signifie en même temps une réduction des émissions de chaleur dans les eaux de surface.

2. Fonctionnement des systèmes

Dans les systèmes de refroidissement humides à circuit fermé, il est courant d'augmenter le facteur de concentration en réduisant la fréquence des purges. Plus l'eau est propre et plus il sera facile par la maintenance d'une tour de refroidissement ouverte par voie humide de réduire la contamination de l'eau de refroidissement, ce qui pourra permettre un nombre plus élevé de cycles et diminuer par conséquent la fréquence des purges. En augmentant les cycles de concentration, on augmente généralement les besoins en substances chimiques contre l'encrassement pour permettre des concentrations en sels plus élevées sans risque de dépôt. Plusieurs rapports présentent des programmes de traitement d'eau conçus notamment pour fonctionner avec des cycles de concentration plus élevés, permettant de réduire les besoins en eau et le volume de purge [tm094, Alfano et Sherren, 1995]. Sous contrôle des conditions d'autorisation, il faut faire attention à l'augmentation potentielle de la concentration des éléments dans la purge.

Une analyse critique des résultats de maximisation des cycles des tours de refroidissement et des problèmes rencontrés est donnée dans [tm095, Cunningham, 1995]. La conclusion est que la capacité à augmenter le nombre de cycles dépend de plusieurs facteurs chimiques et physiques (par exemple la température de l'eau, le pH, la vitesse de l'eau) et nécessite un haut niveau d'expertise. Étant donné les conditions de fonctionnement et la composition chimique de l'eau, il sera difficile de prévoir le maximum de cycles de concentration, et il faut veiller à prendre en compte les coûts impliqués avant que le système de refroidissement ne puisse fonctionner de façon économique.

3. Techniques additionnelles

Pour les systèmes à circuit fermé, en utilisant des quantités d'eau relativement limitées, plusieurs techniques supplémentaires sont appliquées. Ces techniques visent à améliorer la qualité de l'eau de refroidissement. Le prétraitement de l'eau de refroidissement (tel que la floculation, la précipitation, la filtration ou la technologie membranaire) peut réduire les besoins en eau, d'où une purge moins importante pour maintenir le même facteur de concentration. Les traitements de l'eau produiront toutefois des boues qui devront être traitées (voir Annexe IV sur la purge).

Le bassin d'évaporation est une technique toujours utilisée sur d'anciens sites, et fait l'objet d'autres développements. Il peut être utilisé pour empêcher les émissions de chaleur dans les eaux de surface, pour prérefroidir l'eau de refroidissement avant son rejet, mais pourrait servir de façon similaire comme une tour de refroidissement faisant partie de la circulation totale. Dans un bassin d'évaporation, l'eau est refroidie en la pulvérisant sur un vaste périmètre, créant une surface importante de refroidissement ; elle pourra ensuite être réutilisée (Annexe XI). Il faut être vigilant vis-à-vis des risques microbiologiques liés à la formation d'aérosols (voir 3.7.3).

On peut également réduire la demande de ressources en eau en reliant les flux d'eau de différentes unités industrielles sur un ou plusieurs sites. Cette méthode de conservation de l'eau peut être efficace, mais elle nécessite

une attention particulière. Une évaluation des alternatives pour la conservation de l'eau pour les sites industriels, [tm065, Meier et Fulks, 1990], contient plusieurs aspects importants qu'il faudrait prendre en compte :

1. un relevé des ressources en eau disponibles et leur composition chimique ;
2. une évaluation des quantités de ces sources et leur fluctuation ;
3. une évaluation des contaminants et des traitements des sources d'eau ;
4. l'effet des programmes de traitement des ressources en eau sur les méthodes de conditionnement de l'eau de refroidissement ;
5. l'effet des hausses potentielles de la conductivité de l'eau recyclée sur le procédé où l'eau est utilisée ;
6. les options du programme de traitement chimique pour les systèmes de refroidissement ;
7. le facteur économique des méthodes de réutilisation alternatives.

Les facteurs énumérés précédemment affectent le choix des sources en eau et la quantité d'eau pouvant être réutilisée. Les ressources en eau sur le site sont en principe les purges provenant des tours de refroidissement et des chaudières. L'effluent de la station d'épuration municipale est également utilisé. Dans tous les cas, il est important d'éviter un besoin accru de programmes de traitement de l'eau plus complexes afin de permettre de réutiliser de l'eau (Annexe XI). La réutilisation de la purge des bassins d'évaporation est également possible dans les applications qui ne sont pas sensibles à la salinité accrue de l'eau.

Le système à zéro rejet peut être obtenu en traitant et en réutilisant la purge. Les coûts d'élimination de la boue obtenue doivent être évalués par rapport aux coûts environnementaux de conditionnement et de rejet de la purge (Annexe XI).

3.3.2 Entraînement des poissons

3.3.2.1 Niveau d'entraînement

Avec une prise d'eau importante comme celle des systèmes de refroidissement à passage unique, la prise et l'entraînement de poissons pose problème. Les poissons entraînés (essentiellement des larves de poissons qui passent au travers des tamis au niveau de la prise d'eau, des pompes et des condenseurs) ne sont généralement pas prélevés. L'entraînement est une préoccupation locale et le nombre de poissons entraînés se base sur des facteurs complexes techniques et hydrobiologiques qui amènent à proposer une solution propre à chaque site. L'eau est aspirée dans les conduites d'arrivée d'eau en grandes quantités et à une vitesse considérable. Les conduites d'eau sont généralement munies de filtres à débris pour protéger les échangeurs de chaleur contre les colmatages et les dommages mécaniques. La capture se produit lorsque le poisson est coincé contre les tamis placés sur les condenseurs ou les échangeurs de chaleur. Un grand nombre de petites créatures sont prises avec l'eau de refroidissement, puis tués par dommage mécanique, c'est ce que l'on appelle l'entraînement.

Peu de données concernant les quantités de poisson prises avec l'eau de refroidissement ou prises à l'entrée d'un système de refroidissement sont disponibles. Les résultats d'échantillons sur 24 heures ont été analysés : ils concernent le nombre de poissons entraînés par l'eau de refroidissement d'une centrale électrique des Pays-Bas de 600 MWe [KEMA, 1992] sur le Rhin, avec un flux d'eau de refroidissement de 22 – 25 m³/s. Les résultats montrent que le nombre de poissons entraînés varie significativement selon les années et les saisons. La plupart des poissons ont été trouvés en été.

Des études concernant une centrale électrique à l'intérieur des terres sur la rivière Trent en Angleterre, d'une puissance de 2000 MW, ont montré que la plus grande partie des poissons avait été entraînée au moment du crépuscule ou à la nuit tombée et en été. La centrale électrique ne possède pas de système de refroidissement à passage unique et aucune preuve n'a été trouvée concernant un entraînement significatif. Cela a également été le cas dans une autre centrale électrique similaire sur la Tamise [Carter et Reader, à paraître]. Les filets des deux centrales ont une largeur de mailles d'environ 9 mm. Des recherches sur les poissons entraînés et pris dans neuf centrales électriques néerlandaises ont montré que plus de 95 % des poissons pris étaient nés au printemps de la même année et avaient une taille de moins de 10 cm. Ce résultat est confirmé par les résultats de la centrale électrique évoquée précédemment sur le fleuve Trent, même si la mortalité atteignait 100 % tandis qu'il y avait une mortalité négligeable des poissons par rapport à la mortalité naturellement observée [Carter et Reader, à paraître].

Il y a également des variations dans le nombre de poissons entraînés et les espèces entraînées entre les différentes centrales électriques. Les résultats d'un programme d'échantillonnage auprès de six centrales électriques néerlandaises situées sur le Rhin, la Meuse et leurs affluents montrent des variations entre les espèces entraînées (entre 12 et 25 espèces) et le nombre de poissons pris dans les tamis (entre 0,02 et 2,45 poissons pour 1 000 m³ d'eau

de refroidissement en moyenne sur une année) [Hadderigh et al., 1983]. Concernant les centrales électriques situées à proximité des lacs, des estuaires et des côtes, le nombre de poissons pris peut être bien plus élevé qu'avec les centrales électriques situées près des rivières, pouvant atteindre jusqu'à 25 poissons pour 1 000 m³ [KEMA, 1982].

Tableau 3.4 : Taux d'entraînement des poissons (FIR) dans les centrales électriques. Prises annuelles normalisées avec le flux d'eau de refroidissement [tm164, Travade, 1987] et [tm165, Turnpenny et al, 1985]

Eau	Centrale électrique	Puissance (MW _e)	FIR (kg/10 ⁶ m ³)
Mer du Nord	Sizewell A	480	73
	Kingsnorth	2000	4.4
	Dunkerque	600	19
	Gravelines	5400	48
Manche	Dungeness A	410	190
	Dungeness B	1200	40
	Paluel	5200	43
	Fawley	2000	19
Canal de Bristol	Hinkley B	1300	24
Estuaires	Le blayais	3600	79
Fleuves	Loire (St Laurent A)	1000	1.8

3.3.2.2 Techniques de réduction utilisées

Plusieurs techniques ont été développées et sont utilisées dans l'industrie pour empêcher la prise de poissons liée à une prise d'eau importante, avec des résultats variables. Les solutions optimales, les résultats obtenus et la capacité à satisfaire les exigences MTD sont influencées par un grand nombre de facteurs biologiques, environnementaux et d'ingénierie qui doit être évalué au cas par cas pour chaque site. Il est donc impossible de comparer les différentes techniques.

1. Technologie de refroidissement

Il n'a été fait état d'aucune modification de technologie visant spécifiquement à empêcher l'entraînement des poissons. Bien entendu, l'entraînement des poissons ne sera pas un problème lors du passage à un système ouvert ou fermé à circulation forcée, qui est une opération coûteuse. Il peut être traité dans le cas d'une nouvelle installation. Des dispositifs visant à empêcher la prise de poissons peuvent être rencontrés dans les centrales électriques ou les raffineries par exemple. Les solutions de prévention sont :

- des dispositifs sonores : les résultats sont probants pour éloigner les bancs de poissons à écailles, mais pas les anguilles ;
- des systèmes d'éclairage avec des lampes sous-marines : les résultats sont probants pour éloigner les anguilles ;
- la position, la profondeur et la conception de la prise d'eau ;
- les limites de la vitesse du débit d'eau (même si les données provenant des études menées en Angleterre indiquent que les poissons se laissent entraîner par le flux, en se décalant délibérément ou en se dispersant, même s'ils sont physiquement capables de s'échapper du flux en nageant) ;
- la taille des mailles des treillis (contre les dommages causés au système de refroidissement). Les observations ont montré que, dans la même centrale électrique, une taille de mailles de 5 mm x 5 mm en moyenne double le nombre de poissons entraînés qui survivent à la sortie de l'eau de refroidissement, par rapport à une taille de treillis de 2 mm x 2 mm, car la mortalité des larves de poissons par coincement est supérieure à la mortalité liée à l'entraînement [KEMA, 1972] et [Hadderigh, 1978].

La mortalité des poissons par coincement peut être réduite par un bon système de nettoyage des poissons à partir des treillis de la prise d'eau et qui les ramènera dans l'eau de surface.

2. Pratique de fonctionnement et techniques au point de rejet

La réduction de la vitesse du flux entrant à environ 0,1-0,3 m/s a clairement permis d'obtenir un effet positif et la réduction de la quantité de poisson capturée. Toutefois, la réduction de la vitesse peut rendre nécessaire l'utilisation de canaux d'entrée plus larges, ce qui peut avoir des conséquences techniques et financières. En général, le changement de pratique de fonctionnement ou l'utilisation de techniques au point de rejet ne s'appliquent pas à

l'entraînement de poissons, mais selon un certain point de vue, que tout le monde ne partage pas, l'entraînement pourrait être réduit en prenant en compte les caractéristiques diurnes et saisonnières de l'entraînement.

Tableau 3.5 : Technologies disponibles pour la protection des poissons dans les dispositifs de prise d'eau de refroidissement

Source [tm152, Taft, 1999]

Catégorie	Technique de protection	Effets	Remarques
Systèmes de collecte des poissons	Optimisation (augmentation) de la taille de treillis des écrans d'eau mobiles	Améliore la survie des larves de poissons entraînées et des jeunes poissons	La mortalité liée à l'entraînement des jeunes poissons est inférieure à la mortalité par collision de ces jeunes poissons.
	Les jets d'eau à faible pression utilisés pour lessiver les poissons provenant des écrans mobiles et les renvoie à la surface de l'eau	Transport des poissons vers l'eau de surface	Nécessite un second système de jets à haute pression pour nettoyer les écrans mobiles
	Seaux à poissons sur les écrans	Améliore la survie des poissons entrant en collision	Les poissons restent en permanence dans l'eau au cours du transport vers l'eau de surface
	Rotation continue des écrans mobiles	Améliore la survie des poissons entrant en collision	Réduction de la durée de collision
	Pompes à poissons	Transport des poissons vers l'eau de surface	Il est difficile de maintenir de bonnes conditions dans les tuyaux
Systèmes de diversion des poissons	Écrans à angle droit ou louvres avec une passe pour les poissons	<ul style="list-style-type: none"> - La survie des espèces les plus robustes (50-100 %) > espèces fragiles - Ne concerne pas les œufs de poisson, les larves et les petits invertébrés 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite un flux lent, constant et uniforme - Les débris doivent être enlevés
Barrières Comportementales	Lampes <ul style="list-style-type: none"> - gyroscopiques - continues - au mercure - autres 	Les effets des différents systèmes d'éclairage dépend de la situation locale, des espèces de poisson et du stade de développement du poisson.	Dans de nombreuses situations, un chemin pour les poissons déviés est nécessaire
	Son	Les effets dépendent de la situation locale, des espèces de poisson et du stade de développement du poisson.	Dans de nombreuses situations, un chemin pour les poissons déviés est nécessaire

3.3.2.3 Coûts des dispositifs sonores et des systèmes d'éclairage

Il est évident que n'importe quel changement apporté à un système existant sera coûteux. L'industrie de production d'électricité a annoncé des coûts supplémentaires liés à la technologie de protection des poissons appliquée aux installations existantes situés entre 40 000 et 200 000 euros, coûts d'immobilisation inclus. Dans des installations nouvelles, l'investissement supplémentaire généré par les dispositifs de prise d'eau alternatifs serait probablement moins important.

Pour une bonne efficacité, le courant d'eau à travers les dispositifs sonores et les systèmes d'éclairage ne doit pas être supérieur à 0,3 – 0,5 m/s. Cela détermine la longueur des systèmes.

Les coûts de matériaux et de construction d'un système d'éclairage se situent entre 90 000 et 140 000 euros pour une longueur de 100 m, et un système sonore (BAFF) coûte environ 180 000 EUR pour 100 m.

3.3.3 Émission de chaleur dans l'eau de surface

3.3.3.1 Niveaux d'émission de chaleur

Toute la chaleur qui est rejetée finira dans l'air. Si l'eau est utilisée comme un fluide de refroidissement intermédiaire, toute la chaleur sera rejetée dans l'air, soit à partir des gouttelettes d'eau dans la tour de refroidissement, soit à partir de la surface de l'eau de réception. Avant que la chaleur ne quitte l'eau de surface, elle peut affecter l'écosystème aquatique, ce qu'il faudrait éviter.

Les émissions de chaleur sont également un problème étroitement lié à la quantité d'eau de refroidissement utilisée et rejetée. Les systèmes à passage unique, qu'ils soient directs ou indirects, forment par définition la source la plus importante de chaleur rejetée dans l'eau de surface, puisque la chaleur est entièrement rejetée via l'eau de refroidissement. L'eau de refroidissement dans les systèmes à circuit fermé libère la plus grande partie de sa chaleur via la tour de refroidissement dans l'air. La quantité de chaleur rejetée via le drainage de la tour de refroidissement représente environ 1,5 % de la chaleur à évacuer, alors qu'environ 98,5 % est émise dans l'air. Il existe peu d'informations sur les effets des émissions de chaleur sur l'écosystème aquatique, mais des expériences ont été conduites avec des températures estivales élevées et de petits cours d'eau de réception. La hausse de température entraînerait une augmentation des taux de respiration et de production biologique (eutrophisation). Les rejets d'eau de refroidissement dans l'eau de surface influencent l'environnement aquatique dans son ensemble, et notamment les poissons. La température a un effet direct sur toutes les formes de vie et leurs physiologies respectives, ainsi qu'un effet indirect car elle affecte l'équilibre en oxygène.

Le réchauffement réduit la valeur de saturation en oxygène ; avec une concentration élevée en oxygène, cela entraîne un niveau réduit en oxygène. Le réchauffement accélère également la dégradation microbienne des substances organiques, entraînant une consommation accrue d'oxygène. De plus, lorsque la circulation de l'eau de refroidissement se produit ou lorsque plusieurs industries utilisent la même source limitée d'eau de surface, les émissions de chaleur nécessitent une attention particulière pour empêcher les interférences avec le fonctionnement des procédés industriels en aval.

À partir de la capacité calorifique de l'eau s'élevant à environ 4,2 kJ/kg/K, la hausse de température de l'eau peut être calculée. Par exemple, lorsque l'eau de refroidissement est réchauffée d'une moyenne de 10K, 1 MW_{th} de chaleur requiert un flux d'eau de refroidissement d'environ 86 m³/heure. D'une façon générale, chaque kW_{th} nécessite 0,1 m³/heure d'eau de refroidissement. Avec un circuit fermé d'eau de refroidissement, la chaleur est rejetée dans l'air par évaporation dans la tour de refroidissement, avec la chaleur latente d'évaporation se situant à 2 500 kJ/kg (à 20°C).

Dans l'industrie de production électrique notamment, les facteurs qui jouent un rôle dans le rejet de quantités de chaleur importantes dans l'eau de surface ont été analysés. Plusieurs phénomènes physiques doivent être pris en compte lorsqu'on évalue les émissions de chaleur :

- les variations saisonnières de la température de l'eau de réception ;
- les variations saisonnières du niveau d'eau des rivières et leur vitesse d'écoulement ;
- l'importance du mélange de l'eau de refroidissement rejetée avec l'eau de réception (champs proche et lointain) ;
- pour les sites côtiers, les mouvements des marées ou les courants forts et
- la convection dans l'eau et dans l'air.

Le comportement du panache d'eau chaude dans l'eau de surface servira non seulement à protéger l'environnement de réception, mais également à choisir le bon endroit pour l'entrée et la sortie. Il sera toujours important d'empêcher la circulation du panache d'affecter la température de l'eau d'appoint et par conséquent l'efficacité du système de refroidissement. À titre d'exemple, l'étendue d'un panache thermique définie comme étant la zone de réchauffement isotherme de 1K sans se mélanger avec les courants forts (par exemple, dans un lac) est d'environ 1 ha par MWe pour une centrale électrique classique, soit d'environ 45 km² pour une centrale électrique de 5 000 MWe. Pour une description plus détaillée du comportement du panache de chaleur, voir l'Annexe XII.

3.3.3.2 Obligations réglementaires sur les émissions de chaleur

Obligations concernant les organismes spécifiques aux eaux douces

La Directive Européenne 78/659/EEC (18 juillet 1978) définit les normes de qualité environnementales relatives à certaines substances et concernant les rejets de chaleur dans les pêcheries en eau douce. La directive reconnaît les conditions locales dans une clause de l'Article 11 en ce qui concerne les dérogations des états membres.

Lorsque les exigences thermiques dépendent des espèces de poissons, on distingue deux types d'organismes en fonction de leur population :

- les eaux salmonicoles
- les eaux cyprinicoles.

Pour chaque système écologique, trois paramètres thermiques sont utilisés :

- la température maximale de l'eau à la limite de la zone de mélange
- la température maximale au cours de la période de reproduction des « espèces en eaux froides »
- la hausse maximale de la température.

Tableau 3.6 : Obligations au niveau des températures de l'eau pour deux systèmes écologiques

(Directive Européenne 78/659/EEC)

Paramètre	Eaux salmonicoles	Eaux cyprinicoles
T_{\max} à la limite de la zone de mélange (°C)	21,5	28,0
T_{\max} au cours de la période de reproduction des espèces en eau froide (°C)	10,0	10,0
ΔT_{\max} (°C) à la limite de la zone de mélange	1,5	3,0
Remarque : Les limites de température peuvent être au maximum dépassées pendant 2 % de la durée totale.		

Autres organismes des eaux de réception

Dans les états membres, les émissions de chaleur dans l'eau de surface sont régulées de différentes façons, selon les conditions écologiques et d'autres facteurs tels que : la sensibilité de l'eau de surface de réception ; les conditions climatiques locales ; la capacité du réservoir à s'accommoder des décharges thermiques, les courants et les vagues dominantes (hydrodynamique de l'eau). Les réglementations considèrent souvent les émissions de chaleur par rapport à l'eau de surface de réception. Exemples :

- la normalisation de la température maximale de rejet (par exemple, 30°C en été dans les climats tempérés et 35°C dans les pays chauds),
- la limitation de la température maximale de chauffe par rapport à la prise d'eau et aux écarts saisonniers de température (par exemple, ΔT_{\max} de 7-10K mesurés sur l'ensemble de la distance du circuit de refroidissement dans le procédé de production)
- le paramétrage d'un profil de température maximale acceptable par l'eau de surface, et la capacité totale de refroidissement disponible de l'eau de surface.

Ces obligations sont spécifiées dans les autorisations d'exploitation.

Les autres législations ne préconisent pas une température généralement fixe de rejet. Initialement, la température limite de rejet correspond au type de système de refroidissement. De plus, la variation saisonnière de la température de l'eau de surface joue un rôle important dans la définition de la température de rejet autorisée. Certaines autorités régionales peuvent également classer les eaux de réception en utilisant les caractéristiques de leurs faunes respectives.

3.3.3.3 Techniques de réduction utilisées

1. Technologie de refroidissement

La meilleure façon de minimiser les émissions de chaleur consiste à réduire les besoins de rejet en optimisant le process primaire de fabrication, ou en recherchant des consommateurs pour la chaleur à évacuer. En cas de rejets de chaleur dans l'environnement, il faut s'intéresser en particulier au problème des émissions de chaleur dans les eaux de surface. Lors du choix des techniques de réduction, il est important de réaliser qu'au final toute la chaleur finira dans l'air, et que l'eau de surface n'est qu'un support intermédiaire. On peut choisir entre les différents systèmes de refroidissement lequel est préférable. Donc, l'impact environnemental des rejets de chaleur peut être minimisé en rejetant davantage de chaleur dans l'atmosphère et moins de chaleur dans les eaux de surface, au détriment de la perte en eau liée à l'évaporation. La minimisation des rejets de chaleur dans les eaux de surface est liée à la minimisation de l'utilisation de l'eau et à l'efficacité énergétique globale. Plus la chaleur rejetée par convection et évaporation est importante, plus la quantité d'énergie par MW_{th} rejeté sera importante en raison de l'utilisation des ventilateurs, sauf si la ventilation naturelle est utilisée. Cela nécessite généralement des investissements importants et un espace important.

Pour les puissances importantes, une solution très répandue pour réduire la décharge thermique dans les eaux de surface (principalement les rivières et les lacs) est de choisir une technologie de transfert de chaleur adéquate, par exemple un système à passage unique à la place d'un système à circuit fermé avec une tour ouverte humide ou hybride.

2. Pratique fonctionnelle

Aucune option de fonctionnement n'est indiquée pour prévenir ou réduire le rejet de chaleur dans les eaux de surface.

3. Techniques complémentaires

Une ancienne pratique toujours utilisée en Europe, mais à une très petite échelle et suscitant depuis peu un intérêt nouveau, est l'utilisation de bassins d'évaporation (par pulvérisation). Pour optimiser le refroidissement de l'eau, l'angle de la pulvérisation et la durée allouée pour que l'eau reste dans le bassin avant qu'elle ne pénètre à nouveau dans le circuit de refroidissement sont importants, si la surface disponible est suffisante. Pour évaluer cette technique, il faudrait la comparer avec une tour de refroidissement ayant une puissance similaire. Il faut notamment prêter attention à :

- la surface requise,
- la perte en eau liée à l'évaporation,
- l'utilisation d'énergie,
- les besoins en traitement d'eau, ainsi que
- les risques microbiologiques dus à la formation d'aérosols (voir également la Section 3.7.3).

Une autre technique de traitement au point de rejet est le pré-refroidissement des rejets des grosses centrales électriques en utilisant une tour de refroidissement. C'est une technique coûteuse où la circulation des rejets dans l'eau de surface peut influencer la température de prise de l'eau de refroidissement au niveau du point d'entrée. Les coûts supplémentaires liés à la tour de refroidissement supplémentaire ainsi qu'à la perte en eau imputable à l'évaporation devront être comparés aux coûts liés à une baisse de rendement avec une température de prise d'eau plus élevée.

Une mesure suggérée également afin de réduire l'effet du rejet de chaleur consiste à concevoir la sortie d'eau du système de refroidissement de telle manière que par turbulence, l'eau perdra un peu de chaleur au cours du rejet. Un effet secondaire de cette mesure est une hausse de la teneur en oxygène de l'eau de refroidissement, compensant la perte en oxygène imputable aux températures de l'eau de refroidissement plus élevées. Aucune donnée n'est encore disponible et on peut également s'interroger sur l'impact de cet effet.

3.4. Émissions provenant du traitement de l'eau de refroidissement

Les émissions provenant du traitement de l'eau de refroidissement dans l'eau de surface sont considérées comme l'un des problèmes les plus importants des systèmes de refroidissement. On distingue quatre sources d'émissions dans l'eau de surface résultant des systèmes de refroidissement par voie humide :

- les produits chimiques du process et leurs réactifs, en raison des fuites ;
- les produits de corrosion en raison de la corrosion du matériel du système de refroidissement ;
- les additifs à l'eau de refroidissement utilisés et leurs réactifs ;
- les substances en suspension.

Pour contrôler ces émissions, différentes techniques sont utilisées. Il est possible de réduire le risque de fuite ainsi que la possibilité d'émissions non contrôlées après les fuites. Il est également possible de choisir le matériau le plus approprié pour réduire la corrosion des équipements. Cette partie s'intéressera aux mesures permettant de réduire la quantité et l'impact des émissions dues à l'utilisation d'additifs dans l'eau de refroidissement :

- en réduisant le besoin de traitement d'eau ;
- en sélectionnant les traitements chimiques qui auront un impact plus faible sur l'environnement ;
- en utilisant les substances chimiques de la façon la plus appropriée (fonctionnement du système).

3.4.1 Application du traitement de l'eau de refroidissement

L'eau de refroidissement est traitée pour assurer un transfert de chaleur efficace, et pour prévenir le système de refroidissement d'effets indésirables sur la performance du matériel de refroidissement. En d'autres termes, le traitement de l'eau de refroidissement vise à réduire la consommation totale d'énergie.

Les effets négatifs sont étroitement liés à la composition chimique de l'eau prélevée pour le refroidissement et à la façon dont le système de refroidissement fonctionne (cycles de concentration par exemple). L'eau salée fera l'objet de exigences différentes de celles de l'eau douce, et la réduction des émissions de substances polluées en aval peuvent être un vrai défi. De plus, l'eau de refroidissement peut être contaminée par la fuite de fluides de procédés dans les échangeurs de chaleur ou, dans le cas de tours de refroidissement ouvertes humides, par l'air qui circule à travers la tour introduisant de la poussière, des micro-organismes et des échanges de vapeur.

Les additifs à l'eau de refroidissement sont utilisés pour les systèmes à passage unique, les systèmes de refroidissement humides ouverts ou fermés et les systèmes de refroidissement hybrides. Lorsque l'eau est utilisée comme fluide de refroidissement intermédiaire dans l'échangeur des systèmes par voie sèche, de très faibles quantités d'additifs peuvent être utilisées pour conditionner l'eau dans la boucle fermée.

Sur le plan environnemental, les additifs sont importants : ils sortent du système de refroidissement à un certain stade car ils sont rejetés dans l'eau de surface ou dans une moindre mesure dans l'air. En général, la composition chimique et l'utilisation de produits chimiques utilisés sont connues, mais le choix des biocides non oxydants se fait principalement de manière empirique (« essai et erreur »). Les effets sur l'environnement des substances chimiques utilisées peuvent être évalués par modélisation (risque/danger) ou par mesure. Comme ils sont utilisés pour améliorer le transfert de chaleur, leur utilisation est également liée aux effets néfastes qui proviennent d'un échange moins efficace. Le procédé industriel à refroidir peut être affecté lorsque le transfert de chaleur n'est pas efficace, ce qui entraîne une hausse de la consommation d'énergie (similaire à une hausse des émissions dans l'air) ou une demande plus élevée de matières premières pour compenser la perte de production. La consommation d'énergie du système de refroidissement peut augmenter en raison d'une demande plus élevée sur les pompes et les ventilateurs pour compenser la perte d'efficacité de l'échange de chaleur.

Les problèmes les plus courants relatifs à la qualité de l'eau sont :

- La corrosion des équipements de refroidissement de l'eau qui peut causer des fuites dans les échangeurs de chaleur et le déversement des fluides du procédé industriel dans l'environnement, ou la perte de vide dans les condenseurs.
- L'entartrage, essentiellement par précipitation des carbonates de calcium, des sulfates et des phosphates, Zn et Mg ;
- Le (bio)-encrassement des conduites et des échangeurs de chaleur (ainsi que le corps d'échange des tours de refroidissement humides) par des micro/macro organismes et des solides en suspension, ce qui peut entraîner le colmatage des tubes de l'échangeur de chaleur par des grosses particules (coques) ou générer des émissions dans l'air à partir des tours de refroidissement.

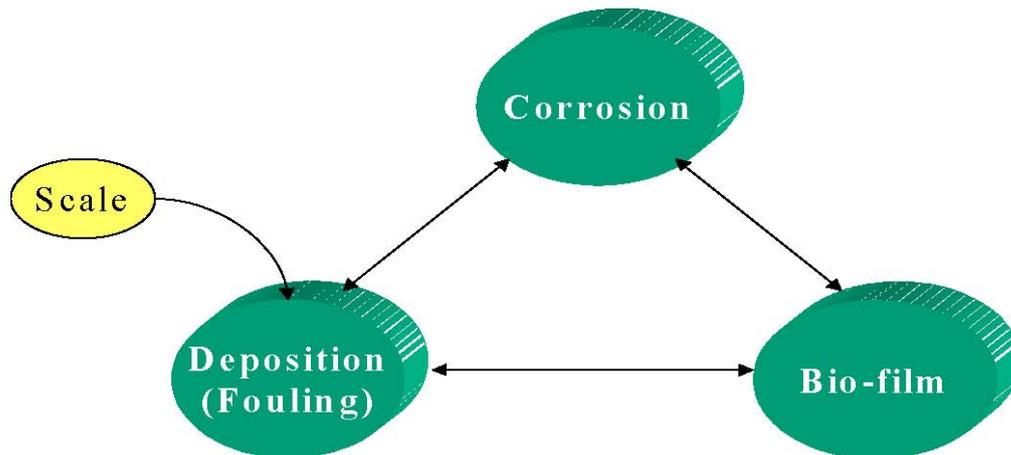


Figure 3.1 : Représentation graphique des interactions entre les différents problèmes de qualité de l'eau

Les problèmes liés à l'eau de refroidissement sont souvent interdépendants. L'entartrage peut entraîner à la fois de la corrosion et de l'encrassement biologique. Des points de corrosion entraînent un changement des caractéristiques du flux d'eau et créent des zones de turbulence favorables au bio-encrassement. Le bio-encrassement peut faciliter la corrosion de la surface sous-jacente (Figure 3.1).

Les groupes suivants de substances chimiques sont utilisés pour conditionner l'eau (voir aussi Annexe V) :

- Inhibiteurs de corrosion :
- autrefois, on utilisait des métaux, mais la tendance actuelle est de préférer les azoles, les phosphonates, les polyphosphates et les polymères. Cela signifie que la toxicité diminue tandis que la persistance augmente. Récemment, de meilleurs polymères biodégradables ont été développés.
- des stabilisateurs de dureté ou des inhibiteurs d'échelle :
- il existe des formules essentiellement composées de polyphosphates, de phosphonates et de certains polymères. Des développements récents dans cette utilisation prônent l'emploi de meilleurs composés biodégradables
- Des substances chimiques de dispersion :
- Essentiellement des copolymères, souvent combinés à des surfactants. Le principal effet sur l'environnement est sa faible biodégradabilité.
- Biocides oxydants :
- du chlore (ou une combinaison de chlore et de brome) et de la monochloramine sont essentiellement utilisés. Le chlore (le brome) est un puissant oxydant (extrêmement toxique), ce qui signifie que la demie-vie est courte, mais les effets secondaires de la chloration sont la formation de sous-produits halogénés. Les autres biocides oxydants sont l'ozone, les UV, le peroxyde d'hydrogène ou l'acide peracétique. L'utilisation de l'ozone et des UV nécessite un pré-traitement de l'eau d'appoint et requièrent des matériaux spéciaux. Les effets sur l'environnement sont sensés être moins néfastes que pour les biocides halogénés, mais leur utilisation nécessite une attention particulière, est onéreuse et ne s'applique pas dans toutes les situations.
- Biocides non oxydants :
- isothiazolones, DBNPA, glutaraldehyde et composés quaternaires d'ammonium etc. Ces composés sont en général extrêmement toxiques et rarement biodégradables, même si certains s'hydrolysent ou se dégradent grâce à d'autres mécanismes. Les effets sur l'environnement sont significatifs.

Tableau 3.7 : Composés chimiques des traitements de l'eau de refroidissement utilisés dans les systèmes humides ouverts et fermés

Source : [tm135, Nalco, 1988]

Exemples de traitement chimique *	Problèmes concernant la qualité de l'eau					
	Corrosion		Entartrage		(Bio-)encrassement	
	Systèmes à passage unique	Systèmes à circuit fermé	Systèmes à passage unique	Systèmes à circuit fermé	Systèmes à passage unique	Systèmes à circuit fermé
Zinc		X				
Molybdates		X				
Silicates		X				
Phosphonates		X		X		
Polyphosphates		X		X		
Esters de polyols				X		
Composés organiques naturels				X		
Polymères	X	X	X	X	X	X
Biocides non oxydants						X
Biocides oxydants					X	X

Notes : Le chromate n'est plus beaucoup utilisé en raison de ses effets sur l'environnement

Le besoin de traitement de l'eau de refroidissement et le type et la quantité de substances chimiques utilisées sont décrits plus en détail dans l'Annexe V. L'utilisation du conditionnement de l'eau de refroidissement est un problème extrêmement complexe et local, où la sélection se base sur une combinaison des éléments suivants :

- la conception et le matériau de l'échangeur de chaleur ;
- la température et la composition chimique de l'eau de refroidissement ;
- les organismes présents dans l'eau de surface qui peuvent être entraînés ;
- la sensibilité de l'écosystème aquatique de réception aux additifs émis et ses sous-produits associés.

Pour une performance optimale de tous les traitements, le contrôle du pH de l'eau de refroidissement et de son alcalinité dans une plage spécifiée est habituellement requis. Un contrôle strict du pH et de l'alcalinité devient important lorsque des programmes de traitement plus sensibles au pH sont utilisés, ou lorsqu'un nombre plus élevé de cycles de concentration est utilisé dans les tours ouvertes à recirculation afin de minimiser les purges et réduire les besoins en eau. Dans le monde industriel, la pratique des programmes de maintenance développés et conduits par le fournisseur des additifs devient de plus en plus courante, mais la responsabilité pour le fonctionnement des systèmes incombe au propriétaire du système de refroidissement.

Considérant le site et les caractéristiques du système, il sera difficile de trouver des niveaux typiques de quantités d'additifs utilisés dans les différents systèmes. Si les niveaux sont rapportés, ils sont exprimés en kg ou en tonnes par m³ d'eau de refroidissement, ou en kg ou tonnes par MW_{th} dissipé. Le tableau 3.8 montre le résultat d'un inventaire récent concernant le chlore aux Pays-Bas, qui est très utilisé dans l'industrie néerlandaise. Les données montrent qu'il y a des différences selon les systèmes et les types d'eau. Les autres sources d'eau utilisées par les systèmes à recirculation sont par exemple l'eau potable, l'eau souterraine et les condensats.

Tableau 3.8 : Consommation d'hypochlorite dans les systèmes de refroidissement humides aux Pays-Bas [tm160, Bijstra, 1999]

Source d'eau de refroidissement	Consommation de chlore actif kg/MW _{th} /an	
	Systèmes à passage unique	Systèmes à circuit fermé
Eau douce	85 (10-155)	200 (20-850)
Eau salée ou saumâtre	400 (25-2500)	
Autres sources d'eau		400 (20-1825)

3.4.2 Émissions de substances chimiques dans l'eau de surface

En Europe et aux États-Unis, de nombreux travaux ont été conduits sur l'optimisation du conditionnement de l'eau de refroidissement, sur l'utilisation de traitements de substitution et sur d'autres techniques de prévention des effets secondaires sur l'environnement aquatique lié à l'utilisation d'additifs dans l'eau de refroidissement. Plus généralement, ce travail s'intéresse à l'utilisation de biocides.

Les émissions provenant spécifiquement du traitement de l'eau de refroidissement peuvent être difficiles à évaluer dans des situations où les méthodes d'analyse pour les produits chimiques utilisés pour le traitement ne sont pas disponibles. En plus des substances chimiques spécifiquement utilisées pour le traitement de l'eau de refroidissement, des sous-produits provenant des produits chimiques utilisés peuvent également contribuer de façon significative à l'impact environnemental sur l'eau de surface. Lorsque le chlore ou le brome sont utilisés comme additifs, 3 à 5 % du produit réagit en composés haloformes (chloroforme ou bromoforme) [tm072, Berbee, 1997].

La quantification des effets à court terme peut être effectuée en menant des tests (précis) de toxicité dans les flux d'eau de refroidissement rejetés. Ces résultats peuvent être considérés comme l'estimation minimale des effets sur l'environnement dans l'eau de surface [car les effets à long terme (chroniques), la biodégradabilité, la bioconcentration (P_{ow}) et les effets cancérogènes ne sont pas inclus dans ces tests]. Récemment, plusieurs études concernant l'utilisation de biocides oxydants (essentiellement de l'hypochlorite) ([tm001, Bloemkolk, 1997],[tm072, Berbee, 1997] et [tm160, Bijstra, 1999]) et des biocides non oxydants ([tm001, Bloemkolk, 1997] et [tm149, Baltus et al., 1999]) ont été conduites aux Pays-Bas.

3.4.2.1 Biocides oxydants

Dans plusieurs pays, des programmes ont été menés pour atteindre l'utilisation optimale d'hypochlorite dans l'eau de refroidissement. L'oxydant libre [mg OL/l] est souvent utilisé comme un paramètre de contrôle dans l'eau de refroidissement. Aux Pays-Bas, une concentration de 0,1 – 0,2 [mg OL/l] dans le rejet sert de concentration cible pour les systèmes de refroidissement (à passage unique) dosés en continu. Pour les régimes en chloration intermittente ou par décharge, les concentrations en OL ou en OLR se situent toujours en-dessous de 0,2 mg/l en valeur moyenne journalière (24h). Mais au cours de l'injection, les concentrations en OL et en OLR peuvent avoisiner ou être égales à 0,5 mg/l (moyenne horaire).

L'optimisation par la mise en place d'une surveillance et d'un dosage contrôlé (automatique) des biocides peut réduire de façon significative la consommation annuelle de substances chimiques dans l'eau de refroidissement. On peut ainsi obtenir une réduction de la charge des biocides et de leurs sous-produits tels que les composés organo-halogénés, principalement le bromoforme [tm157, Jenner et al, 1998]. Plusieurs entreprises du secteur chimique et de production d'énergie ont réussi à réduire l'utilisation de l'hypochlorite dans l'eau d'appoint à hauteur de 50 % en introduisant les mesures d'optimisation mentionnées précédemment [tm160, Bijstra, 1999].

3.4.2.2 Biocides non oxydants

En 1999, une étude a été menée sur les effets environnementaux de l'utilisation de substances chimiques oxydantes et non oxydantes dans les systèmes à circuits fermés. Pour les substances chimiques pour lesquelles les méthodes d'analyse étaient disponibles, les concentrations en substances chimiques dans l'eau de refroidissement ont été mesurées. Pour toutes les substances chimiques utilisées, des tests de toxicité ont été effectués pour évaluer l'impact environnemental dans l'eau de surface. Lorsque l'eau de refroidissement est rejetée directement dans l'eau de surface, l'utilisation de substances chimiques non oxydantes dans les systèmes à recirculation a entraîné dans de nombreux cas des effets environnementaux importants dans l'eau de surface. Pour les substances chimiques oxydantes (hypochlorite), les ratios PEC/PNEC basés sur les tests de toxicité ont été trouvés dans la plage de 3 (dosage continu) et 33 (dosage par décharges), et pour les substances chimiques non oxydantes, les ratios PEC/PNEC de 20 (isothiazolines), 2 500 (BNS), 660-13 000 (BNS/MBT) et 3 700 (DBNPA) ont été trouvés ([tm149, Baltus et al., 1999] voir pages récapitulatives. 9-10, tableau 16 p. 64 et chapitre 9 p. 75-82)).

Une autre étude a indiqué que les risques potentiels pour l'eau de surface de réception ne peuvent pas être exclus lorsque les isothiazolines (1,2-benzisothiazoline-3-on, 2-méthyle-4-isothiazoline-3-on) sont utilisés comme d'additifs dans l'eau de refroidissement (voir[tm149, Baltus et al., 1999] pag. 13 en 14).

Les programmes de traitement varient considérablement et dépendent des facteurs mentionnés précédemment tels que les spécificités propres au site. Les émissions d'additifs varient en termes de volume et de composition chimique (toxicité, réactivité). Les mesures possibles de décomposition, interaction et purification peuvent influencer la quantité réelle finalement rejetée et, par conséquent, l'impact qui en découle sur l'environnement aquatique. L'optimisation et le conditionnement contrôlé de l'eau de refroidissement par l'utilisation du dosage (automatique)

et la surveillance peuvent réduire l'emploi de substances chimiques dans l'eau de refroidissement, et par conséquent l'impact sur l'environnement dans l'eau de réception, de façon significative.

Aux Pays-Bas, l'utilisation d'hypochlorite et de brome dans l'eau de refroidissement est l'une des plus importantes sources de composés organohalogénés, mesurés en AOX dans l'eau de surface [tm001, Bloemkolk, 1997] et [tm072, Berbee, 1997].

Parfois, l'eau de refroidissement est traitée dans une installation de traitement des eaux usées avant d'être rejetée. Un exemple est le traitement de la purge avec les autres effluents dans les raffineries. Ce traitement pourrait vraisemblablement réduire l'effet des biocides dans l'eau de surface. Le traitement biologique peut être sensible à des niveaux faibles de biocides non oxydants, ce qui pourrait perturber le fonctionnement de la station d'épuration. L'inhibition de 60 %, voire même de 100 %, des boues actives a été constatée. Le traitement physique/chimique des biocides est toujours au stade expérimental. La polarité des biocides non oxydants constituera un obstacle au traitement physique, car ils resteront dans la phase aqueuse.

La purge des systèmes ouverts à recirculation est la voie la plus contrôlée par laquelle les biocides pénètrent dans l'environnement extérieur. Dans les systèmes fermés, la purge n'est pas utilisée. Les purges sont effectuées, mais elles sont faibles et habituellement rejetées dans les égouts. Il est évident que la concentration en biocides dans l'eau de refroidissement immédiatement après le dosage sera la plus élevée ; il en va de même pour la concentration dans la décharge ou dans la purge. Par réaction chimique dans l'eau de refroidissement du système, telle que l'hydrolyse, la concentration en biocides diminuera graduellement et cette connaissance peut servir à estimer la concentration attendue dans le rejet. Ces informations sont également utilisées à la fermeture de la purge après traitement, pour empêcher le rejet de biocides avec un niveau élevé d'activité chimique. Pour une meilleure optimisation, plusieurs facteurs sont importants. En plus de la concentration à la sortie, le contrôle du procédé est également essentiel à ce niveau.

3.4.2.3 Facteurs influençant les émissions de biocides

Les facteurs influençant le rejet et la persistance de biocides dans l'environnement aquatique de réception ont été décrits de façon détaillée [tm004, Baltus et Berbee, 1996] pour un grand nombre de biocides oxydants et non oxydants couramment utilisés. Les facteurs suivants, combinés avec les conditions d'opération du procédé de refroidissement, jouent un rôle dans le choix d'un programme de traitement de l'eau de refroidissement :

- Demi-vie hydraulique (la demi-vie du système est également utilisée) ;
- Hydrolyse ;
- Biodégradation ;
- Photolyses ;
- Volatilité.

Le volume de purge détermine la demi-vie hydraulique. Plus la purge est importante, moins la demi-vie hydraulique sera longue et plus la durée de rétention du biocide sera courte. La demi-vie hydraulique n'influence pas le fonctionnement des biocides oxydants en raison de leur dissociation et de leur fonctionnement rapides, mais pour les biocides non oxydants, leur fonctionnement sera limité.

L'hydrolyse d'un biocide non oxydant se produit à un pH et à une température de l'eau donnés. En général, avec une élévation du pH et/ou de la température, l'hydrolyse augmente et l'effet biocide sera réduit. Par conséquent, une température plus basse de l'eau de réception ralentira davantage l'hydrolyse et augmentera la persistance des biocides non oxydants dans l'environnement aquatique.

La biodégradation, la photolyse et la volatilité ne jouent pas un rôle important dans la dégradation des biocides non oxydants. La photolyse peut avoir lieu si l'environnement aquatique est exposé aux rayons du soleil. L'évaporation peut jouer un rôle dans le cas de biocides oxydants (hypochlorite). On peut citer des recherches dans le cadre desquelles l'effet du décapage des tours de refroidissement a représenté une perte de 10-15 % d'hypochlorite pour chaque passage dans la tour de refroidissement. Pour l'hypochlorite, le niveau de pH affecte son évaporation.

La biodégradation des biocides dépend de la quantité de matière organique et inorganique, et de la biodégradabilité même du biocide. Une population microbienne importante, l'augmentation de la température ainsi que de la teneur en oxygène de l'eau de refroidissement ou de l'eau de réception entraîne une biodégradation plus importante. L'eau de surface contient un grand nombre de matières organiques en suspension que les biocides peuvent absorber, ce qui entraîne une accumulation dans les sédiments. Les biocides peuvent également être réduits grâce à des substances organiques.

3.4.2.4 Niveaux d'émission

Il est difficile d'établir des niveaux représentatifs de concentration dans les émissions d'eau de refroidissement dans l'eau de surface. La quantification des émissions de substances dans les rejets d'eau de refroidissement fut tentée, et des modèles ont été développés. Toutefois, du fait de la spécificité du site, aucun modèle prenant en compte tous les aspects ne peut être rapporté. De nombreuses hypothèses doivent être faites et, même si elles donnent des indications, les rejets pourraient facilement être surestimés ou sous-estimés. Un exemple de modèle pour les biocides dans une tour de refroidissement ouverte par voie humide est détaillé [tm004, Baltus et Berbee, 1996] dans l'Annexe IX.

3.4.2.5 Législation

Dans de nombreux états membres, les émissions de substances chimiques dans l'eau de refroidissement sont encadrées par la législation relative à la pollution des eaux de surface. La législation se concentre en principe aux flux rejetés avec un volume minimal rejeté (en m³/jour). Dans certaines législations (comme en Italie), les eaux de réception sont classées et chaque eau a son propre paramètre d'émission par rapport aux eaux rejetées.

La qualité de l'eau rejetée requise définit les limites de présence de certaines substances (chrome, zinc ou composés du mercure) et réduit ainsi l'utilisation d'additifs particuliers à l'eau de refroidissement.

Pour les petits et gros volumes de rejet, les exigences sont définies pour des valeurs données de température et de pH. La température ne peut en général dépasser une température maximale pendant la plus grande partie de l'année. On peut gagner en flexibilité en modifiant les limites de la température de rejet lorsque les conditions saisonnières sont défavorables avec, par exemple, des températures de bulbe humide atteignant jusqu'à 40°C dans un climat de type méditerranéen.

Des exigences plus spécifiques relatives à la composition chimique varient entre les états membres, mais couvrent généralement les exigences en termes de concentration de composés organohalogénés adsorbables (AOX), en oxygène dissout, en demande biologique en oxygène (DBO), en demande chimique en oxygène (DCO), en substances chlorées et composés du phosphore ainsi que l'effet rémanent sur les bactéries luminescentes. Certaines actions distinguent les différents types de systèmes de refroidissement (à passage unique ou à recirculation) ou considèrent des opérations spécifiques telles que le traitement choc avec des substances microbiocides.

Aux Pays-Bas, les efforts de réduction se basent sur les propriétés intrinsèques des substances et sur l'évaluation des risques. Pour permettre à une entreprise et aux autorités chargées de la gestion de l'eau d'identifier sans ambiguïté l'effet des substances et des préparations sur la pollution de l'eau, une méthodologie d'évaluation générale a été développée. Cette méthodologie d'évaluation se base sur la législation européenne sur la classification, le conditionnement et l'étiquetage.

En fonction des propriétés d'une substance, il faut utiliser la BTM ou la BPM. Après avoir appliqué la BTM/BPM, le rejet résiduel est estimé par rapport aux objectifs de la qualité d'eau disponible. Si ces objectifs ne sont pas atteints, d'autres mesures peuvent être indiquées.

La législation européenne sur les produits chimiques affectant l'utilisation d'additifs à l'eau de refroidissement se trouve notamment dans :

- la Directive sur la pollution causée par les certaines substances dangereuses déversées dans le milieu aquatique de la Communauté (76/464/EEC),
- la Directive Cadre sur l'Eau,
- la Directive Préparations et
- la Directive Biocides 98/8.

3.4.3 Réduction des émissions dans l'eau de surface

3.4.3.1 Approche générale

Les techniques de réduction des émissions dans l'eau de surface liées à l'utilisation d'eau de refroidissement sont :

1. la réduction de la corrosion de l'équipement de refroidissement,
2. la réduction des fuites des substances du process dans le circuit de refroidissement,
3. l'utilisation d'un traitement de substitution de l'eau de refroidissement,
4. la sélection d'additifs moins dangereux pour l'eau de refroidissement,
5. l'utilisation optimisée d'additifs dans l'eau de refroidissement.

Selon l'IPPC, la réduction des émissions liées au traitement de l'eau de refroidissement devrait viser à réduire le besoin de traitement (prévention), à choisir et à utiliser de façon optimale les additifs (contrôle de la pollution) en accord avec les exigences d'échange maximal de chaleur. Pour réduire l'émission de substances chimiques dans le rejet d'eau de refroidissement, plusieurs options sont disponibles. En plus de l'évaluation de la configuration de refroidissement appropriée expliquée dans le Chapitre 1, et conformément à « l'approche » préventive de l'utilisation des MTD aux systèmes de refroidissement industriels, les options de réduction peuvent être envisagées dans un certain ordre. Pour les nouvelles installations de systèmes de refroidissement de grande puissance, une « approche » a été développée afin de réduire les émissions dans l'eau de surface [tm001, Bloemkolk, 1997].

Une « approche » a été développée pour la sélection des biocides dans les systèmes existants et les nouveaux systèmes [tm005, Van Donk et Jenner, 1996]. Ces deux « approches » impliquent plus ou moins les mêmes étapes. Le suivi de ces étapes permettra d'assurer que tous les facteurs importants dans la réduction de l'utilisation des additifs sont pris en compte. Ces « approches » sont présentées dans les Figures 3.2 et 3.3.

Pour l'optimisation de l'utilisation des biocides, un large éventail de possibilités existe et elles sont souvent liées les unes aux autres. Pour paramétrer un schéma d'optimisation, une approche « structurée » offre des avantages. Les recommandations sont maintenant présentées au moyen de deux diagrammes de flux, un pour les systèmes de refroidissement dans leur phase de conception et un autre pour le système de refroidissement existant. Ces tableaux offrent une « approche » étape par étape pour l'optimisation de l'usage des biocides.

La Figure 3.2 s'explique comme suit [tm005, Van Donk et Jenner, 1996]. Dans la phase de conception d'un système de refroidissement par eau, une décision devrait être prise concernant le type de refroidissement à utiliser. Si le refroidissement par eau est utilisé, des solutions techniques permettant le contrôle du bioencrassement attendu dans le système de refroidissement devraient être envisagées. Les problèmes importants à prendre en compte au cours de la phase de conception sont : maintenir des vitesses de débit suffisantes dans toutes les parties du système de refroidissement et une conception lisse des conduites et des échangeurs de chaleur. Cela réduira la sédimentation des organismes responsables du bioencrassement. L'utilisation de revêtements non toxiques permettra de réduire davantage la sédimentation des organismes. La prise d'eau devrait être conçue pour que l'entraînement des débris et des organismes soit minimisé. Des dispositifs de filtrage et des grilles peuvent réduire davantage la quantité de particules brutes entraînées. L'utilisation de matériaux à haute intégrité doit être envisagée. Pour les échangeurs de chaleur, il peut s'agir de titane (résistant à la corrosion, surface lisse). Les boîtiers d'entrée et de sortie des échangeurs peuvent être optimisés hydrodynamiquement et conçus en fibre de verre renforcée. Ce matériau peut également être utilisé pour les tubes et les jointures dans le système. Des dispositions simples peuvent également être prises au cours de la phase de conception, comme l'interconnexion des dispositifs de surveillance chimiques et biologiques ou pour le dosage, ou d'autres plus complexes pour le nettoyage mécanique, comme des tamis de rétention des moules ou les systèmes de balles en caoutchouc pour les éponges. Dans certains cas, le traitement thermique peut être utilisé pour contrôler le macroencrassement, et il n'y a pas du tout besoin de biocides. Pour l'utilisation du traitement thermique, une boucle spéciale dans le système de refroidissement doit être conçue. D'autres possibilités pour l'optimisation sont similaires à celles des systèmes existants.

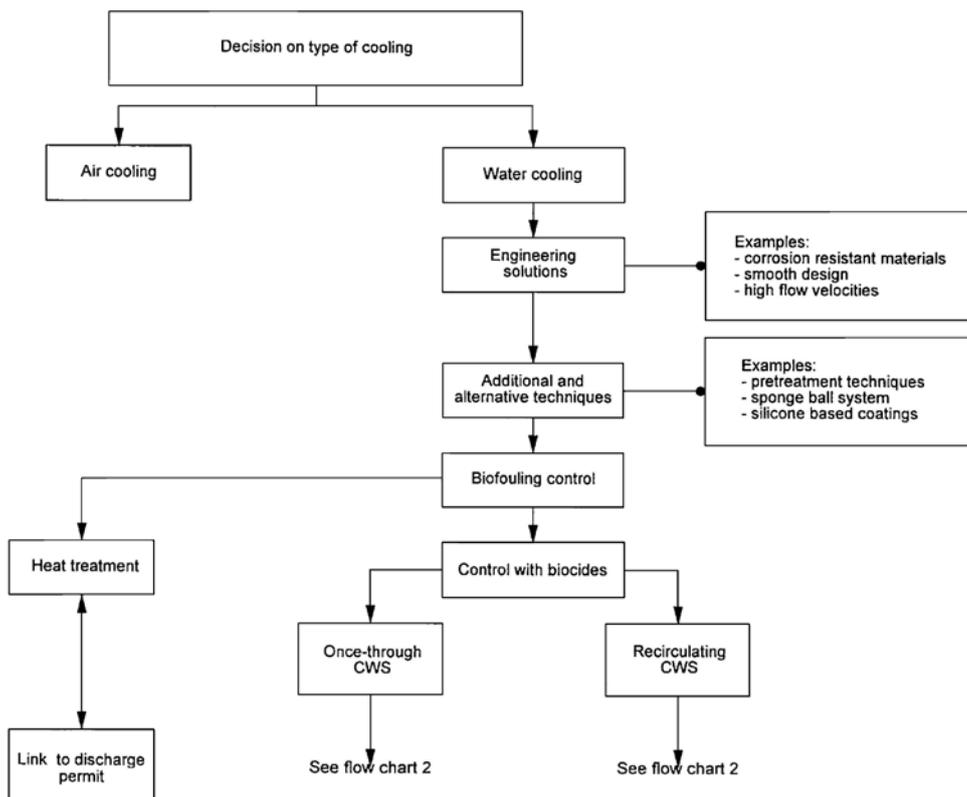


Figure 3.2 : Schéma de conception pour les systèmes de refroidissement à eau visant à réduire l'utilisation des biocides

[tm005, Van Donk et Jenner, 1996]

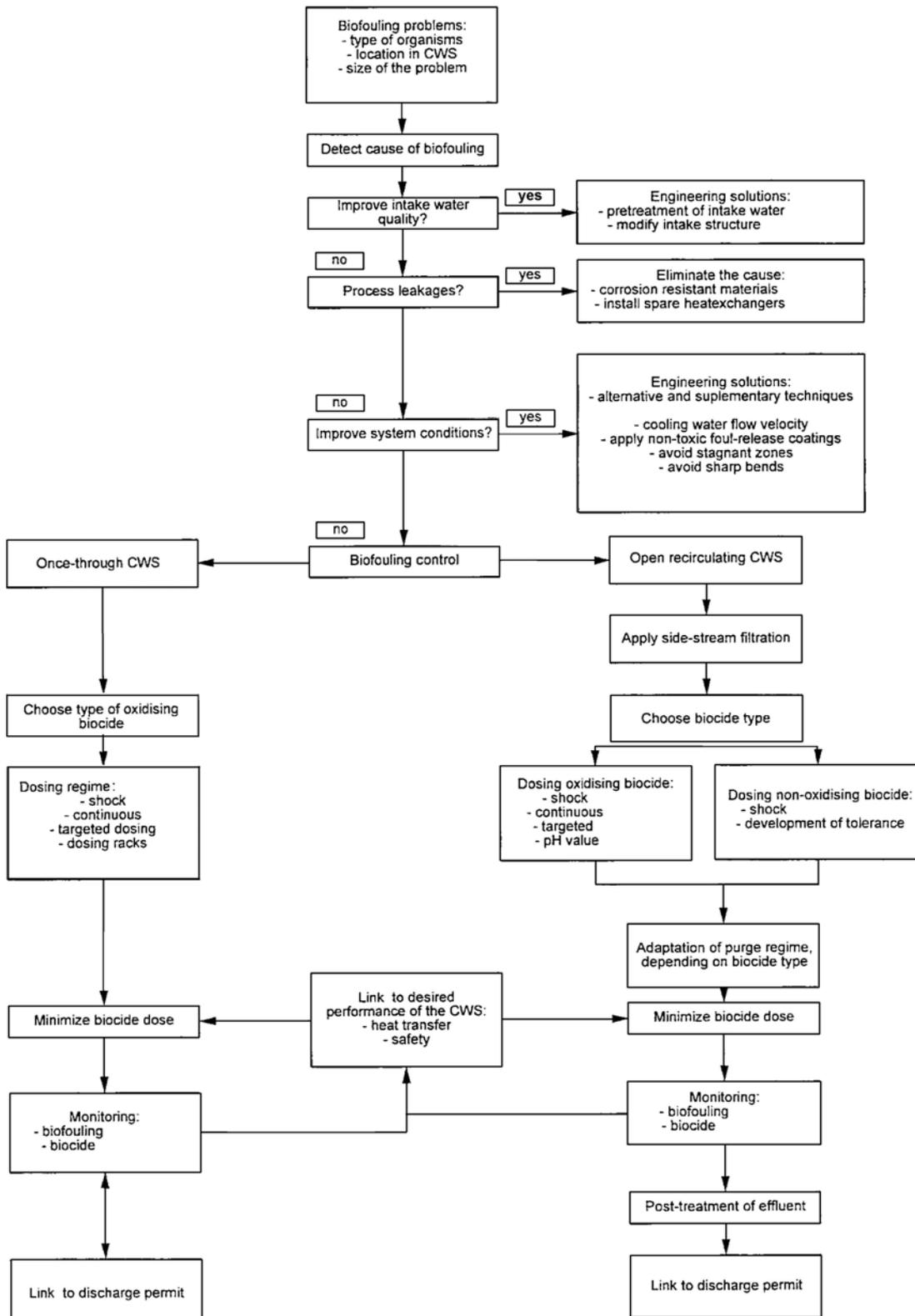


Figure 3.3 : « Approche » visant réduire l'utilisation des biocides dans les systèmes de refroidissement industriels à eau

[tm005, Van Donk et Jenner, 1996]

La Figure 3.3 montre toutes les étapes à suivre dans le choix des biocides [tm005, Van Donk et Jenner, 1996]. Dans un système de refroidissement par eau existant, il est important de définir la population responsable du bioencrassement et l'importance du risque de bioencrassement. Une surveillance biologique adaptée est un pré requis.

La cause du problème de bioencrassement devrait être analysée et traitée. La qualité de l'eau de refroidissement peut être améliorée par un pré-traitement (micro et macro filtration). Ceci pourra écarter une partie du risque de bioencrassement en réduisant l'entrée d'organismes et de nutriments. Si les fuites de process sont la principale cause d'une croissance biologique accrue, elles devraient être éliminées en utilisant des matériaux résistants à la corrosion par exemple, ou en installant des échangeurs de chaleur de rechange qui permettent un nettoyage mécanique plus fréquent. Afin d'améliorer les conditions du système, toutes les options mentionnées dans le schéma 1 devraient être prises en compte.

Dans les systèmes à passage unique, le macro-encrassement est parfois contrôlé par l'utilisation d'un traitement thermique, sans utilisation de biocide. L'hypochlorite de sodium est le biocide le plus utilisé. Il fait l'objet d'un dosage choc ou continu. La stratégie de dosage sur le contrôle du macro-encrassement devrait être préventive car le dosage curatif, lorsque l'encrassement s'est développé en abondance, demande des doses très importantes sur de longues périodes. Il est conseillé de faire attention à l'option de dosage ciblé pour les emplacements présentant un risque élevé d'encrassement, tels que les entrées et sorties des échangeurs de chaleur. La surveillance chimique est essentielle pour établir la dose minimale requise de biocide. Puisque la concentration en biocide oxydant utilisée diminuera dans le système de refroidissement existant, il est nécessaire de procéder à des contrôles chimiques pour enregistrer le niveau résiduel effectif de biocide au niveau des points critiques du système de refroidissement. Les systèmes de mesure en ligne devraient être calibrés à la main avec le test de colorimétrie DPD sur une base régulière. Une mesure des concentrations en biocides basée sur la toxicité dans l'eau de refroidissement est également très utile pour les schémas d'optimisation. Les dispositifs de surveillance du macro-encrassement donnent des informations concernant la sédimentation et la croissance des organismes de macro-encrassement et sur la performance du programme de contrôle du bio-encrassement. Ces informations sont essentielles aux programmes d'optimisation de l'usage des biocides dans les systèmes à passage unique qui présentent des problèmes de macro-encrassement.

Dans les systèmes ouverts à recirculation, le micro-encrassement est beaucoup plus important que le macro-encrassement. Les dispositifs de surveillance du micro-encrassement tels que la méthode ATP et la technique « de numération » donnent des informations importantes concernant le développement et l'état de la population de micro-encrassement dans le système de refroidissement. Pour empêcher l'entraînement d'organismes et de nutriments avec l'eau de refroidissement, l'eau d'appoint peut être prétraitée (par microfiltration, précipitation). La filtration en configuration externe continue d'une partie du volume d'eau en circulation aide à réduire davantage la quantité de matériaux organiques dans l'eau de refroidissement. La quantité requise de biocides pour que le traitement réussisse peut donc être réduite. Les filtres externes devraient être fermés temporairement au cours du dosage des biocides, ce qui permettrait d'éviter une demande non nécessaire de biocides par le filtre et de tuer la population microbienne sur le filtre.

Dans les systèmes à recirculation, les biocides oxydants et non oxydants sont utilisés. Aux Pays-Bas, environ 90 % des systèmes à circulation forcée sont traités avec de l'hypochlorite de sodium. Les biocides non oxydants ne sont utilisés que lorsque les biocides oxydants ne peuvent pas fournir une protection suffisante. Pour les biocides oxydants et non oxydants, le dosage choc ou par injection est recommandé afin de réduire leur utilisation, même si dans certains cas l'halogénéation continue à de faibles niveaux peut consommer moins de substances chimiques que le dosage par injection. Cela réduira également le risque de développement d'une tolérance de la biologie. Les méthodes chimiques précises dans le champ analytique pour les biocides non oxydants sont nécessaires pour optimiser leur utilisation. Les possibilités de mesure de l'hypochlorite ont été évoquées précédemment. Les méthodes biologiques pour mesurer les concentrations en biocides dans l'eau de refroidissement peuvent également être très utiles dans les systèmes à circulation forcée.

Si possible, il est conseillé de fermer ou de réduire la purge au cours du dosage par décharge des biocides oxydants et non oxydants, afin de réduire les émissions de biocides actifs. Cela est particulièrement efficace pour faire réagir rapidement les biocides ou les désintégrer. Il est également recommandé d'utiliser un système de refroidissement à circulation forcée traité avec de l'hypochlorite à une valeur de pH de 8 à 9 afin de minimiser les pertes par évaporation de HOCL dans la tour de refroidissement. L'expérience a montré que cela n'entraîne pas nécessairement une perte d'efficacité du biocide. Il est pourtant important de gérer le risque d'entartrage.

L'utilisation combinée d'hypochlorite et de bromure peut être une option intéressante dans les systèmes de refroidissement utilisant de l'eau douce, mais aussi dans les systèmes à passage unique car certains sous-produits, les aminés bromés ont un effet biocide plus important que leurs homologues chlorés et se dégradent plus rapidement.

Dans les systèmes à circulation forcée avec une qualité d'eau élevée, l'ozone peut être une option intéressante. Il est important dans ce cas de faire attention au risque de corrosion. Quelques expériences avec l'utilisation de l'ozone en Europe se sont avérées réussies. En définitive, le rayonnement UV peut également offrir des possibilités dans les systèmes à circulation forcée comme une technique supplémentaire. Le rayonnement UV seul ne peut toutefois pas attaquer le bio-encrassement qui s'est installé sur les surfaces du système de refroidissement. Pour être efficace, il faut une eau de refroidissement relativement claire, puisque la lumière doit pouvoir pénétrer dans la colonne d'eau.

L'« approche » peut être récapitulée comme suit :

1. La disponibilité de l'eau, parmi d'autres facteurs, décidera de la configuration sélectionnée (à passage unique, tour de refroidissement ouverte, fermée ou hybride). La configuration choisie peut à son tour affecter le type de traitement de l'eau. En général, elle diffère entre les tours de refroidissement à passage unique et les systèmes ouverts par voie humide, tels que l'utilisation de biocides oxydants ou non oxydants.
2. Une fois que le système a été choisi (voir également le Chapitre 1), un schéma d'évaluation complexe devra être appliqué pour correspondre aux nombreuses combinaisons entre les différentes options qui affecteront pas la suite le besoin d'un traitement de l'eau de refroidissement :
 - le choix des matériaux et du traitement de surface des échangeurs de chaleur et des conduits ;
 - la disposition du système de refroidissement pour éviter des turbulences, des sédiments ou la croissance de moules, ou pour améliorer la vitesse de l'eau requise ;
 - améliorer la composition chimique de l'eau de refroidissement par un pré-traitement ;
 - le nettoyage mécanique du système de refroidissement ;
 - des traitements alternatifs tels que la filtration thermique, UV et externe.

En fonction du résultat de cette évaluation, un système de refroidissement par voie humide peut encore nécessiter une certaine protection contre le tartre, la corrosion ou l'encrassement. Cela dépend de la composition chimique de l'eau de refroidissement, de la façon dont le système fonctionne (nombre de cycles de concentration notamment) et de la configuration de refroidissement choisie.

Il est clair que pour un système de refroidissement par air sec en circuit fermé ou un condenseur à air sec aucun traitement n'est nécessaire. Les substances chimiques peuvent être utilisées pour nettoyer l'extérieur des tubes (à ailettes), mais en principe pas pour faire fonctionner le système.

Une fois que le besoin d'un traitement de l'eau de refroidissement a été établi, une sélection précise du programme de traitement de l'eau de refroidissement conforme aux exigences législatives est appropriée. Ces exigences peuvent être :

- l'interdiction de l'emploi de certaines substances pour le traitement de l'eau de refroidissement (chrome, composés du mercure, composés organométalliques, nitrites, mercaptobenzothiazoles ;
- la restriction de certaines substances ou groupes de substances (zinc, phosphore, chlore, AOX) dans l'effluent de l'eau de refroidissement en définissant des valeurs limites d'émissions ;
- la nécessité d'un niveau maximum de biodégradabilité pour les agents complexants ;
- la limitation des effets écotoxicologiques de l'effluent d'eau de refroidissement.

La sélection d'additifs pour le traitement de l'eau de refroidissement pour les systèmes existants et pour les nouveaux systèmes entraînera avec « l'approche » suivante une réduction des émissions des substances chimiques de l'eau de refroidissement :

1. établir le besoin d'un traitement de l'eau de refroidissement après l'utilisation d'autres méthodes de nettoyage physique ;
2. sélectionner le type d'additifs requis ;
3. évaluer le risque pour l'environnement des substances à utiliser ;
4. dans la mesure du possible, utiliser des substances ayant un plus faible impact sur l'environnement.

3.4.3.2 Réduction par sélection des matériaux et conception des systèmes

Pour les nouveaux systèmes, des options sur les matériaux et la conception peuvent être appliquées pour réduire l'utilisation d'additifs. De nombreux matériaux différents sont utilisés pour équiper les systèmes de refroidissement. Les équipementiers proposent généralement des équipements utilisant une large gamme de métaux et d'alliages pour permettre à l'opérateur de choisir le matériau le plus adapté à la composition de l'eau de refroidissement et aux conditions du process pour lequel ils sont prévus. L'Annexe IV décrit les matériaux des systèmes à passage unique

et à circulation forcée utilisant de l'eau saumâtre ou salée. Il est important de réaliser que certaines caractéristiques d'un matériau peuvent avoir des caractères opposés qui peuvent compliquer le choix du matériau et affecteront le programme de traitement de l'eau de refroidissement. Par exemple, une corrosivité réduite peut aller de pair avec une sensibilité plus élevée au bio-encrassement.

La bonne disposition et la construction d'un système de refroidissement peuvent influencer le besoin en additifs pour l'eau de refroidissement. Au cours de l'assemblage, les arêtes non nécessaires devraient être évitées ainsi que les changements abrupts de direction dans le flux d'eau. Ces deux types de mesures permettront d'éviter des turbulences, qu'il faut éviter dans la mesure du possible car elles facilitent la corrosion ou l'installation de moules par exemple.

En faisant fonctionner le système avec une vitesse d'eau minimale appropriée, on maintient non seulement la capacité de refroidissement requise, mais on réduit également le micro-encrassement et la corrosion des matériaux.

Des revêtements et peintures sont utilisés pour réduire la fixation d'organismes, renforcer l'effet de vitesse et faciliter le nettoyage. Ces peintures anti-encrassement peuvent contenir des substances toxiques ; c'est la raison pour laquelle des revêtements et des peintures non toxiques ont été mis au point. Leur utilisation et leur prix peuvent varier et dépendent de la taille et des conditions de fonctionnement du système de refroidissement. Ainsi, les revêtements organiques sont utilisés dans les unités de refroidissement relativement petites au moyen d'un durcissement thermique de la surface. Ce sont des revêtements en poudre qui peuvent être utilisés dans des environnements humides et ne contiennent pas de substances toxiques, n'emploient pas de solvants, et résistent à la corrosion ce qui rallonge leur durée de vie de façon significative.

Dans les plus gros systèmes de refroidissement, des revêtements sont également utilisés et l'expérience dans l'industrie de production d'électricité montre qu'ils doivent être renouvelés tous les 4 à 5 ans. Un exemple est donné dans l'Annexe XI. Des peintures anti-encrassement contenant des substances toxiques telles que le cuivre et le tributyltinnoxyde (TBTO) qui se libèrent progressivement ont été utilisées. Aucune peinture ne contenant du TBTO n'est plus actuellement utilisée dans des grosses installations telles que des centrales électriques. Les peintures contenant du cuivre peuvent toujours être utilisées à une échelle limitée.

3.4.4 Réduction par utilisation d'un traitement de l'eau de refroidissement complémentaire et alternatif

Plusieurs techniques ont été utilisées pour réduire le traitement de l'eau de refroidissement. Concernant la réduction de l'utilisation des biocides, les techniques suivantes ont été rapportées [tm005, Van Donk et Jenner, 1996] :

- Filtration et pré-traitement
- Nettoyage en ligne
- Nettoyage hors ligne
- Traitement thermique
- Revêtements et peintures
- Rayonnement UV
- Technologie sonore
- Choc osmotique

Le principe de ces techniques consiste à améliorer la qualité biologique de l'eau de refroidissement et à conserver les surfaces des éléments des systèmes de refroidissement (conduites et échangeurs de chaleur) aussi propres que possible, en créant un environnement dans le système où le développement de l'encrassement sera réduit. L'utilisation de ces techniques est récapitulée dans l'Annexe XI. Bien entendu, certaines de ces techniques ne peuvent pas être généralisées ou sont toujours en cours d'investigation. Les avantages environnementaux devraient être équilibrés par l'utilisation réduite de substances chimiques.

Par exemple, le rayonnement UV a besoin d'une eau relativement claire tandis que les technologies à l'ozone et sonore consomment davantage d'énergie. Le traitement électrique de l'eau utilisé sur un système de refroidissement de très petite taille (< 1 m³/min) fonctionnant à des températures de 30 à 40°C a donné des résultats prometteurs en tant que méthode de contrôle microbien non chimique, mais nécessite des recherches supplémentaires.

Les coûts financiers peuvent varier en fonction de la taille du système et de la façon dont les techniques doivent être intégrées dans le système de refroidissement.

Le pré-traitement de l'eau pour les systèmes de refroidissement par circulation forcée pour réduire l'utilisation d'additif pourrait être envisagé dans la même optique que le pré-traitement de l'eau pour réduire les besoins en eau (voir Section 3.3.1.2). Le pré-traitement affectera la composition chimique de l'eau de refroidissement, en abaissant par exemple sa teneur en sel, ce qui affectera le besoin de lutte contre l'encrassement et la corrosion, et modifiera le mode de fonctionnement du système.

Toutefois, on possède peu d'informations sur l'effet du pré-traitement de l'eau de refroidissement sur la réduction de l'utilisation d'additifs, mais l'osmose inverse pour les circuits de refroidissement fermés et la filtration en configuration externe pour les systèmes ouverts ayant des capacités plus importantes ont donné de bons résultats (Annexe XI). Des coûts plus faibles pour l'eau d'appoint, le traitement de la purge et le dosage des inhibiteurs de corrosion, des inhibiteurs de tartre et des agents de dispersion ont été constatés. Il n'est pas nécessaire de reconcevoir le système de refroidissement.

3.4.5 Réduction des émissions par l'évaluation et la sélection des additifs

Une fois toutes les mesures technologiques et opérationnelles évaluées, l'évaluation et le choix d'additifs pour le conditionnement de l'eau de refroidissement est la prochaine étape à considérer pour tendre vers l'utilisation de substances ayant un impact sur l'environnement potentiellement plus faible si elles sont bien utilisées. Dans la Section 3.4.1 et de façon plus détaillée dans l'Annexe V, la théorie sous-jacente au traitement de l'eau de refroidissement a été décrite, et le choix du bon programme de traitement est clairement un exercice très complexe, et propre à chaque site. Il prend en compte plusieurs facteurs tels que les matériaux utilisés par l'installation, la qualité de l'eau et le mode de fonctionnement de l'installation. Il en résulte qu'un grand nombre de composantes et de combinaisons ont été développées et sont actuellement utilisées pour le traitement de l'eau de refroidissement.

Leur performance dans le circuit de refroidissement est évaluée et le bilan est effectué en fonction de la réactivité résiduelle dans l'environnement aquatique après son rejet. Le défi consiste ici à sélectionner un additif efficace pour le système de refroidissement, mais inoffensif dès qu'il quitte le système de refroidissement et entre dans le système aquatique de réception.

L'utilisation de différents types de produits chimiques dans différents systèmes de refroidissement a été relatée dans la littérature. Il apparaît que leur impact sur l'environnement est complexe, et dépend de nombreux facteurs. Des exemples montrent clairement que le fonctionnement optimisé du système réduit la quantité requise d'additifs, et qu'il peut également permettre d'utiliser différents types d'additifs. (Voir 3.4.6).

En général, dans l'U.E, l'évaluation des substances chimiques est considérée comme nécessaire et des tentatives de développement d'une méthodologie intégrée visant à réduire les effets de leur utilisation sur l'environnement ont été faites. Cependant, des difficultés ont été rencontrées tant sur le plan national qu'euro-péen :

- il existe plusieurs méthodes d'évaluation utilisées dans différentes applications ;
- la disponibilité des données concernant les substances et les composants de préparations est (toujours) un problème ;
- plusieurs entités sont responsables de l'évaluation des substances ;
- il faut encore développer l'évaluation des risques dans de nombreux pays.

Pour contrôler l'application et améliorer l'utilisation de méthodes alternatives, la connaissance des caractéristiques des traitements chimiques dans certains états membres a été traduite en obligations réglementaires pour les substances chimiques de traitement de l'eau de refroidissement. À titre d'exemple, la législation allemande en la matière est la suivante.

L'Annexe 31 du German Federal Water Act sur les émissions des eaux de refroidissement est un exemple de législation visant à optimiser l'utilisation des additifs dans l'eau de refroidissement et la conservation de la qualité des eaux de surface. Elle a entraîné des restrictions dans la consommation de certaines substances telles que les biocides et d'autres substances, et couvre tous les systèmes de refroidissement par voie humide (voir Annexe VI).

Cette législation s'articule autour de quatre étapes :

1. une liste des substances interdites contenant :
 - des composés du chrome
 - des composés du mercure
 - des composés organométalliques
 - du mercaptobenzothiazole
 - agents organiques complexes qui ne sont pas prêts à être biodégradés

- aucun traitement de choc avec des substances biocides autres que le chlore, le brome, l'ozone et le H₂O₂

2. limitation de certaines substances et groupes de substances dans les effluents :

- le dioxyde de chlore, le chlore et le brome
- les AOX
- les DCO
- les composés de phosphore (phosphonates inorganiques et totaux)
- le Zinc

3. obligation de biodégradabilité pour toutes les substances organiques utilisées, lorsque l'exigence de « biodégradabilité immédiate » est conforme au Chemical Act, Partie C4 de l'Annexe de la Directive 92/69 EC (31 Juillet 1992)

4. la limitation des effets écotoxiques dans les effluents de biocides utilisés dans l'eau de refroidissement n'interdit pas leur utilisation, car elle rendrait l'utilisation de microbiocides impossible. Toutefois, ils peuvent être essentiels pour le bon fonctionnement des systèmes de refroidissement ouverts et semi-ouverts. Les réglementations doivent faire l'objet d'une information sur le niveau et le caractère de toxicité et doivent être exprimées de façon à être reproduites. Des biotests tels que le facteur de dilution permettant d'exprimer la toxicité résiduelle dans le rejet par rapport à la toxicité dans le système de refroidissement sont utilisés.

Malgré les limites législatives concernant l'utilisation de plusieurs substances chimiques dans l'eau de refroidissement, un grand nombre d'additifs sont disponibles, et l'évaluation et la sélection d'alternatives est nécessaire ; elle doit prendre en compte des facteurs propres au site tels que le fonctionnement des systèmes de refroidissement et la sensibilité de l'environnement de réception des rejets. De plus, la traduction des législations nationales spécifiques se situerait au-dessous de l'applicabilité générale dans le cadre d'une « approche » horizontale.

Le remplacement de substances par d'autres, ayant un impact potentiel moins important sur l'environnement, est donc l'une des options qui permet de réduire l'impact environnemental des rejets d'eau de refroidissement. Les autorités habilitées aux Pays-bas ont utilisé l'instrument de substitution pendant plus de 20 ans dans les procédures d'autorisation. La base de cet instrument est une procédure d'approbation sous forme d'autorisation. En utilisant une procédure plus ou moins administrative, les détenteurs d'autorisation doivent soumettre une requête pour utiliser et modifier les additifs pour l'eau de refroidissement. Les autorités habilitées utilisent une procédure largement approuvée pour cette évaluation. Dans un futur proche, on s'attend à ce que les fournisseurs de substances chimiques ainsi que les industriels passent à un système d'autorégulation. La révision de ce système fait partie de l'adoption d'une méthodologie d'évaluation générale pour identifier les effets de substances et de préparations sur la pollution de l'eau. Cette méthodologie d'évaluation se base sur la législation européenne sur la classification, l'emballage et l'étiquetage (67/548/EEC, 99/45/EC).

D'une manière générale, l'évaluation des additifs à l'eau de refroidissement se fait en trois étapes [Benschop (1998)]. La première étape consiste à évaluer les propriétés intrinsèques des substances. Les substances sont évaluées sur la base de leurs caractéristiques éco-toxicologiques (caractéristiques cancérigènes, haute toxicité aquatique, biodégradation, LogPow et facteur de bioconcentration). Afin de pouvoir évaluer les substances et les préparations, il est nécessaire de connaître la substance ou la composition précise d'une préparation. Les programmes industriels internationaux (Responsible care, ICCA), la législation européenne (directive sur les biocides) et le développement de la gestion des substances chimiques au niveau européen contribuent à ces données concernant les propriétés des substances devenues de plus en plus disponibles.

Les résultats de la première étape donnent une indication sur le danger potentiel de l'additif. L'évaluation et la sélection via l'évaluation du caractère dangereux utilisent un test d'identification de dangerosité aux substances et à leurs préparations. Ce test a été développé aux Pays-Bas ([tm070, Benschop, 1997] et [tm071, Niebeek, 1997]) ; il se base notamment sur la directive relative aux substances dangereuses (67/548/CE) et sur la directive sur les préparations dangereuses (88/379/CE). Le test se concentre sur les caractéristiques éco-toxicologiques d'une substance. Cela concerne sa mutabilité, sa nature cancérigène, sa toxicité sévère, sa biodégradabilité, son logPow et son facteur de bioconcentration. Toutefois, cela nécessite des données qui ne sont pas toujours disponibles, essentiellement pour des questions de confidentialité ou parce qu'elles n'ont pas encore été collectées.

Afin d'évaluer les performances des additifs avec des solutions alternatives ayant un impact plus faible sur l'environnement de réception, ce test peut aider à faire l'évaluation et à procéder à la sélection. L'Annexe VIII.1 présente un exemple sur la façon dont une méthode de benchmark au niveau d'un site pourrait être utilisée pour

obtenir une première indication du potentiel pour l'impact des additifs de substitution proposés. Ce benchmark est conçu pour un système de refroidissement ouvert à circulation forcée par voie humide (tour de refroidissement ouverte). Il doit permettre de calculer un PEC « standard » pour une évaluation préliminaire du PEC dans la rivière. C'est un modèle simplifié si l'on considère qu'il n'y a pas de dilution de l'additif dans la rivière, en surestimant donc la concentration en substances dans le cours d'eau de réception. De plus, le PEC est considéré comme étant indépendant de la taille de l'installation et des conditions de fonctionnement, car le modèle prend en compte le débit d'utilisation des substances chimiques. La disponibilité de Normes de Qualité Environnementales des substances chimiques comme le recommande la Directive Cadre sur l'Eau est importante.

La deuxième étape implique les étapes d'optimisation pour réduire l'utilisation des additifs sélectionnées par toutes les étapes opératoires (voir section suivante 3.4.6). Dans la troisième étape, les rejets résiduels sont ensuite évalués par rapport aux objectifs applicables sur la qualité de l'eau ou aux normes de qualité environnementales. Si ces objectifs ne sont pas atteints, d'autres mesures peuvent être indiquées. Lorsque des additifs de substitution sont disponibles, on peut éviter de prendre des mesures en remplaçant les additifs dangereux par des additifs moins dangereux.

La valeur ajoutée de cette procédure d'évaluation des additifs, liée à la législation sur les substances chimiques conformément à la directive de l'UE citée précédemment, est :

1. la possibilité d'identifier les additifs ayant l'impact environnemental le plus faible et
2. la possibilité de déterminer si les objectifs locaux concernant la qualité de l'eau sont atteints.

Si cette méthode d'évaluation (qui est généralement applicable aux substances et aux composés) est appliquée aux biocides, de la première étape résultera automatiquement une prise de mesures supplémentaires. Dans la pratique, il s'agit d'effectuer une étude sur le programme d'optimisation de l'utilisation et du dosage des biocides. La deuxième étape, qui va plus ou moins de pair avec l'étude d'optimisation, implique l'évaluation des effets prévus sur l'écosystème aquatique local.

Avec cette évaluation, trois critères ont été vérifiés et, si ces trois critères sont satisfaits, des mesures de réduction supplémentaires incluant le traitement des effluents et/ou le remplacement de l'additif devraient être prises. Aux Pays-Bas, la concentration prévue de biocides par rapport au niveau de risque maximal admissible est contrôlée.

Des mesures complémentaires devraient alors être utilisées si :

1. la concentration en biocides dans l'effluent est supérieure au niveau de risque maximal admissible, et si ;
2. la concentration ajoutée de biocides dans l'eau de surface à une certaine distance des rejets dépasse plus de X% du niveau de risque maximal admissible, et si ;
3. la concentration totale en biocides dans l'eau de surface à une certaine distance de la décharge dépasse le niveau de risque maximal admissible.

La procédure d'évaluation décrite est illustrée en détail dans l'Annexe VIII.2.

3.4.6 Optimisation de l'utilisation des additifs à l'eau de refroidissement

L'optimisation de l'utilisation d'additifs à l'eau de refroidissement implique également de choisir le régime de dosage approprié et de surveiller les effets du programme de traitement de l'eau à la fois au niveau des émissions dans l'eau de surface et de la performance du système de refroidissement en termes de transfert de chaleur et de sécurité. Bien entendu, ces deux techniques sont liées et le contrôle est un pré requis pour le régime de dosage approprié.

La sélection du régime de dosage devrait permettre d'atteindre la concentration requise en temps voulu, sans pour autant réduire la performance du système de refroidissement. Le sous dosage peut générer de la corrosion ou du tartre et une performance réduite du système de refroidissement qui aurait également des effets indirects sur l'environnement ; en revanche, une surdose des substances chimiques peut causer un encrassement des surfaces d'échange de chaleur, des niveaux d'émission et des coûts de traitement plus élevés. Cela peut être représenté graphiquement comme le montre la Figure 3.4. Dans un système mal conçu, il n'est pas tenu compte de la concentration minimale requise d'un biocide pour maintenir le système protégé contre l'encrassement, et c'est la raison pour laquelle on peut observer de l'encrassement. Par ailleurs, le surdosage peut entraîner de tels niveaux de concentration que celle-ci peut dépasser le seuil maximal requis. À ce stade précis, l'excédent d'additif sera rejeté dans l'environnement.

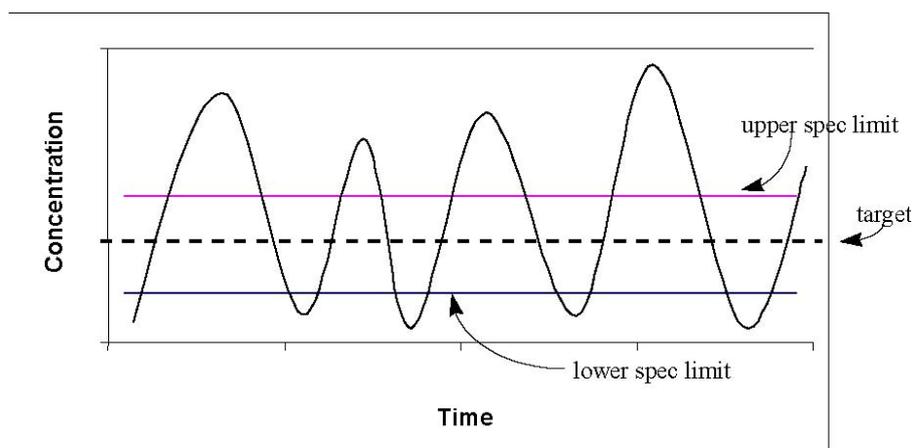


Figure 3.4 : Exemple d'évolution de la concentration en additifs résultant d'une surveillance et d'un régime de dosage inadaptés

Un dosage ciblé (Figure 3.5) basé sur l'analyse de la qualité de l'eau de refroidissement vise à maintenir le niveau de concentration minimal requis pour permettre une protection constante. Cela évite donc des niveaux de concentration excessifs et les rejets dans l'environnement induits, ce qui permet également de réduire les coûts de revient du traitement. Dans ce but, les régimes de dosage correctement définis réduiront la quantité d'additifs nécessaires et pourront s'avérer être une mesure économique.

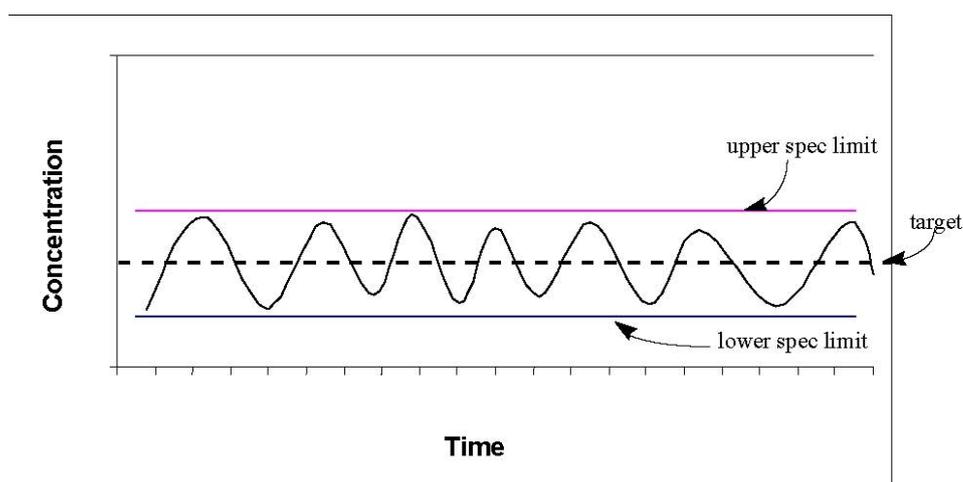


Figure 3.5 : Exemple d'évolution de la concentration en additifs résultant d'une surveillance et d'un régime de dosage adaptés

3.4.6.1 Dosage des additifs à l'eau de refroidissement

3.4.6.1.1 Régimes de dosage

([tm010, Betz, 1991], [tm005, Van Donk et Jenner, 1996], [tm157, Jenner et al, 1998])

Le dosage des substances chimiques dans l'eau de refroidissement se fait de la façon suivante (voir aussi les Annexes V et XI) :

- continu
- fin de saison
- périodique au cours de la sédimentation
- à faible niveau au cours de la sédimentation
- choc (également appelé par injection, en batch)
- semi-continu ou à impulsion alternative
- massif ou en dosage choc, où une grande quantité de substances chimiques est ajoutée à l'eau de surface en une fois.

Le dosage continu est pratiqué dans les systèmes de refroidissement où un certain niveau d'additifs doit être maintenu en permanence. Les meilleurs systèmes sont alimentés en fonction du volume traité et des exigences en

demande chimique. Il est toujours utilisé dans les systèmes à passage unique surtout pour lutter contre le macro-encrassement et la corrosion. Toutefois, des expériences ont montré que l'utilisation réduite via une pratique de dosage ayant évolué peut s'avérer efficace.

Avec un dosage intermittent, les substances chimiques sont alimentées par un contrôle marche/arrêt sur une pompe d'alimentation chimique ou par décharges à partir d'une cuve calibrée ou d'une chambre de mesure. Le dosage batch est utilisé dans les systèmes de refroidissement, les bassins de bio-oxydation et d'autres systèmes où le volume de purge est important. Dans ces systèmes, la quantité de substances chimiques réapprovisionne les matériaux perdus ou consommés. Il est également utilisé dans les applications qui ne nécessitent qu'un dosage périodique. Par exemple, les anti-microbiens pour les systèmes de refroidissement sont normalement alimentés en continu. Le dosage batch peut à la fois être utilisé dans les systèmes à circulation forcée et dans les systèmes à passage unique. Il ne peut pas être utilisé dans les systèmes à passage unique où une concentration uniforme de substances chimiques est nécessaire.

Le dosage peut également être ciblé sur des zones spécifiques du système de refroidissement comme l'entrée des échangeurs de chaleur par exemple. Une pratique importante est le dosage ciblé dans le temps qui correspond aux caractéristiques saisonnières de la croissance microbiologique. Le dosage dépendra également du type de système de refroidissement. Dans les systèmes à circulation forcée, le mode de fonctionnement du système planifiera la durée et la quantité de dosage. Dans les systèmes à passage unique, le point et l'heure du dosage sont importants pour obtenir l'effet optimal, sachant que le délai avant contact entre la substance chimique et l'eau de refroidissement est court.

Dans les petits systèmes, le dosage est effectué manuellement, mais dans les systèmes les plus importants il est généralement effectué par un dispositif automatique lié à un système de surveillance. Comme expliqué précédemment, le traitement de l'eau de refroidissement est de plus en plus sous-traité à des entreprises spécialisées. Pour les installations importantes et complexes dotées de plusieurs systèmes de refroidissement, le personnel spécialisé des fournisseurs est présent en permanence sur le site pour faire fonctionner ces systèmes. Avec des systèmes plus petits, le contrôle quotidien est souvent fait par le personnel du site, complété par un contrôle régulier effectué par le fournisseur.

Avec l'optimisation du dosage, on peut réduire l'utilisation des biocides. La façon dont les biocides sont dosés dépend du fonctionnement et de la persistance du biocide, du type et des caractéristiques saisonnières de l'encrassement (macro/micro), de l'état d'encrassement du système de refroidissement, de la température de l'eau du système et de ses nutriments. Les biocides sont dosés sous forme gazeuse, liquide ou solide.

Le dosage peut être continu ou choc. Dans la littérature, il est conseillé de procéder à un dosage continu dans les systèmes à passage unique, afin d'allonger la durée de contact des antimicrobiens lorsque le dosage se fait à de faibles niveaux. Pour les systèmes à circulation forcée, le dosage continu est également possible, mais le dosage intermittent est le plus courant. L'objectif du traitement intermittent dans ces systèmes est de générer une concentration élevée d'anti-microbiens qui pénétreront, puis briseront le biofilm pour éventuellement le dissiper. Par rapport au traitement continu, le traitement intermittent peut également amener à des concentrations annuelles en moyenne inférieures dans l'effluent, et peut être plus économiques puisque des quantités globales inférieures sont nécessaires. Toutefois, il a également été observé que le dosage continu pourrait donner une réduction de 40 % d'OL par rapport au dosage choc. Il faut continuer les recherches dans ce sens car, en général, du point de vue des opérateurs, le dosage continu est plus facile à faire que le dosage choc ou intermittent. Cela nécessitera un système de surveillance pour décider du moment le plus opportun pour appliquer le traitement. L'optimisation du régime de dosage doit se faire en ayant une faible incidence de panne.

Dans les systèmes à circulation forcée, l'utilisation de produits composés de mélanges interactifs peut entraîner une réduction des concentrations dans les purges et permettre de faire des économies. Les biocides ayant des spectres différents peuvent être dosés en combinaison pour élargir le spectre de contrôle. Sans augmenter la quantité d'antimicrobiens utilisée, l'efficacité d'un mélange peut dépasser l'effet attendu d'un seul additif. Cette amélioration des performances par mélange ne peut être obtenue qu'avec certaines combinaisons d'additifs. L'injection ne doit pas nécessairement être effectuée en simultanée, elle peut être effectuée en alternance avec des résultats similaires. Par ailleurs, on rencontrera vraisemblablement moins de résistance si on utilise plusieurs agents microbiens ; il est en effet peu probable que les microbes aient développé des résistances multiples simultanément. Les interactions entre les différentes substances devront être prises en compte afin d'éviter une moindre efficacité des biocides dosés, et pour éviter que des produits de réaction toxiques ne se développent dans les rejets.

L'objectif du traitement par les biocides peut être différent. En fonction des organismes cibles et de la façon dont le bioencrassement a progressé, les traitements sont soit préventifs, soit curatifs. Un biocide a fait l'objet de recherches intensives : l'hypochlorite de sodium. Le dosage de l'hypochlorite dans un système à passage unique montre que le système de refroidissement fonctionnera comme un réacteur, avec de nombreuses réactions complexes entre l'hypochlorite et la matière organique. En conséquences de ces réactions et pour un emplacement caractéristique utilisant de l'eau de refroidissement en provenance d'estuaires ou de zones côtières, une dose d'hypochlorite à la prise d'eau se situant entre 1,5 et 3 mg Cl₂/l entraînera une dose située entre 0,25 et 0,35 mg/l d'ORT à la sortie de l'échangeur de chaleur. Ces concentrations de réfèrent à une durée de réaction comprise entre 4 et 8 minutes. Pour réduire considérablement le dosage d'hypochlorite, un jet pulsé de chlore a été utilisé (Annexe XI.3.3.2.1 et X.3.3.2.1).

3.4.6.1.2 Systèmes de dosage ([tm010, Betz, 1991])

Plusieurs systèmes de dosage sont disponibles sur le marché. Pour le choix du système de dosage, il faut faire la distinction entre les substances chimiques liquides et sèches. Pour les substances chimiques liquides, des pompes sont utilisées telles que les pompes volumétriques, les pompes à piston (haute pression) et les pompes à diaphragme. Pour les substances chimiques sèches, on utilise des systèmes de dosage tels que les distributeurs volumétriques (pour les matériaux en poudre), les distributeurs gravimétriques (qui répartissent les substances chimiques selon leur poids) et les distributeurs par dissolution (dosage dans des réservoirs de mélange). Il n'y a pas information quant à la façon dont les différents systèmes de dosage actuellement utilisés réduisent la consommation d'additifs. Il n'est pas certain qu'une maintenance adéquate du système et qu'un bon calibrage améliorent la précision du dosage. La quantité, l'emplacement et la durée du dosage ne peuvent être contrôlés de façon précise qu'en contrôlant correctement le système de refroidissement.

3.4.6.2 Contrôle de l'eau de refroidissement

Le contrôle du besoin en substances chimiques pour le traitement de l'eau de refroidissement est essentiel pour réduire l'utilisation d'additifs et les émissions dans l'environnement, en général dans les eaux de surface. Il peut être considéré comme une méthode économique où le traitement de l'eau rejetée est en principe plus onéreux.

Il faut faire une distinction entre le contrôle de l'application des biocides et le contrôle des autres substances chimiques de traitement de l'eau (anti-incrustants, inhibiteurs de corrosion et dispersants) car en cas de macro-encrassement, un facteur complémentaire important est le contrôle du comportement de la phase biologique apparue dans le système de refroidissement.

3.4.6.2.1 Contrôle des anti-incrustants, inhibiteurs de corrosion et des dispersants ([tm067, Hoots et al, 1993])

L'utilisation d'inhibiteurs chimiques et l'optimisation de leur utilisation est un problème très complexe et propre à chaque situation. Dans chaque cas, il faut définir un équilibre entre plusieurs facteurs :

- la qualité de l'eau de refroidissement et les options de pré-traitement (adoucissement, filtrage) qui à leur tour dépendent du flux requis ;
- le besoin de réduction de la consommation d'eau en augmentant le nombre de cycles par rapport à l'augmentation des problèmes de tartre liés à une concentration accrue ;
- la température de l'eau de refroidissement par rapport à la solubilité des sels ;
- l'interaction entre les additifs.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour contrôler le dosage des produits inhibiteurs dans l'eau de refroidissement des systèmes à circulation forcée. Dans une revue d'ensemble, [tm067, Hoots et al, 1993] les techniques générales suivantes appliquées dans les systèmes de refroidissement ont été distinguées :

- test et ajustement manuels
- purge et appoint
- cycles de contrôles du compteur d'eau
- analyseur chimique en configuration externe (microprocesseur)
- fluorescence.

Chaque méthode a bien entendu ses avantages et ses inconvénients. Le principe du modèle optimisé montré dans la Figure 3.5 peut ne pas être atteint. Les différentes techniques de contrôle diffèrent en terme de potentiel pour le dosage de la quantité requise. Une variation dans le dosage qui n'est pas liée aux fluctuations de la demande du

système de refroidissement devrait toutefois être évitée dans la mesure du possible. Elle pourrait entraîner un sous-dosage ou un surdosage des substances chimiques.

La variation dans le dosage peut se produire pour plusieurs raisons :

- l'opérateur peut être insuffisamment impliqué
- l'équipement est peu fiable
- le niveau chimique est mesuré indirectement
- la mauvaise variable est mesurée
- le délai entre l'analyse et l'ajustement est trop long
- la reproductivité de la méthode d'analyse peut être faible
- les variations dans la charge de refroidissement et dans la qualité de l'eau d'appoint ne sont pas suivies avec précision.

Par expérience, il est évident que les systèmes de contrôle et de dosage les plus précis mesurent directement les concentrations en substances chimiques dans l'eau de refroidissement. De plus le délai entre l'analyse et l'ajustement du dosage est réduit. Les systèmes de contrôle devraient permettre de suivre les changements dans l'eau de refroidissement et la variation de la qualité de l'eau d'appoint (Annexe XI).

3.4.6.2 Contrôle du bio-encrassement

([tm005, Van Donk et Jenner, 1996] et ([tm087, Engstrom et Tully, 1994])

Le contrôle du bio-encrassement se base sur le contrôle de l'activité microbologique dans le système de refroidissement, ainsi que sur les niveaux de traitement réel par microbiocides. La clé de la mesure de l'efficacité de tout programme de traitement par biocide est la capacité à mesurer rapidement et précisément l'activité microbologique dans le système de refroidissement.

Pour obtenir un bon régime de dosage, la stratégie suivante a été suggérée pour les systèmes à passage unique :

- faire une analyse du problème orientée sur l'organisme à cibler ;
- caractériser les phénomènes saisonniers (ex. période de reproduction des moules) ;
- prendre en compte la température de l'eau et sa qualité (douce/salée) ;
- sélectionner un programme de dosage (localement par section : en continu ou de façon intermittente) ;
- décider des unités de dosage qui réduiront la consommation notamment si elles sont liées à un système de surveillance ;
- décider du programme de surveillance (réservoir de détection des moules (détermination de la période de reproduction) ou contrôle des moules/huîtres (détection de la concentration)).

Une stratégie similaire pourrait s'appliquer aux systèmes ouverts humides. Toutefois, le programme de dosage des additifs utilisés dans les tours de refroidissement couvre également les substances chimiques inhibitrices, qui augmenteront la complexité du traitement. Un facteur supplémentaire est l'effet du fonctionnement avec un nombre accru de cycles de concentration, qui économise de l'eau d'une part, mais qui augmente la possibilité d'entartrage et de corrosion et nécessite des additifs spécifiques d'autre part. Dans cette situation, il peut sembler évident d'opter pour des matériaux moins sensibles à la corrosion dans la phase de conception des nouvelles installations. Ils pourraient réduire le besoin d'inhibiteurs (voir 3.4.3.2) en permettant un fonctionnement sans ajouter d'agent complexes ce qui, en même temps, réduit les coûts.

Que ce soit pour les systèmes existants ou les nouveaux systèmes, il est important de définir les causes du bio-encrassement (fuite par exemple) et de caractériser les organismes avant de choisir le biocide requis.

Pour les systèmes à passage unique, le macro-encrassement est très important. Un prérequis pour le traitement par biocide est le contrôle du macro-encrassement. Cela est essentiel pour établir la dose minimale requise de biocides et pour l'optimisation de l'utilisation de ces biocides, car il donnera des informations sur la sédimentation et la croissance des organismes responsables du macro-encrassement et sur la performance du programme de contrôle du bio-encrassement.

Un régime de dosage encore plus ciblé est la chloration alternée par impulsions qui prend en compte la variation des durées de résidence dans différentes parties du procédé. À des instants et des points différents, les niveaux requis de chlore sont dosés conformément aux caractéristiques du flux d'eau de refroidissement dans les différentes phases du procédé. À la fin du process, et avant le rejet de l'eau de refroidissement, la dilution du flux se produit en mélangeant les différents flux de process. Lorsqu'un seul flux est chloré et que les autres ne le sont pas, l'ORT peut être réduit et on peut obtenir des niveaux d'émissions < 0,1 mg/l (voir Annexe XI).

Pour les systèmes ouverts à recirculation, le micro-encrassement est plus important que le macro-encrassement. Comme la quantité d'eau utilisée pour l'appoint est généralement inférieure, le pré-traitement de l'eau et la filtration en configuration externe d'une partie de l'eau en circulation peut empêcher l'entraînement de micro-organismes. En cas de dosage choc de biocides, les systèmes à recirculation ont l'avantage de permettre de fermer temporairement le système tout en laissant le biocide agir et donc d'abaisser la concentration avant la purge. De plus, pour les systèmes à recirculation, la surveillance du programme de contrôle du bio-encrassement est un pré-requis pour optimiser l'utilisation des biocides.

3.5. Systèmes de refroidissement par air et émissions dans l'air

3.5.1 Besoins en air

L'utilisation de l'air comme ressource n'a aucune conséquence directe sur l'environnement, et n'est pas considérée comme une réelle consommation. L'air est utilisé dans tous les systèmes excepté les systèmes à passage unique. Dans les tours de refroidissement à tirage mécanique, le besoin en air est lié au besoin en énergie pour le fonctionnement du ventilateur.

Tableau 3.9 : Flux d'air moyen requis pour les différents systèmes de refroidissement

[tm134, Eurovent, 1998]

Système de refroidissement	Débit d'air (%)
à passage unique	0
tour de refroidissement ouverte par voie humide	25
refroidissement ouvert par voie humide/sèche (hybride)	38
tour de refroidissement en circuit fermé	38
refroidissement hybride en circuit fermé	60
refroidissement par voie sèche en circuit fermé	100

Plus la quantité requise d'air est élevée, plus la puissance de ventilation est élevée et, par conséquent, le niveau de consommation d'énergie et d'émission sonore. Dans le tableau 3.9, les besoins en débit d'air des différents systèmes de refroidissement sont comparés. Le débit d'air est fortement lié au ratio entre les transferts thermiques par chaleur sensible et latente (Annexe I). Le refroidissement par air sec consomme davantage d'air que le refroidissement par voie humide.

Dans certaines zones spécifiques (sites industriels très denses), la qualité de l'air peut poser problème, et sa composition peut provoquer la corrosion des tubes (à ailettes) ou serpentins, ou entraîner l'encrassement de la surface ; dans les deux cas, l'efficacité de l'échange de chaleur sera affectée. Le pré-nettoyage de l'air de refroidissement semble peu réaliste, et aucune information n'a été communiquée sur ce point. Par conséquent, le nettoyage de la surface de l'échangeur de chaleur et/ou de traitement de l'eau de refroidissement pourrait s'avérer nécessaire en fonction de la composition chimique de l'air.

D'autre part, les tours de refroidissement ouvertes par voie humide font parfois office de nettoyeurs d'air, en retirant plusieurs polluants de l'air. Cela peut affecter le traitement de l'eau de refroidissement et potentiellement le fonctionnement du système de refroidissement, mais aucune donnée n'est rapportée sur ce point.

3.5.2 Émissions directes et indirectes

Les émissions dans l'air liées au fonctionnement des systèmes de refroidissement industriels peuvent être directes ou indirectes. Les émissions indirectes se produisent au niveau du process de fabrication en raison d'un refroidissement inefficace. Elles sont dues au fait qu'un refroidissement inefficace requiert une entrée plus importante de ressources (telle que l'énergie) pour compenser les pertes de produit ou de performance.

Les émissions directes dans l'air provenant des tours de refroidissement par voie humide sont particulièrement importantes à la proximité directe des installations urbaines. Par rapport aux émissions dans l'air du process industriel à refroidir, elles sont considérées comme étant relativement faibles. Les problèmes qui peuvent se produire en cours de fonctionnement sont :

1. les gouttelettes qui peuvent contenir des substances chimiques de traitement de l'eau ;

2. les bactéries (la maladie du Légionnaire) peuvent se développer si le traitement par biocides et la maintenance des tours de refroidissement sont inadaptés (3.7.3).

Les tours de refroidissement ouvertes et fermées à recirculation par voie humide et hybride peuvent présenter des émissions liées à l'entraînement vésiculaire et à la volatilisation, qui engendrent des pertes de substances chimiques liées au traitement de l'eau et notamment des biocides. On sait que la volatilisation, également appelée flash-off, des substances chimiques augmente avec la température, mais le mécanisme qui conduit à des émissions est complexe et implique de nombreux facteurs. C'est pourquoi la quantification est difficile et aucune donnée concernant ce type d'émissions n'a été rapportée.

Les éliminateurs de gouttes sont considérés comme une mesure de réduction importante. Toutes les tours de refroidissement par voie humide sont aujourd'hui équipées de pare-gouttelettes, mais un faible pourcentage du flux d'eau peut toujours être évacué sous forme de gouttes d'eau. Ces gouttelettes, contenant des particules dissoutes et des additifs chimiques, proviennent des rejets gazeux de la tour de refroidissement et peuvent causer des résidus ou des dépôts de tartre sur les surfaces des bâtiments [tm046, Vanderheyden et Schuyler, 1994]. Dans certains cas spécifiques, des émissions de chrome ont été observées, mais la plupart des états membres ont interdit l'utilisation du chrome pour des raisons sanitaires et environnementales ; par ailleurs, son utilisation poserait aussi des problèmes techniques.

La qualité et la quantité des émissions directes dans l'air provenant des tours de refroidissement sont propres à chaque situation et dépendent des additifs utilisés pour le traitement de l'eau de refroidissement, de leur concentration dans l'eau et de l'efficacité des pare-gouttelettes. Les éliminateurs standards actuellement utilisés dans les tours de refroidissement par voie humide permettent de limiter la perte d'eau par entraînement à 0,01 % ou moins encore du débit d'eau total. Un test d'évaluation des émissions d'une tour de refroidissement a été fait en utilisant un modèle simplifié [tm046, Vanderheyden et Schuyler, 1994]. À partir des données obtenues, il en a été conclu que les concentrations des émissions sont faibles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mais non négligeables, et que la conception et le positionnement de la sortie de la tour de refroidissement sont importants pour éviter les entrées des systèmes de conditionnement d'air ou d'autres installations de refroidissement.

À l'heure actuelle, aucune méthode standardisée ne permet de calculer les pertes par dérive (et la contamination environnementale) pour des configurations de tour de refroidissement données. Il existe deux méthodes pour vérifier les pertes par dérive des configurations données (non publiées) :

- la méthode isocinétique (méthode IC)
- la mesure par la méthode « Surface Sensitive » (méthode SS)

Ces deux méthodes ont leurs avantages et inconvénients. Les avantages de la méthode IC sont :

1. Efficacité de collecte élevée pour toutes les tailles de gouttelettes,
2. Analyse des éléments spécifiques possible,
3. Fournit un échantillon intégré sur la zone de sortie,

Les inconvénients de la méthode IC sont :

1. Les éléments atmosphériques peuvent fausser les résultats
2. Des délais d'échantillonnage longs requis pour une efficacité accrue des éliminateurs de gouttes ou pour les faibles concentrations minérales.

Il existe un code test qui explique comment réaliser le test IC (CTI-140).

La méthode SS présente les avantages suivants :

1. Fournit des caractéristiques de taille de gouttelettes supérieures à 30 μm ,
2. N'est pas affecté par les éléments atmosphériques,
3. Fournit une indication relative à l'efficacité des éliminateurs de gouttes,

Les inconvénients de la méthode SS sont :

1. Faible efficacité de collecte des petites gouttelettes inférieures à 30 μm ,
2. distinction impossible entre la condensation et l'entraînement vésiculaire,
3. Aucune analyse des gouttelettes pour les constituants spécifiques.

Des émissions accidentelles de particules d'amiantes ont été recensées au cours du déclassement d'anciennes tours de refroidissement dans lesquelles de l'amiantes-ciment a été utilisé, ce qui nécessite des mesures spécialisées pour leur stockage. Un rapport sur la réduction des émissions de particules d'amiantes lors d'un déclassement s'est concentré

sur la protection contre l'inhalation directe [tm082, Mittendorf, 1990]. Comme l'utilisation de l'amiante et des matériaux similaires a été interdite dans l'ensemble de l'Union Européenne, l'amiante n'est plus utilisé dans la construction de nouvelles tours de refroidissement, ni dans celles qui ont été construites récemment. On peut encore trouver de l'amiante dans les tours de refroidissement ayant 20 ans ou plus.

La réduction des émissions atmosphériques dans les tours de refroidissement n'a pas été rapportée et ne semble pas applicable. À la lumière de l'origine de la contamination potentielle et de la façon dont elle est véhiculée, les conclusions suivantes ont été tirées :

- La réduction des émissions dans l'air à partir des tours de refroidissement est liée aux mesures intégrées de réduction de l'appoint en eau, et en particulier à l'utilisation de pare-gouttelettes,
- La réduction des émissions dans l'air est liée à la réduction du besoin de traitement de l'eau de refroidissement, et
- La réduction des émissions dans l'air provenant des tours de refroidissement est liée à l'optimisation du traitement de l'eau de refroidissement (optimisation du fonctionnement du système).

3.5.3 Panaches de tours de refroidissement

3.5.3.1 Formation du panache

La formation de panache peut être importante dans les tours de refroidissement humides ouvertes et fermées lorsque l'air quittant la tour de refroidissement a une teneur élevée en humidité, se mélange à l'atmosphère et commence à se refroidir. Au cours de ce procédé, une partie de la vapeur d'eau excédentaire qui a été absorbée se condense à nouveau. Même s'il s'agit en quasi-totalité de vapeur d'eau, l'effet de migration horizontale peut être considérable dans les grosses tours (centrales électriques, industrie chimique). La forme et l'étendue du panache visible sont influencées par la température et l'humidité relative de l'atmosphère, mais également par le vent. Plus l'atmosphère est froide et humide, plus le panache sera stable et persistant. Il peut toutefois être considéré comme un problème potentiel dans les régions plus tempérées ou plus froides d'Europe, surtout en hiver. La formation importante de panache dans les grosses installations (centrales électriques) peut également entraîner du brouillard au niveau du sol dans le cas des tours plus basses (40-50 mètres). Il a également été rapporté qu'en cas de conditions climatiques extrêmes, du verglas peut se former si la formation d'un panache important est suivie par des précipitations.

3.5.3.2 Réduction du panache

[tm101, BDAG, 1996], [tm123, Alt et Mäule, 1987]

La réduction du panache est une mesure technologique intégrée qui passe par le changement de la configuration du système de refroidissement. La formation de panache peut être prévenue en séchant l'air humide avant qu'il ne soit rejeté en le mélangeant avec de l'air sec chaud. Les tours de refroidissement hybrides ouvertes et fermées sont notamment conçues pour éviter la formation de panache. (Voir Section 2.6)

En fonction des conditions climatiques et des exigences du process, la tour peut fonctionner en mode sec. Dans des conditions climatiques du nord de l'Europe, seuls 20 % de la charge thermique totale doivent être transférés dans la section sèche pour que la tour de refroidissement fonctionne sans panache visible, dans presque toutes les conditions climatiques. Dans certaines conditions, par exemple lorsque la température ambiante est très basse ou la charge thermique faible, la tour peut également entièrement fonctionner en mode sec. Les législations distinguent parfois les conditions de fonctionnement de jour et de nuit, et permettent un refroidissement par voie humide au cours de la nuit (avec panache) tandis que de jour la tour doit fonctionner en mode hybride pour prévenir la formation de panache. (Voir aussi Chapitre 2).

3.6. Émissions sonores

3.6.1 Sources et niveaux d'émissions sonores

Les émissions sonores sont importantes au niveau local. Les émissions sonores provenant d'un complexe industriel proviennent d'un ensemble de sources générant du bruit et, dans le cadre d'autorisations d'exploitation, le bruit provenant d'un système de refroidissement est considéré comme partie intégrante de l'ensemble du site. Par conséquent, le bruit provenant des systèmes de refroidissement et l'investissement dans des mesures d'insonorisation devraient être estimés par rapport aux émissions sonores totales d'un site. Les émissions sonores sont généralement un problème posé par les tours de refroidissement à tirage mécanique comme par les grandes tours humides à tirage naturel. Pour en savoir plus sur les caractéristiques et les calculs des émissions sonores des

tours de refroidissement, il peut être fait référence à la Directive VDI-3734 et aux normes développées dans le German VGB relatives aux systèmes de refroidissement des centrales électriques [tm158, VGB, 1998].

Trois principales sources de bruit causées par ces systèmes de refroidissement peuvent être identifiées :

- les groupes de ventilateurs (ventilateur, engrenage, moteur) – présents dans toutes les tours de refroidissement à tirage mécanique ;
- les pompes – dans tous les systèmes utilisant de l'eau de refroidissement ;
- les gouttelettes tombant dans le bassin / les masses d'eau en cascade - uniquement dans les tours de refroidissement humides.

La radiation peut être directe ou indirecte. Le son est radié directement via :

- les points d'arrivée d'air
- les points de rejet d'air

Le son est radié indirectement via :

- les moteurs des ventilateurs
- les déflecteurs des ventilateurs et les revêtements des tours de refroidissement (avec des constructions en béton, il n'y a pas de contribution significative)

Le bruit provenant des tours de refroidissement par air sec est essentiellement influencé par les équipements mécaniques utilisés et la façon dont ils fonctionnent. Si les mesures d'atténuation ont entraîné un très faible niveau de puissance sonore de ces équipements, le bruit provenant des échangeurs de chaleur ou des condenseurs et des conduites peut devenir prédominant.

Dans les tours de refroidissement par voie humide, le bruit provient de la chute des gouttelettes d'eau uniquement (ventilation naturelle) ou de la chute des gouttelettes et des équipements mécaniques. En général, le bruit des ventilateurs domine celui des gouttelettes d'eau s'ils ne sont pas atténués. Il est rapporté que ceci est vrai quelle que soit la taille de la tour de refroidissement par voie humide. Lorsque le bruit lié à l'air est réduit par des mesures d'insonorisation, le bruit lié à l'eau peut devenir dominant et son atténuation peut être envisagée.

Dans les tours de refroidissement moyennes à grandes, fonctionnant dans les centrales électriques et dans les grosses installations industrielles, le constat suivant a été fait : pour les tours de refroidissement à ventilation naturelle, le débit d'eau et la hauteur de la tour sont les facteurs les plus importants affectant les niveaux d'émissions non atténués. La hauteur de chute des gouttelettes est importante (jusqu'à 5 mètres), mais avec des hauteurs de chute plus importantes, aucune influence sur le bruit total n'a été signalée. Le niveau de puissance sonore en entrée peut être calculé en appliquant l'équation :

$$L_w \text{ (dB(A))} = 68 + 10 * (\log M/M_0) \pm 2 \quad M_0 = 1 \text{ tonne/heure}$$

Le niveau de puissance sonore au niveau de la sortie d'air des tours de refroidissement par ventilation naturelle peut être approximativement calculé en appliquant l'équation ci-dessous :

$$L_w \text{ (dB(A))} = 71 + 10 * (\log M/M_0) - 0,15 * (H/H_0) \pm 5$$

$M_0 = 1 \text{ tonne/heure}$ (M = débit d'eau)
 $H_0 = 1 \text{ m}$ (H = hauteur de la tour de refroidissement)

Pour les tours de refroidissement humides utilisant des ventilateurs, le spectre du bruit de l'eau en entrée n'est pas très différent. Pour les tours de refroidissement à tirage induit (ventilateur au sommet de la tour), la contribution du bruit de l'eau dans la sortie d'air (diffuseur) à la puissance sonore totale peut être calculée approximativement en appliquant l'équation suivante :

$$L_w \text{ (dB(A))} = 72 + 10 * (\log M/M_0) \pm 3 \quad M_0 = 1 \text{ tonne/heure}$$

Le facteur le plus important dans les tours de refroidissement à tirage mécanique est l'équipement mécanique utilisé (ventilateurs, engrenages, etc). La vitesse tangentielle du ventilateur (25-60 m/s) a une influence importante sur le niveau sonore total. Le type de ventilateurs utilisé (centrifuge ou axial) ainsi que le nombre et le type de pales sont également importants. Il apparaît que l'utilisation de boîtes de vitesses peut avoir une influence négative sur le niveau sonore (pour des mêmes débit d'eau et vitesse tangentielle du ventilateur), et si la vitesse du ventilateur est réduite (fonctionnement de nuit par exemple) ils deviennent alors dominants.

Le niveau de puissance sonore d'un ventilateur peut être calculé approximativement en appliquant l'équation :

$$L_w \text{ (dB(A))} = 16 + 10 * (\log V/V_0) + 20 * (\Delta p/\Delta p_0) \pm 5$$

($V_0 = 1 \text{ m}^3 \text{ d'air/h}$; $\Delta p_0 = 1 \text{ hPa}$)

Cette équation générale peut être utilisée pour les ventilateurs de tirage mécanique ou induit. Dans les tours à tirage forcé de taille moyenne à grande, la contribution des ventilateurs au niveau de puissance sonore en sortie d'air sera généralement inférieure à la contribution d'un ventilateur en tirage induit avec les ventilateurs placés au sommet. Cette différence peut aller jusqu'à 5 dB(A).

L'équation suivante a été utilisée pour montrer l'influence de la vitesse tangentielle du ventilateur sur le niveau de puissance sonore des ventilateurs axiaux :

$$L_w \text{ (dB(A))} = C + 30 \log U_{\text{tip}} + 10 \log (Q * P) - 5 \log D_{\text{fan}}$$

(C = facteur de forme caractéristique du ventilateur, U_{tip} = vitesse tangentielle du ventilateur, Q = débit du ventilateur, P = du ventilateur, D_{fan} = diamètre du ventilateur)

Les émissions sonores dépendent également de la construction de la tour de refroidissement. Le bruit provenant des tours en béton est entièrement émis via l'entrée et la sortie d'air. Pour les tours de refroidissement fabriquées en matériau plus léger, les émissions provenant de la structure devront être prises en compte. De plus, la conception à contre-courant ou en flux croisé affecte également les émissions sonores des tours de refroidissement humides. Il est rapporté que la conception en contre-courant génère un bruit d'éclaboussement plus important que les conceptions en flux croisé.

Les émissions sonores peuvent être caractérisées par les différentes fréquences qui les composent, et la distinction peut être faite entre les tours de refroidissement par voie humide à ventilation naturelle et mécanique. La chute de l'eau dans les tours à ventilation naturelle montre un large spectre de fréquences tandis que le bruit des ventilateurs des tours à refroidissement à tirage mécanique se compose surtout de basses fréquences. Ce qui, parmi d'autres facteurs, peut expliquer pourquoi le bruit de l'eau domine typiquement à proximité de l'installation tandis que le bruit des ventilateurs devient progressivement dominant en s'éloignant d'une tour de refroidissement fonctionnant grâce à un ventilateur.

Les niveaux de puissance sonore de différentes tours de refroidissement montrent des écarts importants, et chaque source isolée contribuera aux émissions totales. Cela est illustré par des exemples dans le Tableau 3.11 pour les centrales électriques [tm158, VGB, 1998], et dans le Tableau 3.10 montrant des valeurs pour différents systèmes de refroidissement utilisés dans les raffineries [tm001, Bloemkolk, 1997].

Les niveaux sonores de l'eau qui tombe dans les tours de refroidissement par voie humide dépendent de la hauteur de chute d'eau. Une hauteur de chute plus faible dans les tours de refroidissement humides à tirage induit produit une émission sonore inférieure d'environ 1 dB(A) au niveau de l'entrée d'air, et inférieure de 3 dB(A) pour les tours de refroidissement modulaires à tirage induit.

Tableau 3.10 : Exemples de puissance et de niveaux de puissance sonore non atténuée des systèmes de refroidissement des raffineries de grande taille

[tm001, Bloemkolk, 1997]

Équipement	Puissance ¹		L _w en dB(A)
Compresseurs	490/ 2 000	kW	108/ 119
Pompes	25 /100 / 1300	kW	94/ 98/ 108
Turbines à vapeur	1 000/ 2 000	kW	106/ 108
Refroidisseurs d'air	7 /20 / 60	kW	89/ 93/ 98
Condenseur à air/Refroidisseur d'air	170	kW	102
Condenseur à air/Refroidisseur d'air	2,7	MW _{th}	97
Refroidisseur d'air	14,7 MW _{th} / 18.8	kW _e	105
Refroidisseur d'air	1,5 MW _{th} / 7,5	kW _e	90
Tours de refroidissement	300	MW _{th}	106
Tour de refroidissement	2 000	m ³ /heure	105

Notes : 1. Référence à la puissance de l'élément rotatif, du moteur, etc... non de la puissance de refroidissement.

Tableau 3.11 : Comparaison des niveaux de puissance sonore non atténuée dans les entrées/sorties d'air mesurés dans différentes tours de refroidissement humides de construction traditionnelle

[tm158, VGB, 1998]

Tour de refroidissement humide	Au niveau de l'entrée d'air en dB(A)	Au niveau de la sortie d'air (ouverture du diffuseur) en dB(A)
À tirage naturel	84 ± 3	69 ± 3
Tour de refroidissement ouverte humide	86 ± 3	80 ± 3
Tour de refroidissement ouverte humide (modulaire, tirage forcé)	88 ± 3	85 ± 3
Tour de refroidissement ouverte humide (modulaire, tirage induit)	85 ± 3	88 ± 3

Le Tableau 3.12 indique les différents niveaux sonores totaux des différents types de systèmes de refroidissement sans insonorisation afin de les comparer. Compte tenu des écarts de puissances donnés précédemment, il est compréhensible que les plages dépendent de la conception et des équipements utilisés.

Tableau 3.12 : Émissions sonores de différents systèmes de refroidissement sans atténuation sonore

[tm134, Eurovent, 1998]

Système de refroidissement	Émissions sonores dB(A)
à passage unique	
tour de refroidissement – tirage naturel	90-100
tour de refroidissement – tirage mécanique	80-120
tour de refroidissement en circuit fermé	80-120
refroidissement hybride	80-120
refroidissement par air sec	90-130

3.6.2 Réduction du bruit

([tm158, VGB, 1998], [tm061, Eurovent/Cecomaf, 1997], [tm086, Van der Spek, 1993], [tm093, Mirsky, 1995])

Les mesures de réduction du bruit devraient tout d'abord être concentrées sur des mesures dites primaires ou « internes », avant d'envisager une mesure secondaire ou « externe » telle que des chicanes ou les grosses barrières. Différents guides de recommandation sur la réduction du bruit des tours de refroidissement distinguent le bruit généré par les cascades d'eau et le bruit des équipements mécaniques. En général, les tours de refroidissement à tirage naturel sont moins bruyantes (sans atténuation), mais pour les tours de refroidissement à tirage mécanique les mesures d'atténuation sonore sont plus efficaces. Bien entendu, une maintenance adéquate des équipements générant du bruit peut aussi faire baisser les émissions. Dans la plupart des cas, seules les tours de refroidissement à

tirage mécanique peuvent satisfaire les exigences sonores, car seule le tirage mécanique permet de surmonter la perte de charge supplémentaire. Le choix de ventilateurs radiaux moins bruyants implique souvent une consommation d'énergie plus élevée, et entraîne des coûts d'exploitation plus élevés qu'avec les ventilateurs axiaux.

« L'approche » générale consiste à utiliser d'abord des mesures primaires pour l'atténuation des émissions sonores. S'il faut réduire davantage le bruit, une atténuation complémentaire peut être envisagée. L'atténuation du bruit devrait être faite au regard des effets des mesures de réduction, telles que la perte de charge (davantage d'énergie nécessaire) et d'autres sources devenant plus dominantes. La contribution de chaque équipement sur le niveau d'émission sonore doit être considérée comme faisant partie de l'ensemble du problème de bruit. Cela signifie qu'à proximité des bâtiments, la dispersion et la réverbération, parmi d'autres facteurs, doivent également être pris en compte. Pour réduire les émissions des différentes sources potentielles de bruit dans les systèmes de refroidissement, les équations données précédemment permettent d'identifier clairement les sources prioritaires auxquelles il faudrait s'attaquer, telles que la hauteur de chute et la vitesse tangentielle des ventilateurs.

3.6.2.1 Contrôle du bruit de l'eau en cascade (tours de refroidissement humides)

Dans les tours à refroidissement à tirage naturel, les mesures d'atténuation du bruit sont prioritairement concentrées sur l'entrée d'air, car la sortie d'air contribue de façon peu significative au niveau sonore total ; elle est inférieure d'au moins 5 dB. Le bruit généré par la chute de l'eau dans le réservoir est déjà réduit dans une certaine mesure par la radiation dans la tour, l'échangeur de la tour et le panache (10-15 dB). Une mesure d'atténuation supplémentaire peut réduire l'émission sonore provenant de l'entrée d'air d'encore 5 à 8 dB. Les mesures suivantes sont proposées et devraient pouvoir être appliquées dans les tours de refroidissement de taille moyenne comme dans les grandes.

3.6.2.1.1 Mesures primaires

Les techniques suivantes ont été identifiées comme mesures primaires :

- L'abaissement de la surface de l'eau en drainant rapidement le bassin devrait permettre d'utiliser les parois du bassin comme barrières sonores.
- Il est possible de réduire la hauteur de chute de l'eau en minimisant la zone d'entrée d'air qui est limitée.
- On peut éviter l'impact des gouttelettes dans le bassin grâce à des dispositifs capturant les gouttes et les drainant dans le bassin (déflecteurs d'impact). Effet : 7 dB maximum.
- Des goulottes de collecte d'eau sous le garnissage ont également un effet d'atténuation : 10 dB maximum. L'inconvénient des méthodes d'atténuation est l'encrassement probable des surfaces des dispositifs de capture, ce qui peut potentiellement contaminer l'eau.

3.6.2.1.2 Mesures secondaires

Les mesures secondaires qui ont été appliquées sont :

- Des atténuateurs sonores avec des chicanes au niveau de la prise d'air : réduction de 20 dB maximum. L'inconvénient pourrait être la perte de charge qui peut atteindre 10 Pa. La perte de charge peut nécessiter 20 % de la puissance de ventilation installée.
- Des barrières en terre autour de la base de la tour : une réduction sonore de 10 dB.
- Des murs anti-bruits (ou écrans), avec des couches absorbant les sons, réduisent le bruit d'environ 20 dB. Avec ces constructions, l'efficacité dépend de la construction et de la distance de la base de la tour.

3.6.2.1.3 Tours de refroidissement par voie sèche

Le bruit provenant des tours de refroidissement par voie sèche est essentiellement causé par les ventilateurs, mais pour les tours sèches de taille moyenne à grande, le bruit de l'eau peut devenir dominant lorsqu'il s'écoule dans les échangeurs de chaleur à une vitesse élevée. En ce qui concerne les condenseurs, le son devient distinct lorsqu'un équipement silencieux est utilisé par ailleurs, et le bruit du flux dans les tubes du condenseur peut atteindre la même magnitude que celle du bruit du ventilateur. Dans ces cas, il faut chercher à atténuer davantage le son, et l'isolation des conduites de raccordement doit être envisagée.

3.6.2.2 Contrôle du bruit d'équipements mécaniques (tours de refroidissement à tirage mécanique)

Pour le contrôle du bruit de l'eau en cascade dans les tours de refroidissement à tirage mécanique de taille moyenne à grande, les mêmes mesures primaires que celles qui ont été mentionnées dans les tours à tirage naturel peuvent être utilisées. De plus, on peut également utiliser :

- des grilles ou des structures tissées de treillis fins, dérivant à la surface de l'eau pour réduire le bruit des gouttes qui tombent. Aucune estimation chiffrée de l'effet de réduction n'est disponible.

L'atténuation du bruit des équipements mécaniques concerne essentiellement la réduction du bruit produit par les ventilateurs dans les tours de refroidissement par voie sèche et humide. Les mesures appliquées sont primaires (équipements) ou secondaires (absorption). Les différentes mesures de réduction du bruit permettent d'obtenir des niveaux de réduction du bruit de l'ordre de 20 dB(A) et jusqu'à 30 dB(A). Pour ces niveaux de réduction importants du bruit, il est nécessaire de combiner des équipements plus silencieux à des dispositifs de réduction tels que les chicanes acoustiques ou les atténuateurs sonores. Ces équipements d'atténuation passive du bruit génèrent des coûts d'investissement supplémentaires, mais les coûts d'exploitation restent raisonnables.

3.6.2.2.1 Mesures primaires

Les mesures primaires suivantes ont été rapportées :

- Mesures sur le ventilateur :
 - ventilateurs à faible puissance (couple de réduction des dB(A) ;
 - les gros ventilateurs pour le refroidissement de l'air peuvent avoir une différence de 2 à 6 dB(A) ; le nombre de pales, 6 à 8 au lieu de 4, fait également la différence (tout en réduisant les besoins énergétiques) ;
 - utilisation de ventilateurs avec des pales plus larges et une vitesse périphérique plus faible (< 40 m/s) pour le même débit d'air et la même pression ;
- Des pignons peu bruyants (petits ratios de transmission ou moteurs multipolaires) tels que des pignons hélicoïdaux à la place des pignons à angle droit, des courroies de commande et, si possible, des transmissions directes.
 - Des transmissions par des courroies en V, des courroies plates ou des courroies moulées avec une encoche.
 - Des moteurs de ventilateur silencieux ;
 - Des ventilateurs centrifuges à la place des ventilateurs axiaux ;
 - La distance la plus importante possible entre les pales des ventilateurs et le support ;
 - L'utilisation de supports de courroies et de moteurs de ventilateurs flexibles ;
 - La conception aérodynamique des passages d'air.

On peut obtenir davantage de réduction en veillant au mode de fonctionnement des équipements. Le nombre de tours par minute peut permettre de réduire davantage le bruit du ventilateur. Dans une période où la demande est faible (nuit), les ventilateurs peuvent tourner avec une vitesse de rotation plus faible et si l'on réduit la vitesse de 50 %, on obtiendra une réduction de bruit allant de 6 à 10 dB(A).

3.6.2.2.2 Mesures secondaires

Les mesures secondaires pour les tours de refroidissement à tirage mécanique au niveau de la prise d'air et des rejets sont avantageuses. Par rapport à l'avantage que représente une réduction sonore de 10 à 25 dB(A), une perte de charge plus élevée de 20 à 70 Pa doit être acceptée ; elle sera compensée par une consommation énergétique supplémentaire ou par des ventilateurs plus gros et donc plus bruyants.

Exemples :

- Le camouflage du flux d'air et les boîtiers peuvent contribuer à une réduction de 5 dB(A).
- Les panneaux porteurs d'absorbants sonores qui sont construits au niveau de l'évacuation d'air (diffuseur) des tours de refroidissement plus petites, réduisent les émissions sonores et donnent également une meilleure trajectoire.
- Les séparateurs de gouttes dans les tours de refroidissement humides peuvent être couverts.
- De plus, les monticules ou les murs (bâtiments ou barrières sonores) autour de l'ouverture de l'entrée d'air ont prouvé leur efficacité. La réduction sonore obtenue grâce à la protection peut atteindre jusqu'à 20 dB(A) à proximité de la tour de refroidissement.

3.6.2.3 Coûts d'insonorisation

Les coûts des mesures d'insonorisation varieront considérablement en fonction du type de mesure et s'il s'agit d'une nouvelle installation de refroidissement ou d'une mesure lors du rétrofit d'une installation existante. Pour une nouvelle installation de tour hybride, le coût total des mesures d'insonorisation (ventilateur, cloisonnement) représentent environ 20 % de l'investissement total.

Un exemple montre comment les coûts peuvent augmenter avec l'importance de l'insonorisation. Pour un ventilateur axial (valeur C et vitesse tangentielle), plusieurs conceptions peuvent être utilisées sans diminuer la charge et le rendement du ventilateur. En ce qui concerne les ventilateurs très silencieux et extrêmement silencieux, les mesures complémentaires génèrent des coûts supplémentaires.

Tableau 3.13 : Exemple d'évolution des coûts avec différents types de ventilateurs pour une réduction du niveau sonore

Extrait de [tm086, Van der Spek, 1993]

Type de ventilateur	Niveau de puissance sonore (dN(A))	Indice de prix
Classique	100	1
Peu bruyant	95	1.5
Très silencieux	90	3
Extrêmement silencieux	85	4

Les données du Tableau 3.13 montrent uniquement les écarts de coûts entre les différentes conceptions de ventilateurs, mais les coûts pour la transmission, l'insonorisation et la construction de la tour de refroidissement devraient également être pris en compte. Le coût des mesures primaires telles que les ventilateurs silencieux peut en même temps permettre de réduire les coûts de fonctionnement, en raison des faibles besoins en énergie. On peut donc pas conclure que l'insonorisation ne serait pas économique.

3.7. Risques associés aux systèmes de refroidissement industriels

3.7.1 Risque de fuite

[tm001, Bloemkolk, 1997]

3.7.1.1 Occurrence et conséquences

On peut observer des fuites à la fois dans les systèmes de refroidissement à air et à eau, mais en général les fuites concernent les systèmes de refroidissement à eau. En particulier, dans les systèmes à passage unique, la contamination pénétrera immédiatement dans l'environnement aquatique via l'eau de refroidissement. Dans les systèmes en circuits ouverts et fermés humides et hybrides, la contamination ne sera pas immédiate, mais les fuites contamineront le fluide de refroidissement et sa composition chimique sera modifiée. Ceci aura des conséquences sur le procédé d'échange de chaleur. Cet effet des fuites sur le fonctionnement des biocides oxydants et non oxydants a été clairement démontré [tm090, Grab et al, 1994]. Au final, les fuites de substances du process seront rejetées avec la purge.

Dans les systèmes à refroidissement direct par air, les fuites peuvent contaminer l'air de refroidissement, mais en général elles ne sont pas considérées comme étant un problème pour l'environnement si on utilise des systèmes de refroidissement par air sec. C'est à l'opérateur qu'il revient d'essayer de prévenir les fuites des systèmes de refroidissement par voie sèche. Les systèmes de refroidissement utilisant des fluides frigorigènes ne font pas partie du périmètre de ce document.

Les échangeurs de chaleur sont sujets à la corrosion, à l'érosion et à d'autres formes d'usure. Des facteurs tels que le choix des matériaux, la vitesse du fluide, la température des parois et les niveaux de pression y contribuent. On peut ainsi observer des fuites du fluides de process et la contamination du fluide de refroidissement ou la contamination/perturbation du procédé. Le type de refroidisseur peut également avoir une certaine influence sur le risque de fuite. En pratique, une opération qui est différente de celle prévue lors de la conception provoque des vibrations, puis des fuites. Une fuite devient un problème préoccupant lorsque le flux à refroidir contient des composants qui sont dangereux pour l'environnement. Les fuites provenant des condenseurs dans les centrales électriques ou les condenseurs des installations d'évaporation ne sont pas considérées comme étant un problème du point de vue de la qualité de l'eau, mais plutôt d'un point de vue technique. Dans les centrales électriques, une fuite signifie une perte de vide dans le condenseur, entraînant une perte d'efficacité du procédé de génération d'électricité. Avec le refroidissement des chaudières (génération de vapeur), une fuite d'eau peut entraîner des explosions.

La perte de produit par infiltration dans les échangeurs de chaleur peut être importante lorsque, dans un environnement corrosif (tel que l'eau de mer), des matériaux facilement corrodés sont utilisés (comme des condenseurs en cuivre par exemple). Le cuivre est souvent utilisé car il réduit le risque d'encrassement, mais en réalité on observe également de l'encrassement dans les condenseurs en cuivre. Les émissions de cuivre ne sont pas souhaitables et peuvent être empêchées si l'on utilise des matériaux tels que le titane et l'acier inoxydable ou si l'on ajoute des produits anti-corrosion.

Les fuites sont également parfois attribuées au « suintement » des refroidisseurs. Elles concernent la présence de petites fissures filiformes ou de fuites dans les matériaux défectueux. Les défauts les plus courants des échangeurs de chaleur sont, dans la pratique, causés par :

- la corrosion/l'érosion résultant de la pollution chimique,
- la corrosion résultant de l'encrassement biologique, chimique ou de la présence de bactéries,
- l'érosion mécanique (liée aux fissures ou aux mouvements des moules),
- les vibrations (causées par le flux ou la résonance des pompes externes, etc.),
- les fuites dans des matériaux défectueux,
- l'oxydation des connexions plaque/tube profilées,
- le déplacement des attaches tube/plaque,
- le stress sur les matériaux résultant d'une mauvaise pression de fonctionnement et/ou d'une mauvaise température
- le gradient de température trop élevé aux bornes du refroidisseur, un gradient supérieur à 50°C peut causer des problèmes.

Dans les systèmes à passage unique utilisant des volumes importants, les petites fuites sont difficiles à détecter. Dans le cas de systèmes de refroidissement qui contiennent plusieurs échangeurs de chaleur, il peut toujours y avoir plusieurs échangeurs de chaleur défectueux, créant un niveau de pollution plus ou moins constant dans l'eau de refroidissement. Ce niveau reste faible et difficilement détectable dans un flux d'eau important. Des niveaux plus importants de fuite peuvent être détectés, mais en général cela signifie également une émission considérable et significative. Dans les systèmes à recirculation avec des tours de refroidissement, les possibles composés volatiles sont extraits et la fuite est rejetée dans la purge. Dans ce cas, du fait du faible volume du flux de rejet, la détection est plus facile et la purge peut être traitée si nécessaire.

L'amplitude des fuites est généralement constatée suite à des incidents, et dans une moindre mesure grâce aux contrôles dans les systèmes à passage unique. Les fuites plus importantes sont détectées et elles sont en principe assez significatives. Les données provenant des exemples actuels ont montré qu'on pouvait facilement obtenir des niveaux de 100 à 3 000 kg/24 heures avec des flux de sortie en mg/l avec des effluents importants (10 000 m³/heure et plus). La fréquence des pannes pour différents types d'échangeurs de chaleur montre des variations importantes.

3.7.1.2 Réduction des pertes par fuites

Les échangeurs de chaleur devraient être conçus pour empêcher les fuites. Différentes organisations ont donné des recommandations concernant la nature de la maintenance. Elles préconisent de combiner la maintenance préventive et corrective car la prévention seule ne permet pas de contrôler tous les problèmes. La maintenance préventive fait souvent partie intégrante d'un arrêt de production, tous les deux ans. Avec la maintenance corrective, un refroidisseur est arrêté et les fuites sont réparées, par exemple en colmatant un tube fuyant ou en remplaçant une rangée de tubes. Pour les échangeurs de chaleur qui ne peuvent pas être déconnectés pour des raisons techniques liées à la production, il est important qu'un second refroidisseur soit disponible en réserve. Il devient de plus en plus clair que les pannes et les fuites sont surtout causées par un défaut de conception. Dans l'industrie de transformation, tous les coûts supplémentaires liés à une construction plus chère ou à l'utilisation de matériaux de meilleure qualité sont facilement compensés par les coûts des pannes. Les coûts d'investissement sont faibles par rapport à ceux engendrés par une perte de production. La conception des échangeurs de chaleur devrait donc se faire sur la base d'une « prévision de disponibilité ».

Les mesures générales suivantes permettent de réduire l'occurrence des fuites :

- choisir les matériaux équipant les systèmes de refroidissement par voie humide en fonction de la qualité de l'eau utilisée ;
- faire fonctionner le système en cohérence avec sa conception,
- si le traitement de l'eau de refroidissement est nécessaire, choisir le programme de traitement adéquat ;
- surveiller les fuites dans le système d'évacuation de l'eau de refroidissement pour les systèmes de refroidissement par voie humide (purge).

Si des problèmes se posent en pratique, plusieurs options sont possibles en fonction de leurs causes :

Au niveau du composant (l'échangeur de chaleur) :

- vérifier les causes d'érosion, de corrosion
- vérifier les conditions de fonctionnement par rapport aux conditions de conception
- remplacer le refroidisseur par un type amélioré, en vérifiant sa construction et son matériau
- drainer le flux pollué par des fuites vers la purification (purification du sous-flux concerné)

- recirculation destinée à refroidir le flux d'eau du refroidisseur concerné, par un refroidisseur d'air et/ou un refroidissement indirect par eau (cette option ne résout naturellement pas les pannes de production résultant d'une panne du refroidisseur).

Au niveau du système (tout ou partie du système de refroidissement) :

- maintenir une différence de pression aussi faible que possible entre l'eau de refroidissement et l'eau de process, ou créer ou maintenir la surpression dans l'eau de refroidissement
- convertir en un système indirect ou, si cela est possible techniquement, convertir en un système à recirculation avec une tour de refroidissement (en tenant compte de la volatilisation potentielle des composants).

Le concept de sécurité VCI, utilisé par l'industrie chimique, considère les fuites comme une décharge temporaire de substances entraînant des modifications néfastes à long terme sur les masses d'eau. Pour prévenir et contrôler ce problème, les substances chimiques du procédé sont classées, et le classement final est lié aux exigences concernant le choix du système de configuration de refroidissement (indirect) et la façon dont les fuites sont contrôlées (voir Annexe VII).

Il est évident que l'utilisation d'un système entièrement indirect ou d'un système à recirculation avec une tour de refroidissement peut contrôler presque 100 % des fuites. L'eau encrassée peut être libérée seulement si la pression du système chute, mais ce flux est faible et contrôlable. Toutefois, si l'on choisit les deux options, il faut être conscient des exigences que cela implique sur le process à refroidir. Une conception indirect ou l'utilisation d'une tour de refroidissement augmentera l'approche et la température finale minimale du fluide de process sera atteinte. Si le process à refroidir peut le tolérer, les caractéristiques des substances du process peuvent justifier une conception indirecte visant à protéger l'eau de surface contre toutes les émissions indésirables liées à des fuites.

Certaines entreprises utilisent délibérément un système de refroidissement où certaines parties sujettes à des fuites sont refroidies par un système indirect, et où celles qui ne sont pas sujettes aux fuites ne le sont pas. Étant donné que le contrôle des fuites semble difficile, pour les substances à refroidir prioritaires ou toxiques pour l'environnement, il est préférable d'éviter les systèmes à passage unique, notamment à la lumière des alternatives disponibles.

Pour un système de refroidissement existant, une conception indirecte n'est généralement pas la solution la plus intéressante du point de vue technique et économique. Le retour d'expérience concernant l'utilisation d'une bonne maintenance et d'un programme de contrôle dans un système de refroidissement à passage unique de grande taille utilisant de l'eau de mer a donné de bons résultats. Certains remplacements de refroidisseurs étaient nécessaires, mais 90 % des pannes dans différents échangeurs de chaleur pourraient être réduites par un traitement anti-encrassement approprié, et en les faisant fonctionner soigneusement (contrôle des vibrations, manutention des pompes et précaution sur les pincements du flux). La détection des fuites est utilisée et, grâce à une détection aux bons endroits, la durée entre le déclenchement de la fuite de l'échangeur de chaleur et la détection peut être réduite.

La détection des fuites dans les systèmes à passage unique est difficile, mais un point de départ recommandé est l'identification des échangeurs de chaleurs sujets aux fuites et refroidissant des substances nocives. Une mesure plus sélective et précise des fuites sera alors possible. Les maintenances préventive et corrective sont toutes deux importantes pour surmonter les problèmes de fuites, mais une conception adéquate est généralement plus économique.

3.7.1.3 Réduction par maintenance préventive

Le contrôle visuel, le test hydrostatique et des investigations supplémentaires sur les tubes extraits sont des exemples d'anciennes méthodes d'inspection. Les limites de ces méthodes étaient que le contrôle se limitait uniquement à la partie visible des tubes. La saleté masque souvent les premiers stades des défauts et la corrosion uniforme est difficile à détecter à l'œil nu. Les tests hydrauliques ne détectent que les tubes occasionnant des fuites. La question qui se pose est de choisir un tube représentatif pour faire des investigations plus poussées. Par conséquent, les anciennes méthodes d'inspection décrites précédemment ne pourraient pas empêcher la pollution de l'environnement liée à des fuites soudaines, à une panne, à une réduction de la puissance et/ou à l'occurrence de produit hors spécification. D'autre part, une grande partie des tubes de rechange doit être mise en stock pour procéder à des retubages soudains.

Les expériences réalisées avec une nouvelle méthode d'investigation des tubes d'échangeurs de chaleur (utilisant le principe des courants de Foucault) ont montré que la fiabilité des tubes des échangeurs de chaleur peut être accrue de façon significative et que les émissions causées par des fuites peuvent être réduites. Puisque cette méthode est capable de tester un tube unique et de prévoir ses pannes, la fréquence de contrôle se basera sur les faits. Par conséquent, les méthodes de contrôle permettant de prévoir le risque de panne des tubes individuellement dans un

échangeur de chaleur peuvent entraîner une réduction de la consommation de tubes, permettre de mieux gérer les stocks et de mieux connaître le comportement de la corrosion dans ses premières phases. Cela entraînera une diminution des pannes soudaines liées aux tubes présentant des fuites, et la réduction des émissions via l'eau de refroidissement aura un effet bénéfique sur l'environnement.

L'utilisation de cette méthode sur le site d'une installation chimique a entraîné une réduction de plus de 90 % du pourcentage de retubage depuis l'introduction de cette méthode en 1990 [Paping, Dow Chemical Benelux Terneuzen, 1999]. Cela a également entraîné une réduction des coûts annuels. Les économies annuelles moyennes liées à la réduction du nombre de tubes à remplacer sont environ 5 fois aux coûts d'inspection. Le nombre d'arrêts de process non prévus liés à des fuites au niveau des tubes a été réduit d'environ 90 % au cours des 10 dernières années.

3.7.2 Stockage et manipulation des produits chimiques

Le stockage et la manipulation des substances chimiques sont un problème environnemental potentiel des systèmes de refroidissement par voie humide. Le dosage des additifs des systèmes de refroidissement peut être continu ou intermittent et les substances chimiques peuvent être injectées pures ou diluées. La quantité de substances chimiques et leur caractéristiques varient énormément et dépendent d'un ensemble de facteurs (tels que la composition chimique de l'eau et le matériau de l'échangeur de chaleur) : le risque lié au stockage et à la manipulation variera en conséquence.

Par exemple, pour le contrôle du pH, l'acide sulfurique concentré est utilisé ; il est habituellement stocké dans des réservoirs en acier doux. Une ventilation adaptée est requise pour prévenir l'accumulation d'hydrogène explosif dans le réservoir de stockage. Des filtres installés en amont des pompes acides sont conseillées pour retirer tous les produits de corrosion résiduels, ou d'autres solides pouvant être présents dans le réservoir de stockage.

Quelquefois, les additifs sont produits sur site. Par exemple, l'hypochlorite peut être produite sur des sites côtiers par électrolyse de l'eau de mer. Ce processus appelé électro-chloration peut être dangereux par la formation potentielle de gaz chloré. De plus, l'installation nécessite un nettoyage fréquent avec des acides. Dans la mesure du possible, des traitements alternatifs sont utilisés pour éviter ces risques (Annexe XI.3.4.7).

Les additifs peuvent être alimentés manuellement par l'opérateur ou par un système sophistiqué contrôlé par ordinateur. Cette opération peut également être sous-traitée à des entreprises spécialisées, généralement le fournisseur des additifs. L'alimentation manuelle présente un risque élevé de déversement, et pour des raisons environnementales et sanitaires des procédures de sécurité pour la manipulation devraient être appliquées. Les systèmes automatisés courent le risque d'être négligés, mais nécessitent un contrôle régulier.

Dans l'Union Européenne, des réglementations spécifiques concernant le transport, le stockage ou la manipulation des substances chimiques doivent être observées, et les autorisations d'exploitation nécessitent des mesures propres à chaque site. En général, l'objectif est de réduire le risque de déversement et de fuite pour empêcher la contamination des sols et/ou des eaux souterraines et réduire le risque d'explosions en définissant une zone restreinte où le stockage et la manipulation de produits chimiques est autorisée. Ces zones sont équipées de sols imperméables ou de caillebotis avec un merlon pour maintenir les substances chimiques réactives séparées et conserver le taux de ventilation minimal requis.

Les mesures MTD pour le stockage des substances dangereuses sont décrites dans le BREF concernant les émissions provenant du stockage.

3.7.3 Risque microbiologique

3.7.3.1 Apparition de microbes

Les risques microbiologiques provenant des systèmes de refroidissement sont relatifs à l'occurrence de différentes espèces pathogènes dans l'eau de refroidissement ou dans des parties du système qui sont en contact avec l'eau de refroidissement, telles que les biofilms dans les échangeurs de chaleur et le corps d'échange des tours de refroidissement. Ces risques ne sont pas un problème dans les systèmes de refroidissement par voie sèche.

Les principaux pathogènes thermophiles qui se trouvent dans les systèmes de refroidissement par voie humide utilisant l'eau des rivières sont la bactérie *Legionella pneumophila* (Lp) et l'amibe *Naegleria fowleri* (Nf). Dans l'eau de mer, certaines espèces de vibrio halophiles, pathogènes pour les poissons ou pour l'homme, peuvent se

développer dans des systèmes de refroidissement à passage unique. Les espèces mentionnées apparaissent dans l'environnement naturel dans des concentrations généralement faibles et sans danger. En raison de la température plus élevée, un climat favorable peut faciliter le développement de ces bactéries dans les systèmes de refroidissement, ce qui peut représenter un risque potentiel pour la santé humaine. Le développement de la *Legionella* est favorisé par l'encrassement, la présence d'amibes, de ciliés et d'algues. Il se propage par les aérosols. Suite à de nombreux cas, l'occurrence et les caractéristiques de la maladie du Légionnaire (LD) et le développement de *Lp* ont fait l'objet de recherches approfondies sur le plan médical et biologique. Mais de nombreux points relatifs à la composition chimique et à la technologie de traitement restent à clarifier.

Dans le panache d'une tour de refroidissement à tirage naturel ayant une hauteur importante et un éliminateur de gouttes fonctionnant bien, l'émission de bactéries est d'autant moins importante, mais pas impossible. Une concentration élevée de *Lp* dans le panache d'une tour de refroidissement par voie humide à tirage naturel a été observée. Elle est liée à l'encrassement sur les parois en béton de la tour de refroidissement. La pellicule a été séparée de la paroi, puis elle est tombée dans l'éliminateur de gouttes [tm145, Werner et Pietsch, 1991].

L'apparition de *Lp* dans le panache des tours de refroidissement industrielles à tirage mécanique qui ont une hauteur inférieure à celle des tours à tirage naturel a été observé à plusieurs reprises [tm040, Schulze-Robbecke et Richter, 1994], mais le lien de cause à effet entre les tours de refroidissement et l'apparition du LD n'a pas pu être clairement établi. Lorsqu'une relation a pu être établie entre les systèmes de refroidissement et l'apparition du LD, elle a toujours concerné des systèmes mal entretenus [Morton et al., 1986].

Les conditions typiques des tours de refroidissement par voie humide qui favorisent le développement de la *Legionella* sont :

- la température de l'eau dans la tour de refroidissement se situe entre 25 et 50°C ;
- le pH se situe entre 6 et 8 ;
- la présence d'encrassement.

Moins d'informations ont été soumises sur l'occurrence et le traitement d'autres pathogènes tels que le *Nf*. Il fut observé que le développement de *Nf* est inhibé par le laiton et renforcé par l'acier inoxydable. Les amibes sont également plus abondantes dans les systèmes de refroidissement à circulation forcée que dans les systèmes de refroidissement à passage unique. Des recherches ont été conduites sur le traitement de *Nf* après avoir rencontré un niveau élevé dans les installations de refroidissement (3000 l^{-1}), puis après avoir remplacé les condenseurs dans une centrale électrique française. La chloration continue avec un niveau de chlore libre résiduel se situant entre 0,3 et 0,5 mg/l a immédiatement diminué les concentrations de *Nf*, et les niveaux sont restés inférieurs à 4 pathogènes/l. [tm 144, Cabanes et al, 1997].

3.7.3.2 Mesures des bactéries

Les bactéries *Lp* sont mesurées en unités formant des colonies ou en UFC par litre et leur concentration varie dans l'eau des tours de refroidissement de concentrations très faibles (inférieure à 10 UFC/l) à très élevées (10^5 - 10^6 UFC/l). Dans les biofilms, des concentrations de *Lp* allant jusqu'à 10^6 UFC/cm² furent trouvées.

Pour les systèmes de conditionnement d'air, des valeurs de 100-1000 UFC sont utilisées au Royaume-Uni, mais il est difficile de savoir si l'on peut les comparer aux niveaux dans les tours de refroidissement bien entretenues et aux risques associés à ces situations. Il est recommandé de maintenir la concentration de *Lp* au dessous 10^4 UFC/l. La quantification des concentrations représentatives de *Lp* dans les systèmes de refroidissement industriels et le niveau d'UFC dans les tours de refroidissement par voie humide qui est acceptable en ce qui concerne le respect de la santé humaine nécessitent des investigations supplémentaires.

3.7.3.3 Techniques visant à réduire les risques microbiologiques

([038, Millar et al., 1997] et [tm040, Schulze-Robbecke et Richter, 1994], [tm166, Morton et al, 1986] [tm167, Fliermans, 1996],)

La chaîne d'évènements favorisant l'apparition d'un foyer de *Legionella* implique :

- le développement d'une souche virulente de la bactérie dans le système de refroidissement
- les conditions favorisant la prolifération bactérienne
- le rejet dans l'atmosphère sous forme d'aérosol de l'eau contaminée
- suffisamment de gouttelettes profondément inhalées par des sujets sensibles

La prévention de la *Legionella* devrait par conséquent reposer sur la prévention du développement et de la multiplication des bactéries dans le système de refroidissement. Aux États-Unis et au Royaume Uni notamment, des recommandations ont été développées pour prévenir les LD. Une analyse régulière du réservoir potentiel (une tour

de refroidissement par exemple) et une maintenance de routine supplémentaire, un pH correct, de bons niveaux de températures, des niveaux adéquats de biocides résiduels et le contrôle de la qualité de l'eau d'appoint peuvent empêcher l'apparition d'environnements favorables à la *Legionella*.

Concernant la prévention de la formation des bactéries Lp (et d'autres bactéries) dans les tours de refroidissement, les mesures suivantes devraient être appliquées :

- utiliser de l'eau propre et prétraiter l'eau de refroidissement dans la mesure du possible ;
- éviter les fuites de process dans le système de refroidissement ;
- éviter les zones stagnantes ;
- empêcher la formation en réduisant l'énergie lumineuse dans la tour de refroidissement et évitant la formation d'algues ; les bassins d'eau ouverts doivent être évités ;
- faciliter l'accès à un nettoyage régulier ;
- utiliser des éliminateurs de gouttes qui peuvent être facilement nettoyés ou remplacés ;
- concevoir des températures d'eau froide aussi basses que possible (approches faibles) ;
- éviter le tartre et la corrosion ;
- optimiser la construction pour améliorer la vitesse de l'eau et de l'air ;
- on ne peut pas établir une distance minimale entre la tour de refroidissement et les zones habitées, mais il faut veiller à ce que le panache n'atteigne pas le niveau du sol ou des zones habitées si l'espace le permet ;
- la minimisation de la formation de panache pourrait réduire la dispersion.

En considérant l'emplacement d'une tour de refroidissement, un classement du risque microbiologique associé à une tour de refroidissement et basé sur la population hôte et sur la susceptibilité potentielle de cette population a été suggéré. Les catégories sont les suivantes:

- Catégorie 1 : le risque le plus élevé – une tour de refroidissement desservant ou située à proximité (<200 m) d'un hôpital, d'une garderie ou d'un autre établissement de soin soignant des personnes qui peuvent être affaiblies d'un point de vue immunologique ;
- Catégorie 2 : une tour de refroidissement desservant ou située à proximité (>200 m) d'une maison de retraite, d'un hôtel ou d'un autre type d'hébergement accueillant un grand nombre de personnes ;
- Catégorie 3 : une tour de refroidissement dans un voisinage résidentiel ou industriel ;
- Catégorie 4 : risque le plus faible – une tour de refroidissement isolé de tout environnement résidentiel (>600 m d'une zone résidentielle).

Sur la base de ce classement, la surveillance de la présence *Legionella* peut être mensuelle (risque élevé), mensuelle à trimestrielle (Cat. 2), trimestrielle à annuelle (Cat. 3) ou seulement annuelle, après l'été (Cat. 4).

Les mesures suivantes sont recommandées aux opérateurs des tours de refroidissement :

- il faut faire attention lorsque le process s'arrête, puis redémarre, surtout si le système de refroidissement est arrêté pendant plus de 4 jours.
- en entrant dans les tours de refroidissement, les opérateurs devraient éviter d'inhaler de l'air, en utilisant une protection de la bouche et du nez (les masques P3 se sont avérés efficaces) ;
- En cas de nettoyage d'un système de refroidissement dans lequel du Lp aurait été décelé, une combinaison de nettoyage mécanique et de dosage choc d'un biocide.

Des remarques complémentaires sur ces recommandations peuvent être faites. Après une fermeture prolongée, il est impératif de traiter les systèmes de refroidissement avec un biocide (chlore). S'il apparaît que le système est sale ou contaminé, y compris ses accessoires tels que les systèmes d'insonorisation, il devra être nettoyé et subir un traitement choc au biocide avant le démarrage. Une entreprise de traitement des eaux qualifiée devrait prendre en charge cette opération. La désinfection du système peut s'avérer nécessaire s'il a été lourdement contaminé.

Par expérience, on sait que le traitement chimique ne traite principalement que les bactéries présentes dans l'eau. Pour contrôler et nettoyer le système de refroidissement en profondeur, il faut prêter attention aux sédiments et à l'encrassement à la surface du système, d'où l'importance du nettoyage mécanique.

Le niveau de chlore libre de 50 mg/l mentionné dans la documentation de référence est clairement un niveau de dosage choc qui a été utilisé après une apparition de LD. En raison de l'importante quantité d'hypochlorite impliquée, il est clair que ce traitement n'est pas approprié comme niveau de maintenance dans une tour de refroidissement. Dans tous les cas, après un dosage choc, la désintoxication de l'eau de refroidissement serait nécessaire avant son rejet, et son traitement avec du bisulfite a été couramment utilisé.

Un niveau de maintenance élevé pour empêcher les développements de *Lp* doit être favorisé dans la mesure du possible. En général, les biocides oxydants sont privilégiés pour tuer la *Legionella* dans l'eau. Des agents actifs plus lents sont nécessaires pour attaquer les bactéries dans les biofilms. Il faut ensuite procéder à un traitement avec des biocides non oxydants. Parmi ceux-ci, les QAC ont montré de meilleurs résultats que les isothiazolines.

Un rapport néerlandais récent [tm155, Berbee, 1999] contient des résultats sur la réduction du niveau d'UFC dans les tours de refroidissement, et confirment qu'un niveau de concentration minimal clair des biocides n'a pas encore été déterminé. On peut en conclure que des niveaux élevés de biocides étaient nécessaires pour réduire les concentrations, mais qu'ils n'ont montré qu'un effet temporaire. L'effet secondaire des niveaux élevés de sous-produits toxiques doit être pris en compte. Une température de l'eau inférieure s'est avérée plus efficace que l'utilisation de biocides (Tableau 3.14), mais elle ne pourra pas être systématisée. Des recherches sur l'effet du traitement sur des protozoaires ont montré que des concentrations très élevées sont nécessaires pour tuer les protozoaires et que les sporocystes sont difficilement susceptibles aux biocides non oxydants utilisés.

Tableau 3.14 : Effets de la température et du traitement par les biocides sur les niveaux d'UFC dans les tours de refroidissement

Relevés par Kusnetsov par [tm155, Berbee, 1999]

Tour de refroidissement	Effet d'une température plus basse	Concentration en biocides mg/l	Effet des biocides	Remarques
A	T 25°C~10 ⁵ UFC à T 15°C~10 ³ UFC	PHMB, 3, choc	Temporairement inférieur à la limite de détection	
B	T 25°C~10 ⁴ UFC à T 15°C~10 ³ UFC	PHMB, 5, choc	Temporairement inférieur à la limite de détection	
C	n.r.	PHMB, 2-250, choc	Pas clair	Changement, eau du robinet
D	n.r.	PHMB, 4-11, choc	Temporairement, 10 ⁴ UFC/l à 10 ³ UFC/l	
E	n.r.	BNPD, 65-190, choc	Temporairement, 10 ⁵ UFC/l à 10 ³ UFC/l	
Notes : PHMB : dichlorure de polyéxaméthylènebiguadine (QAC) BNPD : bromonitropropanediol				

3.8. Déchets provenant du fonctionnement du système de refroidissement

Peu d'informations ont été rapportées concernant les déchets ou les résidus provenant du fonctionnement des systèmes de refroidissement. Pour tous les systèmes de refroidissement, le déclassement de tout ou partie du système peut poser un problème à moment donné. Le retrofit et le remplacement des équipements ainsi que les méthodes de fonctionnement rendent nécessaire l'élimination des déchets suivants :

- la boue provenant du pré-traitement de l'eau d'appoint (décarbonatation), le traitement de l'eau de refroidissement ou la purge des tours humides fermée (voir Annexe XI 3.4) ;
- les déchets dangereux (petits containers, déversement) associés au traitement chimique de l'eau de refroidissement dans les systèmes de refroidissement humide ;
- les eaux résiduaires provenant des opérations de nettoyage ;
- les déchets provenant du retrofit, du remplacement ou du déclassement de l'installation.

3.8.1 Formation de boues

La formation de boues peut se produire dans les bassins de collecte des systèmes de refroidissement par voie humide. En termes quantitatifs, on obtient davantage de boue par le procédé de décarbonatation s'il est effectué sur site. Aucune mesure particulière n'a été rapportée concernant la réduction de la formation de boue. Par un conditionnement adapté de l'eau de refroidissement, on peut réduire la sédimentation de boue. À l'heure actuelle, la composition chimique de la boue et la législation locale (ou nationale) détermineront la méthode d'élimination des boues. Dans certains états membres, les boues peuvent revenir dans l'eau de surface d'origine, mais dans d'autres elles devront être traitées de façon plus rigoureuse.

Les boues déposées dans le fond des bassins à eau des tours de refroidissement peuvent contenir des cystes ou des formes résistantes de bactéries pathogènes et de protozoaires (3.7.3). Les amibes pathogènes et le *Legionella pneumophila* se trouvent dans des concentrations très élevées dans la boue collectée dans les tubes du condenseur au cours des temps d'arrêt ou dans la boue clarifiée par chlorure de fer [tm145, Werner et Pietsch, 1991]. Des cystes de *Lp* sont également présents dans le tartre du corps d'échange. C'est la raison pour laquelle il est conseillé d'analyser la qualité microbiologique de ce type de résidu avant de l'éliminer ou d'utiliser du PVC. Un traitement spécifique peut s'avérer nécessaire si la manipulation et le retraitement de ces déchets constituent un risque sanitaire important.

3.8.2 Résidus provenant du traitement de l'eau de refroidissement et des opérations de nettoyage

Le traitement de l'eau de refroidissement (notamment pour les systèmes de grande puissance) est aujourd'hui automatique et, dans la plupart des cas, les substances sont stockées dans des containers et dans des réservoirs. Elles sont utilisées, stockées, transportées et manipulées par le fournisseur.

Il en va de même pour les eaux résiduaires provenant des opérations de nettoyage. Là encore, de plus en plus d'entreprises spécialisées sont employées pour ce travail.

La génération et l'élimination de ce type de déchet ne sont toutefois pas caractéristiques des seuls systèmes de refroidissement industriels. Ce sont leur mode de fonctionnement ainsi que le pré-traitement de l'eau d'appoint et l'efficacité du traitement de l'eau qui conditionnent les problèmes que ces systèmes peuvent poser à l'environnement. Aucune information n'a été communiquée sur ce problème environnemental.

3.8.3 Résidus provenant du retrofit, du remplacement ou du déclassement de l'installation.

En général, les systèmes de refroidissement sont conçus et prévus pour une longue durée de vie (jusqu'à 20 ans, voire plus). Bien entendu, plus ils sont entretenus et bien pilotés et plus leur durée de vie sera longue, mais ils doivent également être conçus pour répondre aux circonstances particulières dans lesquelles ils seront utilisés. Des matériaux particuliers devraient également être pris en considération en raison de leur impact sur l'environnement lors de leur déclassement, ou comme pièces de rechange d'un système de refroidissement. Les exemples suivants ont été communiqués.

3.8.3.1 Utilisation du plastique

De plus en plus de types différents de plastiques sont utilisés pour la construction des tours de refroidissement tels que le chlorure de polyvinyle, le polypropylène, polyéthylène et la fibre de verre. Ils sont particulièrement adaptés à une utilisation dans un environnement souvent corrosif et extrêmement exigeant d'une tour de refroidissement. Les expériences actuelles ont été décrites dans une publication technique de la fédération allemande des professionnels de la production d'électricité [tm., VGB, 2000]. L'utilisation du plastique peut constituer une opportunité pour la réduction des déchets, s'il existe une possibilité de recyclage après remplacement des éléments plastiques. À ce jour, aucune expérience illustrant ce phénomène n'a été recensée.

3.8.3.2 Traitement du bois d'œuvre utilisé pour la construction des tours de refroidissement par voie humide

Le bois d'œuvre a été et continue à être utilisé pour les tours de refroidissement, mais il doit subir un traitement préalable pour en assurer la longévité. Le bois utilisé dans les tours de refroidissement pour le corps d'échange et les structures de soutien peut être traité chimiquement. Ce traitement a été et continue à être basé sur le CCA (sulfate de cuivre, dichromate de potassium et pentaoxyde d'arsenic) pour sa capacité à rester sur le bois. Au-delà de sa durée de vie, seulement 10 % de son poids serait perdu.

Il n'est pas possible d'estimer de façon chiffrée les émissions provenant du traitement au CCA du bois dans l'environnement aquatique. Le bois traité, même s'il a eu le temps de s'égoutter, a des quantités importantes de substances chimiques à sa surface. Elles peuvent être éliminées par le lavage initial de l'eau dans la tour de refroidissement et seront tôt ou tard rejetées dans l'eau de réception..

Étant donné que le CCA contient du Cr et de l'As, il semble peu probable qu'il continue à être utilisé très longtemps. Le traitement au CCA du bois n'est pas une des meilleures techniques disponibles et devrait être interdit. Des traitements de substitution pour la protection du bois ont déjà été développés et utilisés. C'est la raison pour laquelle on s'attend à ce que les émissions dans l'eau de surface provenant de l'utilisation du CCA se réduisent progressivement.

Si le bois traité au CCA doit être éliminé, certains pays autorisent l'élimination contrôlée dans une décharge appropriée car un faible lessivage est attendu. Dans d'autres états membres, l'incinération dans une installation appropriée est préconisée car la plupart des éléments seront retenus par des filtres à poussière. La définition de la technique la plus favorable pour l'élimination du bois traité par CCA se situe en dehors du périmètre de ce BREF, mais là aussi l'impact environnemental final des différentes options doit être évalué à ce niveau.

3.8.3.3 Garnissage de la tour de refroidissement humide

Dès que le garnissage de la tour de refroidissement doit être remplacé, il doit être éliminé. Les garnissages se composent de différents matériaux qui détermineront la façon dont ils doivent être traités. Aucune donnée concernant les niveaux de pollution de ces échangeurs n'est disponible.

Un exemple particulier est l'utilisation de trémolite (variété d'amiante). Il n'a pas été possible d'évaluer si cela a été le cas en Europe, mais la trémolite peut avoir été utilisée dans de nombreuses applications par le passé, incluant la construction des tours de refroidissement ou le remplissage des tours de refroidissement. Comme la dangerosité de l'utilisation de la trémolite ne fait plus aucun doute, elle n'est plus utilisée dans les tours de refroidissement. Dans les anciennes tours de refroidissement, on peut encore trouver de la trémolite et des mesures spécifiques sont nécessaires pour l'enlever.

Un exemple est donné en référence dans lequel un effritement du garnissage en trémolite s'est produit au bout de 10 à 17 ans d'utilisation, entraînant une réduction de l'échange de chaleur. L'extraction et le remplacement du remplissage nécessaires ont été effectués dans des conditions de sécurité draconiennes [tm082, Mittendorf, 1990].

4. MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES POUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT INDUSTRIELS

4.1. Introduction

Pour une meilleure compréhension de ce chapitre et de son contenu, l'attention du lecteur est attirée sur la préface du présent document et en particulier, sur la cinquième partie de la préface : « Comment comprendre et utiliser ce document ». Les techniques et les méthodes ainsi que les niveaux d'émission et/ou de consommation associés ou les gammes de niveaux présentés dans ce chapitre ont été évalués par le biais d'un processus itératif comprenant les étapes suivantes :

- identification des principaux problèmes environnementaux posés par le process ; l'augmentation de l'efficacité énergétique (amélioration de l'efficacité énergétique globale du process) est mise en évidence dans le procédé de refroidissement ainsi que la réduction des émissions dans les eaux de surface en optimisant le conditionnement de l'eau de refroidissement ;
- étude des techniques les plus pertinentes pour répondre à ces principales questions ;
- identification des meilleurs niveaux de performances environnementales, sur la base de données disponibles dans l'Union européenne et dans le monde entier ; dans la plupart des cas, les niveaux de performance sont considérés comme propres à chaque installation.
- examen des conditions avec lesquelles les niveaux de performance ont été atteints, telles que les coûts, les effets croisés, les moyens impliqués dans la mise en œuvre de ces techniques ; en général, les indications tarifaires des techniques dans les systèmes de refroidissement ont été analysées dans une moindre mesure.
- sélection des meilleures techniques disponibles (MTD) et des niveaux d'émission et/ou de consommation associés pour ce secteur de façon générale, conformément à l'Article 2(11) et à l'Annexe IV de la Directive.

Le jugement expert du Bureau IPPC (Bureau européen pour la prévention et réduction intégrées de la pollution) et du groupe de travail technique concerné (TWG) concerné a joué un rôle clé dans chacune de ces étapes et dans la façon dont les informations sont présentées ici.

En se basant sur cette évaluation, les techniques et, dans la mesure du possible, les niveaux d'émission et de consommation associés à l'utilisation des MTD, sont présentés dans ce chapitre. Ils doivent être considérés comme étant adaptés au système de refroidissement concerné, et reflète dans de nombreux cas les performances actuelles de certaines installations du secteur. Lorsque les niveaux d'émission ou de consommation « associés aux meilleures techniques disponibles » sont présentés, il faut comprendre que ces niveaux représentent les performances environnementales des techniques décrites qui pourraient être anticipées comme résultat de l'application, pour l'application et le site spécifiés, en gardant à l'esprit l'équilibre des coûts et les avantages inhérents à la définition des MTD. Toutefois, il ne s'agit pas de valeurs limites d'émission ou de consommation, ni de performance minimale requise. Dans certaines situations, il peut être techniquement possible d'obtenir de meilleurs niveaux d'émission ou de consommation, mais du fait des coûts impliqués ou des effets croisés, il ne pourra pas s'agir d'une MTD applicable à l'ensemble de la catégorie de systèmes de refroidissement. Cependant, de tels niveaux ou applications peuvent être considérés comme étant justifiés dans des cas plus spécifiques, lorsque l'ampleur de la mise en œuvre est spécifique.

Les niveaux d'émission et de consommation associés à l'utilisation des MTD doivent être envisagés avec toutes les conditions de référence spécifiées (comme le climat ou les limites du site).

Le concept de « niveaux associés aux MTD » décrit ci-dessus doit être distingué du terme « niveau réalisable » utilisé dans l'ensemble de ce document. Lorsqu'un niveau est décrit comme « réalisable » par le biais d'une technique ou d'une combinaison de techniques particulière, il devrait être compris que le niveau peut être atteint sur une période de temps conséquente, dans une installation ou un process faisant appel à ces techniques correctement entretenu(e) et utilisé(e).

Lorsqu'elles sont disponibles, les données relatives aux coûts ont été fournies avec la description des techniques présentées dans les chapitres précédents ou les Annexes. Cela donne une indication approximative de l'importance des coûts engendrés. Toutefois, le coût véritable de la mise en œuvre d'une technique dépendra fortement de la situation spécifique des taxes, charges et caractéristiques techniques entre autres de l'installation concernée. Il est impossible d'évaluer entièrement ces facteurs spécifiques à chaque site dans ce document. En l'absence de données sur les coûts, des conclusions sur la viabilité économique des techniques sont tirées des observations sur les installations existantes. Il est entendu que les MTD générales de ce chapitre sont un point de référence permettant de juger des performances actuelles d'une installation existante ou de juger la proposition d'une nouvelle installation. De cette façon, elles aideront à déterminer les conditions appropriées « basées sur les MTD » pour l'installation, ou à définir les règles générales d'engagement de l'Article 9(8). Il est prévu que les nouvelles installations puissent être conçues pour

atteindre, voire dépasser, les niveaux de MTD généraux qui sont présentés ici. On considère également que les installations existantes peuvent adapter, voire dépasser, les niveaux de MTD généraux, sous réserve de l'applicabilité technique et économique des techniques dans chaque cas.

Puisque les BREF ne fixent pas de normes juridiquement contraignantes, elles sont destinées à donner des informations à l'intention des entreprises, des États membres et du grand public sur les niveaux d'émission et de consommation qu'il est possible d'atteindre en utilisant certaines techniques. Les valeurs limites appropriées pour chaque cas particulier devront être déterminées en tenant compte des objectifs de la Directive IPPC et des considérations locales.

4.2. Approche horizontale permettant de définir la MTD pour les systèmes de refroidissement

Avant de faire la synthèse des conclusions sur les MTD dans ce chapitre, une brève explication de l'interprétation à donner du caractère horizontal de ce BREF devrait être faite.

Dans une approche horizontale, il faut partir du principe que les aspects environnementaux des techniques appliquées et des mesures de réduction associées peuvent être évalués, et qu'une MTD générique peut être identifiée indépendamment du process industriel dans lequel ces techniques seront appliquées.

Les systèmes de refroidissement industriels sont une partie intégrante du process industriel à refroidir. Les systèmes de refroidissement décrits dans ce document sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels entrant dans le champ de la Directive IPPC. Par conséquent, il existe un grand nombre d'applications, de techniques et de pratiques opérationnelles. De plus, le caractère thermodynamique du process entraîne de nombreuses variations de performance et a des impacts différents sur l'environnement.

En raison de ces variations importantes, il est difficile de comparer ces techniques pour amener à des conclusions générales sur la MTD. L'identification d'une approche générale de prévention est a priori possible, sur la base de l'expérience pratique acquise dans la réduction des émissions des systèmes de refroidissement.

Dans cette approche préventive, ou **approche MTD primaire**, l'attention est portée avant tout sur le process à refroidir. La conception et la construction du système de refroidissement sont essentielles dans une seconde étape, et notamment pour les nouvelles installations. Enfin, les changements d'équipements et la façon dont le système de refroidissement devrait fonctionner concerneront les nouvelles installations, mais sont particulièrement importants dans les systèmes existants où les options technologiques sont considérablement limitées et coûteuses. Cela nécessite d'effectuer des évaluations attentives au cas par cas.

4.2.1 Gestion intégrée de la chaleur

4.2.1.1 Refroidissement industriel = Gestion thermique

Le refroidissement des process industriels peut être considéré comme un management thermique et fait partie de la gestion énergétique globale dans une installation. La quantité et le niveau de chaleur à évacuer requièrent un certain niveau de performance des systèmes de refroidissement. Ce niveau de performance affectera à son tour la configuration du système, la conception et le fonctionnement et par conséquent la performance environnementale des systèmes de refroidissement (impact direct). De manière réversible, la performance de refroidissement affectera également l'efficacité globale du process industriel (impact indirect). Ces impacts, directs et indirects, doivent être équilibrés et prendre en compte toutes les variables. Chaque modification du système de refroidissement doit être prise en compte afin d'évaluer l'impact qu'elle pourrait avoir sur ce bilan général.

Ce concept peut être utilisé comme point de départ pour la formulation du principe premier des MTD pour les systèmes de refroidissement. La **MTD pour toutes les installations** est une approche intégrée visant à réduire l'impact sur l'environnement des systèmes de refroidissement industriels **en maintenant l'équilibre entre les impacts directs et indirects**. En d'autres termes, l'effet d'une réduction des émissions doit être équilibré par rapport au changement potentiel dans l'efficacité énergétique globale. Il n'y a actuellement pas de ratio minimum en termes de bénéfice environnemental et de perte possible d'efficacité énergétique globale qui puisse être utilisé comme référence pour définir des techniques qui peuvent être considérées comme MTD. Néanmoins, ce concept peut être utilisé pour comparer des solutions alternatives (Chapitre 3.2 et Annexe II).

4.2.1.2 Réduction du niveau de pertes thermiques par l'optimisation de la revalorisation interne/externe

Une approche préventive devrait démarrer par le process industriel nécessitant la dissipation thermique, et vise à réduire les besoins en décharge de chaleur en premier lieu. En réalité, la décharge thermique est une perte d'énergie, et comme tel ne peut être une MTD. La réutilisation de la chaleur dans le process devrait toujours être la première étape dans l'évaluation des besoins en refroidissement. Les mesures énergétiques intégrées au processus se situent en dehors du périmètre de ce document, mais des références sont faites aux autres Documents de Référence des MTD ébauchés dans le cadre d'IPPC et décrivant les options pour des mesures énergétiques.

Dans une **installation entièrement nouvelle**, l'évaluation de la puissance thermique requise ne peut être une MTD que si elle résulte d'une utilisation maximale des options interne et externe disponibles pour la réutilisation des excédents de chaleur.

Dans une installation existante, l'optimisation de la réutilisation interne et externe et la réduction de la quantité et du niveau de chaleur à évacuer doivent également précéder toute modification apportée à la capacité potentielle du système de refroidissement utilisé. Il faut évaluer si l'on peut accroître l'efficacité d'un système de refroidissement existant en améliorant le fonctionnement du système ou en recourant à des mesures technologiques telles que le retrofit ou le changement technologique. En général, et pour des systèmes de refroidissement de grande taille, les améliorations sur le fonctionnement des systèmes sont plus efficaces en termes de coûts que l'utilisation de nouvelles technologies ou de technologies améliorées et peuvent donc être considérées comme une MTD.

4.2.1.3 Système de refroidissement et exigences du process

Une fois que le niveau et la quantité de chaleur perdue générée par le process sont établis, et qu'aucune réduction supplémentaire de la chaleur perdue ne peut être obtenue, une première sélection d'un système de refroidissement peut être effectuée à la lumière des exigences du process décrites dans le Chapitre 1. Chaque process a ses propres exigences, où le niveau de contrôle du process, sa fiabilité et sa sécurité jouent un rôle important. Aussi, à ce stade, il est presque impossible de faire une première caractérisation des MTD, mais les conclusions suivantes peuvent être tirées par rapport à un certain nombre de caractéristiques de process.

L'utilisation des niveaux de température ambiante se base sur des expériences conduites en Europe sur l'application de systèmes de refroidissement dans différentes conditions climatiques. En général, les températures de bulbe sec ne justifient pas le refroidissement de rejets thermiques de bas niveau, et le refroidissement par eau est préféré. Mais dans des zones ayant une faible moyenne de températures de bulbe sec, le refroidissement par air sec est utilisé pour obtenir des températures de process inférieures (une fois que les options de réutilisation ont été explorées). Le refroidissement par eau, si une quantité d'eau suffisante est disponible, peut évacuer la quantité résiduelle de chaleur perdue.

Les substances dangereuses du process qui représentent un risque élevé pour l'environnement aquatique en cas de fuite devraient être refroidies en utilisant des systèmes de refroidissement indirects pour prévenir d'une situation incontrôlable.

La sélection d'une configuration de refroidissement devrait être basée sur une comparaison entre les alternatives réalisables conformes aux exigences du process. Celles-ci comprennent, par exemple, le contrôle des réactions chimiques, la fiabilité de la performance du process et le maintien de niveaux de sécurité requis. L'objectif est de réduire l'impact indirect de l'alternative sélectionnée. Pour chaque alternative, les performances environnementales pourront mieux être comparées si elles sont exprimées en utilisation directe et indirecte d'énergie (kW_e) par unité d'énergie évacuée (kW_{th}). Une autre façon de comparer les configurations est d'exprimer le changement d'utilisation directe d'énergie (kW_e) du système de refroidissement et le changement dans le niveau de production du process en tonnes, chacune par unité d'énergie évacuée (kW_{th}).

La modification de la technologie de refroidissement pour réduire l'impact sur l'environnement ne peut être considérée comme MTD que si l'efficacité de refroidissement est maintenue au même niveau, ou encore mieux, à un niveau plus élevé.

Tableau 4.1 : Exemples d'exigences de process et de MTD

Caractéristiques du process	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Niveau de chaleur évacuée élevé (> 60°C)	Réduire la consommation d'eau et de substances chimiques, et améliorer l'efficacité énergétique globale	(Pré-) refroidissement avec de l'air sec	L'efficacité énergétique et la taille du système de refroidissement sont des facteurs limitants	Section 1.1/1.3
Niveau moyen de chaleur évacuée (25-60°C)	Améliorer l'efficacité énergétique globale	Pas évident	Propre au site	Section 1.1/1.3
Niveau de chaleur évacuée faible (< 25°C)	Améliorer l'efficacité énergétique globale	Refroidissement de l'eau	Sélection du site	Section 1.1/1.3
Niveau et puissance thermique faible et moyenne	Efficacité énergétique globale optimale avec économies d'eau et réduction du panache visible	Système de refroidissement hybride et humide	Le refroidissement sec convient moins en raison de l'espace nécessaire et de la perte d'efficacité énergétique globale	Section 1.4
Substances dangereuses à refroidir impliquant un risque élevé pour l'environnement	Réduction du risque de perte	Système de refroidissement indirect	Accepter une hausse de l'approche	Section 1.4 et Annexe VI

4.2.1.4 Système de refroidissement et exigences du site

Les limites imposées par le site s'appliquent notamment aux nouvelles installations, où un système de refroidissement doit toujours être sélectionné. Si la puissance thermique requise est connue, elle peut influencer la sélection d'un site approprié. Pour les processus sensibles à la température, la MTD consiste à sélectionner le site avec la disponibilité requise en eau de refroidissement.

Pour de nombreuses raisons, les nouvelles installations ne sont pas toujours construites sur un site préféré pour son adaptation à la technologie de refroidissement. Par ailleurs, pour les nouvelles installations comme pour les existantes, les caractéristiques du site ne sont claires qu'une fois le site connu. La caractéristique thermodynamique la plus importante d'un site est son facteur climatique, décrit par les températures de bulbe sec et de bulbe humide.

Tableau 4.2 : Exemples de caractéristiques de site et MTD

Caractéristiques du site	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Climat	Température de conception requise	Évaluer la variation dans les températures de bulbe sec et de bulbe humide	Avec les températures de bulbe sec et de bulbe humide, le refroidissement par air sec a généralement une efficacité énergétique plus faible	Section 1.4.3
Espace	Surface réduite sur site	(Pré-assemblé) Constructions de type toiture	Limite la taille et le poids du système de refroidissement	Section 1.4.2
Disponibilité en eau de surface	Disponibilité restreinte	Systèmes à recirculation	Faisable par voie humide, sèche ou hybride	Section 2.3 et 3.3
Sensibilité des eaux de réception aux décharges thermiques	Adapter la puissance pour accommoder les décharges thermiques	<ul style="list-style-type: none"> - Optimiser le niveau de chaleur réutilisée - Utiliser les systèmes à recirculation - Sélection du site (nouveaux systèmes) 		Section 1.1 :
Disponibilité restreinte en eaux souterraines	Réduction de l'utilisation des eaux souterraines	Refroidissement par air si aucune autre source d'eau alternative n'est disponible	Accepter la pénalité énergétique	Section 3.3
Zone côtière	Puissance importante > 10 MW _{th}	Systèmes à passage unique	Éviter le mélange du panache thermique local avec la prise d'eau, par exemple par extraction profonde de l'eau au dessous de la zone de mélange par le biais de la stratification de la température	Section 1.2.1 / Section 3.2 /Annexe XI.3
Exigences propres au site	En cas d'obligation de réduction du panache et de la hauteur de tour	Appliquer un système de refroidissement hybride	Accepter la pénalité énergétique	Ch.2

Les autres caractéristiques identifiées sont l'espace, la disponibilité en eau pour le refroidissement et pour la décharge, et les zones sensibles environnantes (urbaines et industrielles). En ce qui concerne les eaux souterraines, l'utilisation d'un système de refroidissement sec obéissant au principe de réduction de l'utilisation des eaux souterraines, notamment dans les zones où l'appauvrissement des aquifères ne peut pas être exclu, peut être une MTD.

Le Tableau 4.2 donne des exemples de MTD qui ont été identifiées pour quelques caractéristiques de sites.

4.2.2 Application des MTD dans les systèmes de refroidissement industriels

Le Chapitre 1 présente une approche préventive montrant comment une évaluation étape par étape de toutes les contraintes peut amener à ce qui pourrait être appelé la « meilleure technique de refroidissement disponible ». Dans le cadre de cette approche, le Chapitre 1, le Chapitre 3 et les Annexes associées abordent les facteurs et proposent des techniques impliquées dans l'identification de la MTD potentielle pour les principales configurations de refroidissement utilisant de l'eau et/ou de l'air. L'optimisation d'un système de refroidissement pour réduire son impact sur l'environnement est un exercice complexe et non une science exacte. En d'autres termes, la combinaison de techniques sélectionnées dans les MTD référencées ne conduit pas forcément à un système de refroidissement « MTD ». La **solution finale MTD** sera une **solution propre au site**. Toutefois, sur la base des expériences rencontrées dans l'industrie, il est admis que l'on peut tirer des conclusions qualitatives sur la MTD.

Le Chapitre 3 présente des options de réduction des émissions dans l'environnement basées sur les informations soumises par le TWG. Pour chaque problème environnemental et pour chaque type de configuration de refroidissement, il fut tenté d'identifier une approche générale et de définir la MTD. Certaines techniques sont décrites plus en détail dans les Annexes. L'accent est clairement mis sur les problèmes liés à l'eau avec un focus particulier sur la réduction de l'utilisation des biocides et des substances interdites.

Les techniques proposées sont des techniques utilisées. Elles se sont avérées être efficaces, même si on peut difficilement quantifier les résultats obtenus, ce qui pourrait créer des attentes non réalistes. On considère que toutes les mesures proposées comme étant une MTD, et qui ne dépendent pas entièrement de la situation locale, peuvent être envisagées pour les nouveaux systèmes. En ce qui concerne les installations existantes, il faut être particulièrement prudent car l'évaluation est d'autant plus difficile que les options sont limitées et qu'elles dépendent de plusieurs facteurs (liés au process). Il ne semble pas y avoir beaucoup d'obstacles à la mise en œuvre de mesures opérationnelles dans les systèmes de refroidissement existantes, sauf si la conception technologique limite le nombre d'options à modifier.

Dans les Tableaux 4.3 à 4.12, les techniques considérées comme MTD sont présentées. L'approche MTD primaire visera à :

- augmenter l'efficacité énergétique globale,
- réduire l'utilisation d'eau et d'additifs à l'eau de refroidissement,
- réduire les émissions dans l'air et dans l'eau,
- réduction des nuisances sonore,
- réduction de l'entraînement des organismes aquatiques et
- réduction des risques biologiques.

Aucune MTD n'a clairement été identifiée pour réduire les déchets ou les gérer en évitant les problèmes environnementaux tels que la contamination des sols, de l'eau ou de l'air en cas d'incinération.

Pour chaque problème environnemental, les conséquences, pour d'autres milieux, de l'application d'une technique de réduction ont été identifiées. En général, chaque modification apportée à un système de refroidissement doit être équilibrée avec soin du fait des effets associés. Dans cette optique, l'optimisation du refroidissement industriel est un problème d'effets croisés.

Pour certaines mesures, les valeurs de la MTD ont été identifiées. Toutefois, l'utilisation de différentes techniques de refroidissement dans une multitude de conditions de process ne permet pas des niveaux associés clairs. Dans ces cas, une description qualitative est donnée.

Pour les **nouvelles installations de refroidissement**, la MTD consiste à identifier les mesures de réduction dès la phase de conception, en sélectionnant des équipements consommant peu d'énergie et en choisissant les matériaux adéquats pour les équipements en contact avec le fluide de process et/ou l'eau de refroidissement. Dans ce sens, la remarque suivante est exemplaire : « dans la pratique... l'attention apportée lors de la conception, la disposition et la maintenance d'un système de refroidissement à eau a une priorité relativement faible par rapport aux conséquences environnementales d'un système de refroidissement à eau mal conçu et/ou fonctionnant mal. Puisque les facteurs de conception ne sont pas sérieusement pris en compte, les traitements doivent souvent compenser une mauvaise conception et doivent donc être choisis pour minimiser les risques d'encrassement. Cette attitude est peu susceptible de changer tant qu'il y aura une prise de conscience trop faible des coûts de fonctionnement et de maintenance à long terme d'un CWS mal conçu » [tm005, Van Donk et Jenner, 1996].

Si les systèmes de refroidissement par air sec sont l'option préférée, les mesures sont principalement liées à la réduction de la consommation directe d'énergie et des émissions sonores, et à l'optimisation de la taille en respectant la surface de refroidissement requise.

Pour les **installations existantes**, les mesures technologiques peuvent être des MTD dans certaines circonstances. En général, un changement de technologie est très coûteux si l'on souhaite maintenir l'efficacité globale. L'évaluation des coûts devrait ensuite comparer les coûts d'investissement liés au changement et la modification des coûts de fonctionnement, puis valider la réduction par rapport aux autres conséquences sur l'environnement. Par exemple, elle nécessiterait de comparer l'effet sur l'environnement de la recirculation de l'eau de refroidissement, nécessitant le recours à un traitement biocide de l'eau, et d'un système à passage unique sans biocides, mais générant d'importantes émissions de chaleur dans l'environnement aquatique.

Dans le cas de tours de refroidissement pré-assemblées et prêtes à l'emploi, un changement de technologie semble réalisable tant du point de vue technique que du point de vue économique. Aucune donnée fournie pour la comparaison ne peut appuyer cette hypothèse, mais l'expérience des équipementiers prouve qu'il est relativement facile de changer les tours de refroidissement de petite taille et de passer, par exemple, d'une configuration fermée à recirculation humide à une configuration hybride. Cela ne nécessiterait pas de modifications importantes du processus ou de travaux de construction.

Pour les tours importantes adaptées et construites sur site, les changements technologiques ne sont pas faciles à réaliser. Une technologie différente signifie généralement une tour de refroidissement complètement nouvelle.

Pour les systèmes de refroidissement par voie humide existants, où l'on s'intéresse en particulier aux mesures environnementales pour réduire l'utilisation d'eau et les émissions de substances chimiques dans les eaux de surface, la MTD n'a pas vraiment de caractère technologique, mais plutôt fonctionnel. La surveillance, le fonctionnement et la maintenance sont les réponses clés aux problèmes.

4.3. Réduction de la consommation d'énergie

4.3.1 Généralités

La MTD dans la phase de conception d'un système de refroidissement consiste à :

- réduire la résistance à l'écoulement de l'eau et de l'air
- utiliser des équipements efficaces et consommant peu d'énergie
- réduire le nombre d'équipements énergivores (Annexe XI.8.1)
- utiliser un traitement de l'eau de refroidissement optimisé dans les systèmes à passage unique et les tours de refroidissement humides, afin de garder les surfaces propres et d'éviter le tartre, l'encrassement et la corrosion.

Pour chaque cas distinct, une combinaison des facteurs mentionnés précédemment devraient permettre la consommation d'énergie la plus faible possible pour le fonctionnement d'un système de refroidissement. Concernant les MTD, plusieurs techniques/approches ont été identifiées.

4.3.2 Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD

Dans une approche intégrée pour le refroidissement d'un processus industriel, les utilisations directe et indirecte d'énergie sont prises en compte. En terme d'efficacité énergétique globale d'une installation, l'utilisation de systèmes à passage unique constitue une MTD, notamment pour les processus nécessitant d'importantes puissances de refroidissement ($>10 \text{ MW}_{\text{th}}$ par exemple). En cas d'utilisation de rivières et/ou d'estuaires, les systèmes à passage unique peuvent être acceptés si par ailleurs :

- l'extension du panache thermique dans l'eau de surface laisse un passage pour la migration des poissons ;
- la prise d'eau pour l'appoint est conçue dans le but de réduire l'entraînement des poissons ;
- la charge thermique n'interfère pas avec d'autres utilisateurs des eaux de surface réceptrices.

En ce qui concerne les centrales électriques, si le système à passage unique est impossible, les tours de refroidissement humides à tirage naturel sont plus économiques en terme de consommation d'énergie que les autres configurations de refroidissement, mais leur utilisation peut être restreinte en raison de l'impact visuel (grande hauteur totale).

Tableau 4.3 : MTD visant à augmenter l'efficacité énergétique globale

Cible	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Puissance de refroidissement importante	Efficacité énergétique globale	Sélectionner un site pour une option à passage unique	Cf. texte 4.3.2	Section 3.2
Tous systèmes	Efficacité énergétique globale	Appliquer l'option de fonctionnement variable	Identifier la plage de refroidissement requise	Section 1.4
Tous systèmes	Fonctionnement variable	Modulation du débit d'air/d'eau	Éviter la cavitation et l'instabilité dans le système (corrosion et érosion)	
Tous systèmes par voie humide	Surfaces propres des circuits et échangeurs	Traitement optimisé de l'eau et traitement de surface des tubes	Requiert une surveillance adéquate	Section 3.4
Systèmes à passage unique	Maintenir l'efficacité de refroidissement	Éviter la recirculation du panache d'eau chaude dans les rivières et le réduire dans les estuaires et les sites marins		Annexe XII
Toutes les tours de refroidissement	Réduire la consommation énergétique spécifique	Utiliser des pompes et ventilateurs à faible consommation énergétique		

4.4. Réduction des besoins en eau

4.4.1 Généralités

Pour les nouveaux systèmes, les affirmations suivantes peuvent être faites :

- En terme de bilan énergétique global, le refroidissement par eau est plus efficace.
- Pour les nouvelles installations, le site devrait être sélectionné pour sa disponibilité suffisante en eaux de surface si la demande d'eau de refroidissement est importante ;
- La demande de refroidissement devrait être réduite en optimisant la réutilisation de la chaleur ;
- Pour les nouvelles installations, le site devrait être sélectionné pour sa disponibilité en eaux de réception appropriées, en particulier si les décharges d'eau de refroidissement sont importantes ;
- Lorsque la disponibilité en eau est limitée, il faudrait opter pour une technologie permettant plusieurs modes de fonctionnement, consommant moins d'eau et permettant d'obtenir la capacité de refroidissement requise à tout moment ;
- Dans tous les cas, le refroidissement à recirculation est une option, mais cela nécessite une attention particulière par rapport aux autres facteurs tels que le traitement de l'eau requis et une moindre efficacité énergétique globale.

Pour les systèmes de refroidissement humides existants, l'augmentation de la réutilisation de la chaleur et l'amélioration du fonctionnement du système peuvent réduire la quantité requise d'eau de refroidissement. Dans le cas de rivières avec une disponibilité réduite en eaux de surface, le passage d'un système à passage unique à un système de refroidissement par recirculation est une option technologique et peut être considérée comme une MTD.

Pour les centrales électriques avec d'importantes puissances de refroidissement, elle est généralement considérée comme un exercice coûteux nécessitant une nouvelle construction. Les exigences en terme d'espace doivent être prise en compte.

4.4.2 Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD

Tableau 4.4 : MTD pour la réduction des besoins en eau

Cible	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Réf.
Tous les systèmes de refroidissement par voie humide	Réduction du besoin de refroidissement	Optimisation de la réutilisation de la chaleur		Ch.1
	Réduction de l'utilisation de ressources limitées	L'utilisation des eaux souterraines n'est pas une MTD	Solution spécifique au site, en particulier pour les systèmes existants	Ch.2
	Réduction de l'utilisation de l'eau	Utilisation de systèmes à recirculation (aéroréfrigérants)	Différentes demandes de conditionnement de l'eau	Ch.2/3.3
	Réduction de l'utilisation de l'eau en cas d'obligation de réduction du panache et de hauteur de tour réduite	Utilisation d'un système de refroidissement hybride	Accepter la pénalité en énergie	Ch.2.6/ 3.3.1.2
	Lorsque l'eau (eau d'appoint) n'est pas disponible au cours (en partie) de la période de fonctionnement du process ou dans des zones très limitées (sécheresse)	Utilisation du refroidissement par voie sèche	Accepter la pénalité en énergie	Section 3.2 et 3.3 Annexe XII.6
Tous les systèmes de refroidissement humides et hybrides à recirculation	Réduction de l'utilisation de l'eau	Optimisation des cycles de concentration	Demande accrue en conditionnement de l'eau, telle que l'utilisation d'eau d'appoint adoucie	Section 3.2 et section XI

L'utilisation du refroidissement par air sec a été suggérée à plusieurs reprises. Si l'efficacité énergétique globale est prise en compte, le refroidissement par air sec est moins intéressant que le refroidissement par voie humide. Pour autant, la technologie par voie sèche n'est pas disqualifiée. Pour des durées de vie courtes, les différences de coûts calculées entre le refroidissement par air sec et celui par voie humide sont moins significatives que pour des durées de vie plus longues. Si les coûts de l'eau et du traitement de l'eau sont pris en compte, la différence est encore moins importante. Le refroidissement par air sec peut être conseillé dans certaines circonstances et pour le pré-refroidissement à des niveaux de température plus élevés, lorsque cela nécessiterait davantage d'eau.

4.5. Réduction de l'entraînement d'organismes

4.5.1 Généralités

L'adaptation des dispositifs de prise d'eau pour la diminution de l'entraînement des poissons et des autres organismes est extrêmement complexe et propre à chaque site. La modification d'une prise d'eau existante est possible, mais reste très coûteuse. Dans les technologies utilisées ou testées pour la protection ou la répulsion des poissons, aucune technique particulière ne peut encore être désignée comme une MTD. La situation locale déterminera quelle technique entre la répulsion ou la protection des poissons sera la MTD. Certaines stratégies générales appliquées à la conception et au positionnement de la prise d'eau peuvent être considérées comme des MTD, mais elles sont surtout valides pour les nouveaux systèmes.

Concernant l'utilisation de tamis de filtration d'eau, il faudrait noter que les coûts d'élimination des déchets organiques collectés par les tamis peuvent être très importants.

4.5.2 Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD

Tableau 4.5 : MTD permettant la réduction de l'entraînement

Cible	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Réf.
Tous les systèmes à passage unique ou les systèmes de refroidissement avec captage des eaux de surface	Positionnement et conception de la prise d'eau adéquats et sélection d'une technique de protection	Analyse du biotope dans la ressource en eau de surface	S'applique également aux zones critiques telles que les zones de frayère, les zones de migration etc	Section 3.3.3 et Annexe XII.3.3
	Construction de conduites de prélèvement	Optimiser la vitesse de l'eau dans les conduites pour limiter la sédimentation ; surveiller l'occurrence saisonnière du macro-enrassement		Section 3.3.3

4.6. Réduction des émissions dans l'eau

4.6.1 Approche générale des MTD pour réduire les émissions thermiques

L'impact sur l'environnement des émissions thermiques dans l'eau de surface dépendra fortement des conditions locales. Certaines conditions spécifiques de sites ont été décrites, mais elles n'ont pas débouché sur une MTD d'ordre général.

Si, en pratique, la limitation de décharge thermique était possible, la solution consisterait à passer d'une technologie à passage unique à un système aérorefrigérant en circuit ouvert (tour de refroidissement par voie humide). Sur la base des informations disponibles et si l'on considère tous les aspects possibles, il faut être prudent et ne pas conclure qu'il pourrait s'agir de la MTD. Il faudrait préalablement viser le bon équilibre entre une moindre efficacité énergétique globale avec l'utilisation d'une tour de refroidissement humide (Chapitre 3.2) et la réduction de l'impact environnemental par la réduction de la décharge thermique. Dans une évaluation complètement intégrée au niveau d'un bassin fluvial, cela pourrait par exemple inclure la prise en compte d'une efficacité globale accrue d'autres procédés utilisant la même source d'eau, mais désormais plus froide, qui serait disponible en l'absence de rejet d'eau chaude important.

Lorsque les mesures visent généralement à réduire le ΔT de l'eau de refroidissement évacuée, on peut tirer quelques conclusions sur les MTD. Le pré-refroidissement (Annexe XII) a été utilisé pour les grosses centrales électriques où la situation particulière l'impose (pour éviter une hausse de température de la source d'eau par exemple).

Les déversements devront être limités en application des contraintes de la Directive 78/659/CE concernant les sources d'eau douce. Les critères sont récapitulés dans le Tableau 3.6. On se réfère à une disposition de l'Article 11 de cette directive concernant la dérogation des conditions requises dans certaines circonstances.

4.6.2 Approche générale des MTD visant à réduire les émissions chimiques dans l'eau

La prévention et le contrôle des émissions chimiques provenant des systèmes de refroidissement ont été au cœur des préoccupations des politiques et des industriels des états membres. Après la décharge thermique, elles sont considérées comme le principal problème posé par le refroidissement.

Si l'on considère que 80 % de l'impact sur l'environnement se décide lors de la conception, des mesures devraient être prises au cours de cette phase de conception du système de refroidissement humide en utilisant la chronologie suivante :

- identifier les conditions du process (pression, température, corrosivité de la substance),

- identifier les caractéristiques chimiques de la source d'eau de refroidissement,
- sélectionner le matériel adéquat pour l'échangeur de chaleur en combinant les conditions de process et les caractéristiques de l'eau de refroidissement,
- sélectionner le matériel approprié pour les autres éléments du système de refroidissement,
- identifier les exigences opérationnelles du système de refroidissement,
- sélectionner un traitement de l'eau de refroidissement (composition chimique) réalisable et qui utilise des substances chimiques moins dangereuses ou ayant un faible impact sur l'environnement (Section 3.4.5, Annexe VI et VIII)
- appliquer un schéma de sélection du biocide (Chapitre 3, Figure 3.2)
- optimiser le régime de dosage en surveillant l'eau de refroidissement et les conditions système.

Cette approche vise à réduire le besoin en traitement de l'eau de refroidissement en premier lieu. Pour les systèmes existants, les changements technologiques ou les changements de matériel sont délicats et généralement très coûteux. L'attention devrait être portée sur le fonctionnement du système, en utilisant une surveillance liée à un dosage optimisé. Quelques exemples de techniques permettant d'obtenir de bonnes performances ont été identifiés. Elles sont généralement applicables à certaines catégories de systèmes, sont considérées comme économiques et ne nécessitent pas de modifications lourdes de l'installation de refroidissement.

Après avoir réduit la sensibilité du système de refroidissement à l'encrassement et à la corrosion, le traitement peut toujours rester nécessaire pour maintenir un échange thermique efficace. L'étape suivante consiste à sélectionner des additifs à l'eau de refroidissement qui soient moins agressifs pour l'environnement aquatique et à les utiliser de la façon la plus efficace possible.

En ce qui concerne la sélection des substances chimiques, on peut conclure qu'il est difficile, voire impossible, de procéder à un classement général des traitements et des substances chimiques qui les composent, et qu'il est peu vraisemblable que ce classement aboutisse à des conclusions sur les MTD. En raison des variations importantes des conditions et des traitements, seule une évaluation site par site permettra de trouver la solution adéquate.

Une telle évaluation et les éléments qui la composent pourraient constituer une approche de type MTD.

Cette approche est présentée dans ce BREF, et consiste en l'utilisation d'un outil qui peut aider à faire un premier classement de substances chimiques sélectionnées et qui permet d'évaluer les biocides, en liant les exigences du système de refroidissement aux exigences de l'écosystème aquatique de réception (Annexe VIII). Cette approche vise à réduire l'impact des additifs à l'eau de refroidissement et notamment celui des biocides. La Directive Biocides 98/8/CE (DB) et la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) constituent les deux références de cette approche. Il est essentiel d'utiliser les valeurs PEC et PNEC pour les différentes substances, sachant que le ratio PEC/PNEC peut servir de référence pour la définition de la MTD.

Concernant l'utilisation de substances spécifiques, plusieurs expériences ont été conduites dans des systèmes à passage unique avec des composants dérivés du chlore (hypochlorites et chloramines notamment) et des combinaisons de chlore/brome, ainsi qu'avec des niveaux de concentration réduits.

Il en va de même pour l'utilisation des biocides pour le reconditionnement des systèmes à recirculation forcée. Les traitements pour ces systèmes sont souvent multi-substances. Il est clair que certains composants ou substances peuvent être identifiés comme n'étant pas des MTD ou ne devraient pas être utilisés du tout. Une approche générale pour sélectionner le biocide adéquat inclura les aspects locaux tels que les objectifs de qualité de l'eau de surface de réception.

4.6.3 Techniques de réduction identifiées dans le cadre d'une approche MTD

4.6.3.1 Prévention par la conception et la maintenance

Tableau 4.6 : MTD visant à réduire les émissions dans l'eau par la conception et la maintenance

Cible	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Tous les systèmes par voie humide	Utilisation de matériaux moins sensibles à la corrosion	Analyse de la corrosivité des substances du process ainsi que de l'eau de refroidissement pour sélectionner le bon matériau		Ch.3.4
	Diminution de l'encrassement et de la corrosion	Conception du système de refroidissement pour éviter les zones stagnantes		Annexe XI.3.3.2.1
Echangeur de chaleur à tubes et calandre	Conception visant à faciliter le nettoyage	Fluide de refroidissement à l'intérieur des tubes, et fluide encrassant à l'extérieur	En fonction de la conception, de la température de process et de la pression	Annexe III.1
Condenseurs des centrales électriques	Réduire la sensibilité à la corrosion	Application de Ti dans les condenseurs utilisant de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre		Annexe XII
	Réduire la sensibilité à la corrosion	Utilisation d'alliages faiblement corrosifs (Acier inoxydable avec un indice de piqûre élevé ou Cuivre/Nickel)	Le choix d'alliages à faible corrosivité peut affecter la formation de pathogènes	Annexe XII.5.1
	Nettoyage mécanique	Utilisation de systèmes de nettoyage automatisés avec des balles de mousse ou des brosses	En plus du nettoyage mécanique, le nettoyage par eau à haute pression peut être nécessaire	Annexe XII.5.1

Tableau 4.6 (suite) : MTD visant à réduire les émissions dans l'eau par la conception et la maintenance

Cible	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Condenseurs et échangeurs de chaleur	Diminuer les dépôts (encrassement) dans les condenseurs	Vitesse de l'eau > 1,8 m/s pour les nouveaux équipements et 1,5 m/s en cas de retrofit des faisceaux de tubes	En fonction de la sensibilité à la corrosion des matériaux, de la qualité de l'eau et du traitement de surface	Annexe XII.5.1
	Diminuer les dépôts (encrassement) dans les échangeurs thermiques	Vitesse de l'eau > 0,8 m/s	En fonction de la sensibilité à la corrosion, de la qualité de l'eau et du traitement de surface	Annexe XII 3.2
	Éviter les colmatages	Utiliser des filtres pour protéger les échangeurs de chaleur où il y a des risques de colmatage		Annexe XII
Système de refroidissement à passage unique	Réduire la sensibilité à la corrosion	Utiliser de l'acier au carbone dans les systèmes de refroidissement humides où la corrosion peut être problématique	Pas pour les eaux saumâtres	Annexe I V.1
	Réduire la sensibilité à la corrosion	Utiliser du plastique renforcé en fibres de verre, des enrobages en béton armé ou en acier au carbone en cas de conduites enterrées		Annexe IV.2
	Réduire la sensibilité à la corrosion	Utiliser du Ti pour les tubes des échangeurs de chaleur à tubes et calandre dans les environnements extrêmement corrosifs, ou de l'acier inoxydable de qualité supérieure ayant une performance similaire	Ti pas en environnement réducteur, le contrôle optimisé du bio-encrassement peut s'avérer nécessaire	Annexe IV.2
Tours de refroidissement humides ouvertes	Diminuer l'encrassement en cas d'utilisation d'eau salée	Utiliser un garnissage qui générera un faible encrassement avec une portance élevée		Annexe IV.4
	Éviter les substances dangereuses dues au traitement anti-encrassement	Le traitement au CCA des parties en bois ou l'utilisation de peintures contenant du TBTO <u>ne sont pas des MTD</u>		Section 3.4 Annexe IV.4
Tours de refroidissement humides à tirage naturel	Réduire le traitement anti-encrassement	Utiliser un garnissage tenant compte de la qualité de l'eau locale (ex. teneur importante en matière sèche, tartre)		Annexe XII.8.3

4.6.3.2 Contrôle par un traitement optimisé des eaux de refroidissement

Tableau 4.7 : MTD pour la réduction des émissions dans l'eau par traitement optimisé de l'eau de refroidissement

Cible	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Tous les systèmes humides	Réduire l'utilisation d'additifs	Surveillance et contrôle de la composition chimique de l'eau de refroidissement		Section 3.4 et Annexe XI.7.3
	Utilisation réduite de substances chimiques dangereuses	N'est pas considérée comme MTD l'utilisation de : <ul style="list-style-type: none"> composés du chrome composés du mercure composés organométalliques (ex. Composés organostanniques) mercaptobenzothiazole traitement choc avec des substances biocides autres que le chlore, le brome, l'ozone et le H₂O₂ 		Section 3.4/ Annexe VI
Système de refroidissement à passage unique et tours aéroréfrigérantes	Dosage des biocides cibles	Surveiller le macro-encrassement pour optimiser le dosage des biocides		Annexe XI.3.3.1.1
Système de refroidissement à passage unique	Limiter l'utilisation des biocides	Avec une température d'eau de mer située entre 10 et 12°C, pas d'utilisation de biocides	Dans certaines zones, un traitement hivernal peut être nécessaire (ports)	Annexe V
	Réduction des émissions d'Oxydants Libres (OL)	Utilisation de la variation des temps de séjour et de la vitesse de l'eau avec un niveau OL ou OLR associé de 0,1 mg/l au niveau de la sortie	Non applicable aux condenseurs	Ch.3.4 Annexe XI.3.3.2
	Émissions d'Oxydants Libres (Résiduels, OLR)	OL ou OLR ≤ 0,2 mg/l au niveau de la sortie pour la chloration continue de l'eau de mer	Valeur moyenne quotidienne (24 h)	Annexe XI.3.3.2
	Émissions d'Oxydants Libres (Résiduels, OLR)	OL ou OLR ≤ 0,2 mg/l au niveau de la sortie pour la chloration intermittente et la chloration choc de l'eau de mer	Valeur moyenne quotidienne (24 h)	Annexe XI.3.3.2

Tableau 4.7 suite : MTD visant à réduire les émissions dans l'eau par un traitement optimisé de l'eau de refroidissement

Pertinence	Critère	Approche primaire de la MTD	Remarques	Référence
Système de refroidissement à passage unique	Émissions d'Oxydants Libres (Résiduels, OLR)	OL ou OLR $\leq 0,5$ mg/l au niveau de la sortie pour la chloration intermittente et une chloration choc de l'eau de mer	Valeur moyenne horaire d'une journée utilisée pour les exigences de contrôle du process	Annexe XI.3.3.2
	Réduire la quantité de composés formant des OX dans l'eau douce	La chloration continue dans l'eau douce <u>ne constitue pas une MTD</u>		Ch.3.4 Annexe XII
Tours de refroidissement humides ouvertes	Réduire la quantité d'hypochlorite	Fonctionner avec un pH de l'eau de refroidissement compris entre 7 et 9		Annexe XI
	Réduire la quantité de biocide et réduire la purge de déconcentration	L'utilisation d'une biofiltration en configuration externe est la MTD		Annexe XI.3.1.1
	Réduire les émissions de biocides à hydrolyse rapide	Arrêter la purge de déconcentration temporairement après dosage		Section 3.4
	Utilisation d'ozone	Niveaux de traitement $\leq 0,1$ mg O ₃ /l	Évaluation du coût total par rapport à l'utilisation d'autres biocides	Annexe XI.3.4.1

4.7. Réduction des émissions dans l'air

4.7.1 Approche générale

En comparaison, les émissions dans l'air des tours de refroidissement ont peu été prises en considération, excepté pour les effets de la formation de panache. D'après certaines données rapportées, il fut conclu que les niveaux sont généralement faibles, mais que ces émissions ne devraient pas être négligées.

L'abaissement des niveaux de concentration dans l'eau de refroidissement circulante affectera manifestement l'émission potentielle des substances dans le panache. Certaines recommandations générales ayant un caractère MTD peuvent être faites.

4.7.2 Techniques de réduction identifiées dans le cadre d'une approche MTD

Tableau 4.8 : MTD visant à réduire les émissions dans l'air

Cible	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Toutes les tours de refroidissement par voie humide	Éviter que le panache n'atteigne le niveau du sol	Émission de panache à une hauteur suffisante et avec une vitesse d'air minimale au niveau de la sortie de la tour		Chapitre 3.5.3
	Éviter la formation de panache	Utilisation d'une technique hybride ou d'autres techniques de suppression de panaches telles que le réchauffement de l'air	Evaluation locale nécessaire (zones urbaines, trafic)	Chapitre 3.5.3
Toutes les tours de refroidissement par voie humide	Utilisation réduite de matières dangereuses	L'utilisation d'amiante, ou de bois traité au CCA (ou similaire) ou avec du TBTO <u>n'est pas une MTD</u>		Chapitre 3.8.3
	Éviter d'affecter la qualité de l'air intérieur des locaux	Conception et positionnement de la sortie de la tour afin d'éviter les risques de prise d'air par les systèmes de conditionnement d'air	Devrait être moins importante pour les tours de refroidissement à tirage naturel de grande taille et particulièrement hautes	Section 3.5
Toutes les tours de refroidissement par voie humide	Réduction des pertes par entraînement vésiculaire	Utilisation de pare gouttelettes avec une perte < 0,01 % du flux total de recirculation	Faible résistance au débit d'air à gérer	Section 3.5 et XI.5.1

4.8. Réduction des émissions sonores

4.8.1 Généralités

Les émissions sonores ont un impact local. Les émissions sonores des installations de refroidissement font partie intégrante des émissions sonores globales du site. Plusieurs mesures primaires et secondaires permettant de réduire les émissions sonores en cas de besoin ont été identifiées. Les mesures primaires modifient le niveau de puissance sonore de la source tandis que les mesures secondaires réduisent le niveau sonore émis. Les mesures secondaires entraîneront notamment une perte de charge qui devra être compensée par une consommation énergétique supplémentaire qui réduira l'efficacité énergétique globale du système de refroidissement. Le choix optimal d'une technique de réduction du bruit sera une considération individuelle, comme le niveau de performance associé. Les mesures suivantes et les niveaux minimaux de réduction sont considérés comme les MTD.

4.8.2 Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD

Tableau 4.9 : MTD visant à réduire les émissions sonores

Système de refroidissement	Critère	Approche primaire de la MTD	Niveaux de réduction associés	Réf.
Tours de refroidissement à tirage naturel	Réduction du bruit de l'eau en cascade au niveau de l'entrée d'air	Différentes techniques disponibles	≥ 5 dB(A)	Section 3.6
	Réduction des émissions sonores autour de la base de la tour	Ex. utilisation de talus ou de murs anti-bruit	< 10 dB(A)	Section 3.6
Tours de refroidissement à tirage mécanique	Réduction du bruit du ventilateur	Utilisation de ventilateurs peu bruyants dotés des caractéristiques suivantes : - diamètre du ventilateur plus important ; - vitesse tangentielle réduite (≤ 40 m/s)	< 5 dB(A)	Section 3.6
	Conception optimisée du diffuseur	Hauteur suffisante ou installation d'atténuateurs sonores	Variable	Section 3.6
	Réduction du bruit	Utilisation de mesures d'atténuation aux zones d'entrée et de sortie	≥ 15 dB(A)	Section 3.6

4.9. Réduction du risque de fuite

4.9.1 Approche générale

Pour réduire le risque de fuite, il faut faire attention à la conception de l'échangeur de chaleur, la dangerosité des substances du processus et la configuration de refroidissement. Les mesures générales suivantes permettent de réduire l'occurrence des fuites :

- sélection du matériau pour l'équipement des systèmes de refroidissement par voie humide en fonction de la qualité de l'eau utilisée ;
- fonctionnement du système adapté à sa conception,
- si le traitement de l'eau de refroidissement est requis, sélection du programme de traitement adéquat,
- surveillance des fuites dans le système de purge des systèmes de refroidissement humides par analyse de la purge.

4.9.2 Techniques de réduction identifiées dans le cadre d'une approche MTD

Tableau 4.10 : MTD visant à réduire le risque de fuite

Cible ¹⁾	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Tous les échangeurs de chaleur	Éviter les petites fissures	ΔT aux bornes de l'échangeur de chaleur $\leq 50^\circ\text{C}$	Solution technique pour un ΔT plus élevé à voir au cas par cas	Annexe III
Echangeur de chaleur à tubes et calandre	Fonctionnement dans les limites de la conception	Surveiller le fonctionnement du processus		Annexe III.1
	Résistance des liaisons tube/plaque	Utiliser la technologie de soudure adaptée	La soudure n'est pas toujours possible	Annexe III.3
Équipement	Réduire la corrosion	T du métal du côté de l'eau de refroidissement $< 60^\circ\text{C}$	La temp. affecte l'inhibition de la corrosion	Annexe IV.1
Système de refroidissement à passage unique	score VCI de 5-8	Système direct : $P_{\text{Eau de refroidissement}} > P_{\text{Process}}$ et surveillance	Mesures immédiates en cas de fuite	Annexe VII
	score VCI de 5-8	Système direct : $P_{\text{Eau de refroidissement}} = P_{\text{Process}}$ et surveillance analytique automatique	Mesures immédiates en cas de fuite	Annexe VII
	score VCI ≥ 9	Système direct : $P_{\text{Eau de refroidissement}} > P_{\text{Process}}$ et surveillance analytique automatique	Mesures immédiates en cas de fuite	Annexe VII
	score VCI ≥ 9	Système direct avec échangeur de chaleur en matériaux hautement anti-corrosifs/ surveillance analytique automatique	Mesures automatiques en cas de fuite	Annexe VII
	score VCI ≥ 9	Changement de technologie - refroidissement indirect - refroidissement à recirculation - refroidissement à l'air		Annexe VII
	Refroidissement des substances dangereuses	Surveillance continue de l'eau de refroidissement		Annexe VII
	Utilisation de la maintenance préventive	Contrôles par courants de Foucault	Les autres techniques de contrôle non intrusif sont possibles	
Systèmes à recirculation	Refroidissement des substances dangereuses	Surveillance continue de la purge de déconcentration		

1) Tableau non applicable aux condenseurs

4.10. Réduction du risque biologique

4.10.1 Approche générale

Pour réduire le risque biologique lié au fonctionnement des systèmes de refroidissement, il est important de contrôler la température, de maintenir le système sur un fonctionnement régulier et d'éviter le tartre et la corrosion. Toutes les mesures sont plus ou moins liées à une bonne pratique de maintenance qui s'appliquerait à un système de refroidissement humide à recirculation en général. Les moments les plus critiques sont les périodes de démarrage lorsque le fonctionnement des systèmes n'est pas optimal et les périodes d'immobilisation pour des opérations de réparation ou de maintenance. En ce qui concerne les nouvelles tours, il faut prêter une grande attention à leur conception et à leur environnement immédiat (hôpitaux, écoles, infrastructures pour les personnes âgées).

4.10.2 Techniques de réduction identifiées dans le cadre de l'approche MTD

Tableau 4.11 : MTD visant à réduire la croissance biologique

Système de refroidissement	Critère	Approche MTD primaire	Remarques	Référence
Tous les systèmes de refroidissement humides fermés	Réduire la formation d'algues	Réduire l'énergie lumineuse qui atteint l'eau de refroidissement		Section 3.7.3
	Réduire la croissance biologique	Éviter les zones stagnantes (conception) et utiliser un traitement chimique optimisé		
	Nettoyer après apparition	Combinaison de nettoyage chimique et mécanique		Section 3.7.3
	Contrôle des pathogènes	Surveillance périodique des pathogènes		Section 3.7.3
Tours de refroidissement humides ouvertes	Réduire les risques d'infection	Les agents devraient porter un masque de protection pour le nez et la bouche (masque-P3) en entrant dans une tour de refroidissement humide	Si le système de pulvérisation est en marche ou en cas de nettoyage à haute pression	Section 3.7.3

5. CONCLUSIONS

5.1. Historique des travaux

Les travaux concernant le présent document de référence sur les MTD ont débuté en 1997 avec la réunion de lancement les 19 et 20 juin pour la définition du champ d'application et des principales questions environnementales. A l'origine, le champ d'application englobait les systèmes sous vide, mais étant donné la forte relation entre leurs caractéristiques et le process du site, il fut considéré que ce sujet était trop complexe pour pouvoir être abordé d'un point de vue général, de sorte que ces équipements n'ont pas été retenus dans les travaux.

Deux projets de document ont été transmis au groupe de travail technique pour consultation. Le premier projet a été remis en juin 1999 et le second en mars 2000. Des commentaires et de nouvelles informations ont été présentés au cours des deux périodes de consultation.

La dernière réunion du groupe de travail technique s'est tenue du 29 au 31 mai 2000. Le contenu et les conclusions concernant les MTD ont fait l'objet d'un large consensus. Les conclusions concernant les aspects transversaux des systèmes de refroidissement industriels ont été largement soutenues. La question des aspects locaux et de leurs conséquences pour les conclusions concernant les MTD a été vivement débattue. L'optimisation du conditionnement de l'eau de refroidissement en tant que paramètre déterminant du fonctionnement des systèmes de refroidissement a également donné lieu à des discussions intenses. Les commentaires et les nouvelles informations présentés pendant et après la réunion ont été incorporés dans le rapport final.

La partie principale du document explique l'approche générale permettant de définir des MTD applicables aux systèmes de refroidissement industriels. Les principales conclusions concernant les MTD sont présentées dans le chapitre 4. De nombreuses annexes illustrent les concepts généraux au moyen d'exemples concrets.

5.2. Sources d'information

Un grand nombre de documents, de rapports et d'informations fournies par des exploitants de systèmes de refroidissement, par des services administratifs et par des fournisseurs d'équipement et d'additifs chimiques ont été utilisés pour rédiger le présent document.

Les documents tm001 (NL), tm056 et tm132 (centrales électriques) et tm139 (fournisseurs d'équipements) en constituent les principales composantes. Les autres informations étaient davantage axées sur des problèmes environnementaux particuliers et sur le conditionnement de l'eau de refroidissement.

Des informations ont également été obtenues lors des visites de sites, et lors d'entretiens sur le choix des techniques employées et l'expérience acquise avec les techniques de réduction.

5.3. Recommandations en vue de travaux futurs

Le refroidissement est un élément essentiel de nombreux process industriels. L'évaluation des meilleures techniques disponibles pour les systèmes de refroidissement a montré qu'il existe un rapport direct entre la gestion de la chaleur, le choix et l'exploitation du système de refroidissement et les émissions. Il n'a cependant pas été possible, dans le cadre de ce document de référence, de donner des exemples permettant d'illustrer ce principe de manière quantifiable. Il serait certainement profitable d'approfondir les recherches en vue d'un document futur.

Le groupe de travail est unanime sur le fait que les MTD concernant les systèmes de refroidissement constituent un cadre adéquat pour définir un certain nombre de techniques particulières. Il s'agit là de questions complexes qui concernent les principes de la thermodynamique et les interactions avec les paramètres du process. Il est évident que les MTD doivent trouver le juste équilibre entre les exigences du process industriel devant être refroidi, la conception et l'exploitation du système de refroidissement et les coûts. C'est pourquoi les MTD insistent sur la prévention via des modifications techniques et l'amélioration des pratiques opératoires. Cette approche fait la distinction entre les systèmes nouveaux et existants, bien que le présent document insiste sur le fait que les mesures de réduction concernant les systèmes de refroidissement existants poursuivent le même objectif. En d'autres mots, la même approche prévaut, mais il est évident que les mesures de réduction sont limitées en ce qui concerne les systèmes existants.

L'échange d'informations a permis de définir un certain nombre de techniques pouvant être considérées dans l'ensemble comme des MTD d'ordre général. Ces techniques sont présentées au chapitre 4.

Il a toutefois été difficile de déterminer des techniques dans le cadre de l'approche MTD primaire. Il semble qu'il y ait une certaine réticence à définir des techniques de réduction spécifiques dans le cadre d'un problème transversal, qui se prête moins aisément aux applications générales.

En ce qui concerne le changement de technologie et la réduction concomitante des émissions, aucune information détaillée sur un exemple concret n'a été fournie qui puisse démontrer les possibilités d'amélioration, sachant que les mêmes modifications apportées à des configurations de refroidissement identiques peuvent entraîner des taux de réduction différents. Il faudrait disposer d'unités comparables pour pouvoir comparer les performances des systèmes, et il est suggéré que les données concernant les performances soient exprimées par unité de chaleur dissipée (MW_{th}). Chaque fois que cela a été possible, des exemples ont été donnés dans le présent document.

En ce qui concerne les incidences sur l'environnement des systèmes de refroidissement industriels couverts par le présent document, l'accent est largement mis sur la réduction des rejets dans le milieu aquatique. Peu d'informations représentatives ayant été rapportées à ce sujet, il serait bon de dresser un inventaire qui permettrait de se faire une meilleure idée de la situation et de comparer les résultats obtenus avec les (futurs) techniques de réduction.

Le groupe de travail technique estime que le choix des additifs ajoutés à l'eau de refroidissement constitue une mesure importante pour réduire les rejets potentiellement nocifs dans le milieu aquatique. Il convient d'instaurer une procédure d'évaluation générale englobant les caractéristiques locales pour effectuer un choix au niveau local. Le présent document propose deux approches pour effectuer l'évaluation locale des additifs ajoutés à l'eau de refroidissement. Le groupe estime que les deux approches sont valables, bien que le principe de comparaison (annexe VIII. 1) reste un modèle théorique qui devrait faire l'objet d'un examen plus poussé.

Les rejets atmosphériques provenant des tours de refroidissement humides peuvent contenir des produits chimiques ou des bactéries. Le groupe de travail estime cependant que l'on dispose de très peu de données à ce sujet. Il faudrait, pour évaluer l'importance de ce phénomène, prendre des mesures précises pour quantifier les émissions en fonction de certains régimes de conditionnement de l'eau et de l'efficacité des séparateurs de gouttes. Il faudrait également examiner plus en détail les données disponibles.

A la suite de l'irruption récente de cas de maladie du légionnaire, certains États membres surveillent de très près le développement de *Legionella* dans les tours de refroidissement humide, ce qui explique le chapitre assez étendu sur la question. Les informations fournies indiquent clairement que les travaux doivent être poursuivis pour établir des niveaux de concentration représentatifs de *Legionella* et améliorer le nettoyage des circuits à la suite d'une infection ainsi que le nettoyage journalier.

Un niveau maximum acceptable de CFU (cellules souches) dans un système de refroidissement qui soit associé à un risque faible ne fut pas déterminé. On ne sait pas à l'heure actuelle si un tel niveau peut être déterminé. De futurs travaux en ce sens pourraient permettre de progresser sur ce sujet.

Un certain nombre de techniques considérées comme étant des MTD ont été définies. Certaines se trouvent cependant encore en développement et peuvent donc être considérées comme des techniques émergentes. Leur mise en œuvre et leurs incidences sur l'environnement doivent encore être évaluées. Parmi ces techniques figurent par exemple les bassins d'aspersion (ou d'évaporation) et le stockage du froid et de la chaleur.

Il est recommandé que ce document soit révisé dans les trois ans afin d'examiner les points mentionnés ci-dessus.

REFERENCES

[Comment-1, ...]

Information submitted as comment on the first draft of the BREF-document by TWG-member (Member State or institute)

[Correia, 1995]

Correia F.N. et al, Water availability, uses and institutions in Europe, Summary report and vertical issues, Congres Center Instituto Superior Técnico (Lissabon (P), 1995).

[Hadderigh, 1978]

Hadderigh, R.H., 1978. Mortality of young fish in the cooling water system of Bergum power station. Verh. Internat. Verein. Limnol., vol. 20, pp. 1827-1832.

[Haddingh, 1983]

Haddingh, R.H. et al., 1983. Fish impingement at power stations situated along the rivers Rhine and Meuse in the Netherlands. Hydrobiological Bulletin 17 (2), pp. 129-141.

[KEMA, 1972]

KEMA, 1972. Invloed van maaswijdte van de draaizeven op passage en overleving van met het koelwater ingezogen jonge vis bij de Flevo-centrale. KEMA-memorandum VII 78-87, MO-biol.

[KEMA, 1982]

KEMA, 1982. Visproblemen bij de inlaat van centrales; samenvatting van een voordracht op de 22^e vergadering van de Kring van Chemici van Centrales. KEMA-memorandum 82-12 MObiol.

[KEMA, 1992]

KEMA, 1992. Bemonstering van ingezogen vis bij eenheid 13 van centrale Gelderland in maart, juli en november van 1990 en 1991. KEMA-rapport 71176-MOB 92-3652.

[Carter and Reader, in press]

Carter, K.L. and J.P. Reader, (in press), Patterns of drift and power station entrainment of 0+ fish in the River Trent, England.

[tm001, Bloemkolk, 1997]

Bloemkolk, J.W. Industrial cooling water discharge. Cooling systems and emissions. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate-General of Water Management, RIZA. Report number: 95.050 (Lelystad (NL), 1995, English translation 1997). ISBN 9036945445

[tm003, Van der Schaaf, 1995]

Schaaf R.J van der., Eindrapport alternatieve koelsystemen industrie. Final report by Fluor Daniel in order of Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate- General of Water Management, RIZA (Lelystad (NL), 1995).

[tm004, Baltus and Berbee, 1996]

Baltus C.A.M., Berbee R.P.M., Het gebruik van biociden in recirculatiekoelsystemen. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate-General of Water Management, RIZA. Report number: 95.036 (Lelystad (NL), 1996). ISBN 903694550X.

[tm005, Van Donk and Jenner, 1996]

Donk M van., Jenner H.A., Optimization of biofouling control in industrial cooling water systems with respect to the environment. Edit. KEMA, by order of RIZA (Arnhem (NL), 1996).

[tm010, Betz, 1991]

Betz handbook of industrial water conditioning, 9th edition, Trevoise, U.S.A (1991).

- [tm012, UBA, 1982]
Umweltbundesamt, Abwärmekommission (edit.) Abwärme - Auswirkungen, Verminderung, Nutzung, Bericht 82-3, Berlin (D) 1982.
- [tm014, KEMI, 1991]
Kemikalieinspektionen 6/91 (Solna, (S), 1991). Miljöfarligheten hos mikrobiocider i kylvatten (ISSN: 0284-1185).
- [tm032, Zimmerman and Hamers, 1996]
Zimmerman, P. and J.P. Hamers, Planung und Bau eines Schwadenfreien geräuscharmen Hybridkühlturmes mit einer umweltschonenden Wasserbehandlung durch Ozon für ein GuDKraftwerk in den Niederlanden, VGB Kraftwerkstechnik 76, 1996, Heft 6 (p.502-505).
- [tm034, Hobson et al., 1995]
Hobson, E., P. Lindahl and T. Massey, Leistungssteigerung mit Kühlturmeinbauten aus NPF (National Power Fill), VGB Kraftwerkstechnik 75, Heft 9 (p. 829-833)
- [tm036, Wilsey, 1997]
Wilsey, C.A., Alternative water treatment for cooling towers. ASHRAE Journal April, 1997 (p.43-46).
- [038, Millar et al., 1997]
Millar, J.D., G.K. Morris and B.G. Shelton, Legionnaires' disease: seeking effective prevention, ASHRAE Journal, 1997 (p.22-29)
- [tm039, Strittmatter et.al., 1996]
Strittmatter, R.J., Yang B., Johnson D.A., Ozone application for cooling tower water. ASHRAE Journal, 1996.
- [tm040, Schulze-Robbecke and Richter, 1994]
Schulze-Röbbecke, R. and Richter, M., Entstehung und Vermeidung von Legionelleninfektionen durch Kühltürme und Rückkühlwerke, GI Gesundheits -Ingenieur Haustechnik-Bauphysik- Umwelttechnik 115, 1994 (p.71-77).
- [tm041, Burger, 1994]
Burger, R., Select the right cooling tower fill, Hydrocarbon Processing, August 1994 (p. 141- 143).
- [tm042, Veil and Moses, 1995]
Veil, J.A., Moses, D.O., Consequences of proposed changes to clean water act thermal discharge requirements. Paper presented to EPRI, international Clean Water Conference, (Jolla, CA (USA), 1995).
- [tm044, Carhart and Policastro, 1991]
Carhart, R.A. and Policastro, A.J., A second-generation model for cooling tower plume rise and dispersion – I. Single sources. Atmospheric Environment Vol.25A, no. 8, 1991 (pp. 1559-1576).
- [tm046, Vanderheyden and Schuyler, 1994]
Vanderheyden, M.D., Schuyler, G.D., Evaluation and quantification of the impact of cooling tower emissions on indoor air quality, ASHRAE Transactions of Annual Meeting, Vol. 100, part 2 (p. 612-620)
- [tm056, Caudron, 1991]
Caudron, L., Les réfrigérants atmosphériques industriels, éditions Eyrolles, Paris (1991).
- [tm059, Mortier, 1995]

Mortier, R., Pretreatment and desalting of contaminated and brackish surface water with reverse osmosis, Proceedings of Watersymposion 1995 (p.144-158), Breda (NL).

[tm059, Paping, 1995]

Paping, L.L.M.J., Energiebesparing door schone koelers, Proceedings of Watersymposion 1995 (p.23-47), Breda (NL).

[tm061, Eurovent/Cecomaf, 1997]

Eurovent/ (WG 9, Cooling towers), Mechanical draught cooling tower acoustics, practical guide, Paris, Draft December 1997.

[tm062, Dallmier, 1997]

Dallier, A.W., J.D. Martens and W.F. McCoy, performance of stabilized halogen biocides in cooling water, report 398, Naperville, Illinois (USA, 1997).

[tm064, Meier, 1990]

Meier, D.A., Zero blowdown - A solution for water conservation, International Water Conference, October 1990, Reprint nr. 529.

[tm065, Meier and Fulks, 1990]

Meier, D.A., and K.E. Fulks, Water treatment options and considerations for water reuse, National Association of Corrosion Engineers Corrosion '90 meeting, Las Vegas (USA), Reprint nr. 520.

[tm066, Phillips and Strittmatter, 1994]

Phillips, E.C., and R.J. Strittmatter, Reuse of industrial waste stream as cooling tower makeup, 1994 Cooling Tower Institute Annual Meeting, Houston Texas (USA, 1994).

[tm067, Hoots et al, 1993]

Hoots, J.E., B.V. Jenkins and E.C. Ray, Choosing chemical dosage control for cooling water inhibitors and dispersants, Paper presented at Meeting of International District Heating and Cooling Association October 27-29, 1993, Tulsa (USA), Reprint 622, Nalco.

[tm068, Ambrogio, 1997]

Ambrogio, R., Environmental impact of biocidal antifouling alternative treatments of sea water once-through cooling systems (1997). Proceedings of symposium on chlorine dioxide and disinfection, Rome (I), 1996.

[tm070, Benschop, 1997]

Benschop, P., The evaluation of substances and preparations in the context of the pollution of surface waters act. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate- General of Water Management, RIZA. Report number: 98.005 (Lelystad (NL), 1997). ISBN 9036951569.

[tm071, Niebeek, 1997]

Niebeek, G. Procedure for the evaluation of substances and preparations in the context of the pollution of surface waters act. Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate-General of Water Management, RIZA. Report number: 98.006 (Lelystad (NL), 1997). ISBN 9036951577.

[tm072, Berbee, 1997]

Berbee R.P.M., Hoe omgaan met actief chloor in koelwater? (How to use active chlorine in cooling water?), Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate- General of Water Management, RIZA. Report number: 97.077 (Lelystad (NL), 1997). ISBN 9036951240.

[tm079, CES, 1994]

Consultants in Environmental Sciences Ltd. Biocides in cooling water systems (Beckenham(UK), 1994) by order of the U.K Department of the Environment.

[tm082, Mittendorf, 1990]

Mittendorf, E.D., Removal of asbestos paper fill from large industrial cooling towers, Paper presented at 1990 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (Houston, Texas (USA), 1990).

[tm083, Adams and Stevens]

Adams, S. and Stevens, J., Strategies for improved cooling tower economy. Paper presented at 1991 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (New Orleans, Louisiana (USA), 1991).

[tm084, Rice and Wilkes, 1992]

Rice R.G. and Wilkes J.F.. Biocidal aspects of ozone for cooling water treatment-probable impacts of bromide ion. Paper presented at 1992 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (Houston, Texas (USA), 1992).

[tm086, Van der Spek, 1993]

Spek, H. van der, Reduction of noise generation by cooling fans, Paper presented at 1993 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (New Orleans, Louisiana (USA), 1993).

[tm087, Engstrom and Tully, 1994]

Engstrom, G.G. and J.C. Tully, Monitoring biological control in cooling systems, paper presented at the 1994 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (Houston, Texas (USA), 1994).

[tm090, Grab et al, 1994]

Grab, L.A., J.A. Diemer, M.G. Freid, The effect of process leak contaminants on biocidal efficacy, Paper presented at 1994 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (Houston, Texas (USA), 1994)

[tm091, Little et.al, 1994]

Little D. A., Mitchell WA., E.S. Lawson, The control of ferrous metal corrosion in cooling water by a novel phosphonate corrosion inhibitor. Paper presented at 1994 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (Houston, Texas (USA), 1994).

[tm092, Becker and Burdick, 1994]

Becker, B.R. and L.F. Burdick, Drift eliminators and fan system performance, Paper presented at 1994 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (Houston, Texas (USA), 1994).

[tm093, Mirsky, 1995]

Mirsky, G.R., Cooling tower noise, Paper presented at the 1995 Cooling Tower Institute Annual Meeting, Fort Worth (Texas (USA), 1995).

[tm094, Alfano and Sherren, 1995]

Alfano, N.J. and D.J. Sherren, Water conservation via new cooling water technology, Paper presented at the 1995 Cooling Tower Institute Annual Meeting, Fort Worth (Texas (USA), 1995).

[tm095, Cunningham, 1995]

Cunningham, R.J., Maximizing cooling tower cycles of concentration, Paper presented at the Cooling Tower Institute Annual Meeting, Fort Worth (Texas (USA), 1995).

[tm096, McCoy et al, 1995]

McCoy, W.F., S.A. Borchardt, and M.R. Hermiller, Traced biocides: a new technology for industrial water treatment, Paper presented at the 1995 Cooling Tower Institute Annual Meeting, Fort Worth (Texas (USA), 1995).

[tm97, Immell, 1996]

Immell, W.F., Variable speed fan drives for cooling towers, Paper presented at 1996 Cooling Tower Institute Annual Meeting, (Houston, Texas (USA), 1996).

- [tm101, BDAG, 1996]
Balcke Dürr AG, Hybrid cooling towers, Ratingen (D), 1996.
- [tm102, BDAG, 1996]
Balcke Dürr AG, Natural draught wet cooling towers-nature's good deed, Ratingen (D), 1996.
- [tm103, BDAG, 1996]
Balcke Dürr AG, Mechanical draught wet cooling towers-cooling air supplied by fan power, Ratingen (D), 1996.
- [tm104, Tesche, 1997]
Tesche, W., Selection criteria for different types of cooling towers, Balcke-Dürr Ratingen (D), 1997.
- [tm109, BDAG, 1996]
Balcke Dürr AG, Air-cooled heat exchangers for the hydrocarbon process industry, Ratingen (D), 1996.
- [tm110, BDAG, 1995]
Balcke Dürr AG, Technical information on cooling towers for salt water applications (pers. comm.)
- [tm111, BDAG, 1996]
Balcke Dürr AG, Air-cooled heat exchangers, Ratingen (D), 1996.
- [tm113, Streng, 1996]
Streng, A., Combined wet/dry cooling towers of a cell-type construction, American Power Conference 58th Annual Meeting, (Chicago (USA), 1996).
- [tm117, Remberg and Fehndrich, 1993]
Remberg, H.-W. and B. Fehndrich, Wirkungsgradverbesserung bei naturzug-Nasskühltürmen durch Austausch von Asbestzement-Kühleinbauten gegen Kunststoff-Kühleinbauten, Kraftwerk und Umwelt, 1993 (p. 112-117).
- [tm123, Alt and Mäule, 1987]
Alt, W. and R. Mäule, Hybridkühltürme im wirtschaftlichen Vergleich zu Nass- und Trockenkühltürmen, VGB Kraftwerkstechnik 8, (page 763-768), 1987.
- [tm131, Dziobek, 1998]
Dziobek, Th., Ozon stopft Loch in der Kasse (Ozone fills financial gap in the pocket), Umwelttechnik (Sonderteil Wasser), April 1998.
- [tm132, Eurelectric, 1998]
BAT for Cooling Systems. Eurelectric, The European Grouping of the Electricity Supply Industry, (Brussels (B), 1997, updated 1998).
- [tm135, Nalco, 1988]
The Nalco Water Handbook, 2nd edition, USA (1988).
- [tm136, Jäggi/Günthner, 1997]
Jäggi/Günthner, Industrial coolers, Technical information, edit. 9.97, Bern (1997).
- [tm139, Eurovent, 1998]
Proposal for a BREF-document for cooling systems. Drafted by Coopers & Lybrand Umwelt (1998) by order of Eurovent, the European Committee of Air handling and Refrigeration Equipment manufacturers. Report number: 61350027.

[tm 144, Cabanes et al, 1997]

Cabanes, P.A., E. Pringuez, F. Siclet, M. Khalanski, and P. Pernin, Continuous chlorination to control pathogenic free living amoebae in a closed loop power plant, *The Environmental Professional*, Volume 19, 1997 (p.192-200)

[tm145, Werner and Pietsch, 1991]

Werner, H.-P. von, M. Pietsch, Bewertung des Infektionsrisikos durch Legionellen in Kühlkreisläufen von Kraftwerken, *VGB Kraftwerkstechnik* 71, Heft 8, p. 785-787 (1991)

[tm146, Daamen and Savelkoul, 1999]

Daamen E.J., and J.T.G. Savelkoul, Zijstroom-biofiltratie in open recirculerende koelwatersystemen, In: *proceedings Watersymposium '99*, Breda, NL (1999).

[tm147, Bloemkolk and Van der Schaaf, 1996]

Bloemkolk J.W., R.J. van der Schaaf, Design alternatives for the use of cooling water in the process industry: minimization of the environmental impact from cooling systems, *J. Cleaner Production* Vol.4, No. 1, pp. 21-27, 1996.

[tm148, RIZA, 1996]

RIZA, Visintrek door grootschalige koelwaterinname, Problematiek en aanbevelingen, FWVOnota 96.01 (January, 1996).

[tm149, Baltus et al., 1999]

Baltus, C.A.M., L.C.M., Kerkum and P.G.M. Kienhuis, Acute toxiciteit van koelwaterlozingen uit recirculatiekoelsystemen, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate-General of Water Management, RIZA. Report number: 99.025 (Lelystad (NL), 1997). ISBN 9036952492.

[tm150, Paping, 1999]

Paping, L.L., Feasibility study on application of spray ponds, Pers. comm. on study, Dow Europe (Terneuzen (NL), 1999).

[tm151, BAC, 1999]

Baltimore Aircoil, H₂O conserving HXI hybrid fluid cooler, Information Leaflet, Heist-op-den- Berg (B), 1999.

[tm152, Taft, 1999]

Taft, E.P., Fish protection technologies: a status report. Alden Research Laboratory Inc., Holden (USA), 1999.

[tm153, Paping et al, 1999]

Paping, L.L.M.J., H.A. Jenner, H.J.G. Polman, B.H. te Winkel and M.R. de Potter, Ecological conditioning and optimisation of a once-through cooling water system, *Proceedings of Watersymposium 1999*, p.327 – 355 (Breda (NL), 1999).

[tm154, Besselink et al, 1999]

Besselink, V.V., M.A.M. Beerlage, W. de Jongh and G. Koopmans, Haalbaarheidstudie naar alternatieve koeling door middel van sproeivijvers, KEMA-report nr 99532763.EP.163 99P01, Arnhem (NL) 1999.

[tm155, Berbee, 1999]

Berbee, R.P.M., Legionella in oppervlaktewater, in koelwater, in RWZI's, in.....; waar eigenlijk niet?, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate-General of Water Management, RIZA. Report number: 99.057 (Lelystad (NL), 1999), ISBN 9036952867.

[tm156, Schmittecker et al, 1999]

Schmittecker, B.M., K.-P. Henke, and W. Bergmann, Kühlwasserbehandlung mit Ozon. (Cooling water treatment with ozone), VGB KraftwerksTechniek 4/99.

[tm157, Jenner et al, 1998]

Jenner, H.A., J.W. Whitehouse, C.J.L. Taylor and M. Khalansky, Cooling water management in cooling power stations-Biology and control of fouling, Hydroecologie Appliquee, Tome 10, Volume 1-2, 1998, ISSN: 1147-9213.

[tm158, VGB, 1998]

VGB, VGB-Richtlinie, Lärminderung in Wärmekraftanlagen, VGB-R 304, April 1998.

[tm159, KEMA/EPON, 1993]

KEMA by order of N.V. EPON, Milieu-effect rapport WKC-Nijmegen (Environmental effect report Heat and Power Unit Nijmegen), Arnhem (NL), 1993, Ref.nr. KEMA 21446-KEC 92- 363.

[tm160, Bijstra, 1999]

Bijstra, D., Verantwoord omgaan met biociden in koelwater. FWVO-rapport 99.02. (NL, 1999)

[tm161, Borgerding, 1998]

Borgerding, P.H., Koelsystemen. “Koeling is meer dan warmte alleen”. (Cooling systems. “Cooling is more than just heat”). Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Directorate-General of Water Management, RIZA. Report number: 98.056 (Lelystad (NL), 1998), ISBN 9036952107.

[tm164, Travade, 1987]

Travade F., Aspiration d'organismes aux prises d'eau des centrales (RGN, 1, pp 59-62, 1987).

[tm165, Turnpenny et al, 1985]

Turnpenny, A.H.W., T.E. Langford and R.J.Aston, Power Stations and Fish. (ECB Research, pp 27-39, 1985).

[tm166, Morton et al, 1986]

Morton, S.J., C.L.R. Bartlett, L.F. Bibby, D.N. Hutchinson, J.V. Dyer, P.J. Dennis, Outbreak of legionnaires' disease from a cooling water system in a power station. British Journal of Industrial Medicine 1986; 43: 630-635.

[tm167, Fliermans, 1996]

Fliermans, C.B., Ecology of *Legionella*: From data to knowledge with a little wisdom. Microbial Ecology 1996; 32: 203 – 228.

[tm168, De Potter et al, 1996]

De Potter, M.R., H.J.G. Polman and B.H. te Winkel, Effectiveness and environmental impact of elevated hypochlorite dosing at Dow Benelux 1995, KEMA-report 64683-KES/WBR 96-3114

[tm169, De Potter et al, 1997]

De Potter, M.R., H.J.G. Polman and B.H. te Winkel, Effectiveness and environmental impact of elevated hypochlorite dosing at Dow Benelux 1996, KEMA-report 64683-KES/WBR 97-3128

[tm170, De Potter and Polman, 1999]

De Potter, M.R. and H.J.G. Polman, Effectiveness and environmental impact of elevated hypochlorite dosing at Dow Benelux 1997, KEMA-report 9756058-KPG/CET 99-4403

[tm171, Polman, 2000]

Polman H.J.G., Antifouling optimisation by pulse-alternating chlorination at Dow Benelux 1999, KEMA-report 99550566-KPS/MEC.

ANNEXE I PRINCIPES THERMODYNAMIQUES

Chaque modification apportée dans un système de refroidissement industriel peut potentiellement influencer le processus d'échange de chaleur. En appliquant les MTD aux systèmes de refroidissement industriels, les conséquences pour le procédé de refroidissement doivent également être évaluées à l'aide des principes de la thermodynamique.

I.1 Transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à tubes et calandre

Dans un échangeur de chaleur à contre-courant, la chaleur est transférée depuis une source chaude vers une source froide, et le transfert thermique peut être décrit de la façon suivante :

$$Q = \Delta T_m (\ln) * U * A$$

Q	chaleur transférée par unité de temps (W)
$\Delta T_m(\ln)$	différence de températures logarithmique moyenne, DTLM (K)
U	coefficient global de transfert de chaleur (W/m ² K)
A	surface d'échange thermique (m ²)

La DTLM d'un échangeur de chaleur à tubes à contre-courant peut être définie à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left\{\frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}\right\}}$$

T ₁	température d'entrée fluide chaud (K)
T ₂	température de sortie fluide chaud (K)
t ₁	température d'entrée fluide froid (K)
t ₂	température de sortie fluide froid (K)

Le transfert de chaleur est promu par les grandes surfaces (A). Pour des raisons pratiques, l'accroissement de la surface est limité, et dans ce cas des tubes à ailettes sont utilisés. Différentes sources de résistance (R) représentent une autre contrainte au transfert de chaleur. En général, la résistance R est exprimée comme la valeur réciproque du coefficient de transfert de chaleur 1/U, et est constituée en grande partie par l'épaisseur de la paroi entre deux fluides, de sa conductivité, ainsi que de l'état d'encrassement de la surface d'échange. Cependant, la conductivité des fluides est également essentielle, justifiant l'effet des différentes vitesses sur le transfert de chaleur.

Selon la nature du fluide qui s'écoule dans l'échangeur de chaleur, la surface d'échange thermique s'encrasse. En cours d'utilisation de l'échangeur, la résistance au transfert de chaleur augmente. À des fins de conception, on utilise un coefficient de pollution ou facteur d'encrassement, qui définit l'encrassement maximum en fonction de la nature de la substance ou de l'agent de refroidissement. Le Tableau I.1 donne quelques exemples dans lesquels un facteur d'encrassement inférieur signifie une diminution de l'état d'encrassement sur la surface d'échange thermique.

Tableau I.1 : Facteur d'encrassement des échangeurs de chaleur à tubes et calandre, valeurs à caractère indicatif

[Van der Schaaf, 1995]

Fluide	Facteur d'encrassement (W/m ² /K)
Eau de rivière	3 000 - 12 000
Eau de mer	1 000 - 3 000
Eau de refroidissement (tour de refroidissement)	3 000 - 6 000
Hydrocarbures légers	5 000
Hydrocarbures lourds	2 000

Deux phénomènes thermodynamiques décrivent le transfert de chaleur :
le transfert par conduction (et convection),
le transfert par évaporation d'un fluide.

Le transfert de chaleur dans un système de refroidissement par voie sèche par le biais de la conduction et de la convection est appelé *transfert de chaleur sensible*. Dans un système de refroidissement par voie humide, l'eau est refroidie par un contact direct avec l'air. Le transfert de chaleur sensible dans l'air dans un système de refroidissement par voie sèche peut être décrit comme suit :

$$Q = C_p * m_a * \Delta T$$

Q	chaleur transférée
C_p	capacité calorifique spécifique de l'air
ΔT	écart de températures
m_a	masse d'air

Un système de refroidissement par voie humide se caractérise par un transfert de chaleur supplémentaire par évaporation, le *transfert de chaleur latente*, qui peut être décrit avec la formule suivante :

$$Q = m_a' * \Delta H$$

Q	chaleur transférée
m_a'	masse d'air
ΔH	écart d'enthalpies

Grâce à ces équations, il est possible de comparer la masse d'air nécessaire au refroidissement par voie sèche (m_a) et au refroidissement par voie humide (m_a') :

$$\frac{m_a'}{m_a} = \frac{C_p * \Delta T}{\Delta H}$$

Ce rapport dépend de l'écart de températures ΔT , et par exemple avec une augmentation de la température de l'air passant de 10 à 20 °C, ce rapport est d'environ 1/4. Cela signifie dans cet exemple que le refroidissement par voie sèche nécessite quatre fois plus d'air que le refroidissement par voie humide. En d'autres termes, une surface d'échange de chaleur plus importante est nécessaire pour le refroidissement par voie sèche.

1.2 Approche

Il est toujours important de fournir à un système de refroidissement une énergie motrice suffisante pour réaliser le transfert de chaleur. Une différence de température minimale est nécessaire entre le flux entrant et le flux sortant, c'est-à-dire pour un échangeur à contre-courant la différence entre la température du fluide de process qui quitte l'échangeur et celle du fluide de refroidissement (eau ou air) qui pénètre dans l'échangeur. Cette différence de température est appelée *approche*. Dans les tours de refroidissement par voie humide, l'approche est définie comme la différence entre la température de bulbe humide de l'air et la température du fluide de refroidissement qui quitte la tour. Dans les tours de refroidissement par voie sèche, l'approche est définie comme la différence entre la température de bulbe sec de l'air et la température du fluide de refroidissement qui quitte la tour.

Un système de refroidissement est conçu pour remplir ses fonctions tout au long de l'année. Bien entendu, lorsque les températures de l'eau et de l'air sont basses, ces exigences sont facilement respectées. Toutefois, des températures élevées peuvent être à l'origine de problèmes à la fois pour les opérations et pour l'environnement. En réduisant le débit du fluide de process ou en augmentant le débit de fluide de refroidissement, il est finalement possible de respecter les spécifications de températures. Cependant, il existe des limites techniques à cette approche. Les systèmes sont souvent conçus de telle façon que les spécifications ne peuvent être dépassées que d'un maximum de 5 % voire moins sur une base moyenne annuelle.

Pour le refroidissement à l'eau, une approche minimale de 3 à 5 K est utilisée pour un échangeur de chaleur. Il est possible d'obtenir des valeurs inférieures, mais cela nécessite une surface d'échange thermique plus importante, et par conséquent plus onéreuse. Si le système de refroidissement se compose de plusieurs échangeurs de chaleur,

les différentes approches doivent être ajoutées. Plus il y aura d'échangeurs, plus l'approche globale sera donc élevée. Pour une tour de refroidissement, une approche de 7 K à 15 K est souvent utilisée.

Pour les condenseurs des centrales électriques, on utilise le terme « différence thermique » plutôt qu'« approche ». Il indique la différence entre la température du condensat et la température à laquelle l'eau de refroidissement sort du condenseur. Pour calculer la température à laquelle la condensation peut s'effectuer, la différence terminale et l'augmentation de température de l'eau de refroidissement doivent être ajoutées. Si l'on utilise une tour de refroidissement, l'approche de cette tour devra également être ajoutée. Pour les condenseurs, la pratique montre des différences terminales minimales dans une échelle de 3 à 8 K, dépendant également du facteur d'encrassement [tm056, Caudron, 1991].

La température finale minimale qui peut être obtenue par un système de refroidissement est déterminée par l'approche d'un système de refroidissement et la température de consigne, qui dépend des conditions climatiques du site.

I.3 Capacité d'un échangeur de chaleur

La capacité d'un échangeur de chaleur correspond à la quantité de chaleur qui peut être extraite. La surface d'échange requise dans un système de refroidissement est influencée par la capacité calorifique du fluide de refroidissement (eau et air), par le transfert de chaleur sensible et latente et par l'énergie motrice. La conception doit prendre en compte les caractéristiques des matériaux, la pollution, la perte de charge, les débits, les restrictions spatiales ainsi que le volume à refroidir (fluide ou vapeur).

La capacité totale d'un système de refroidissement est définie en ajoutant les capacités de tous les échangeurs de chaleur :

$$Q_{tot.} = \sum Q_i [J/s \text{ or } W] \text{ avec } Q_i = \text{capacité de l'échangeur } i$$

Par ses propriétés physiques, l'eau est un fluide caloporteur idéal grâce à sa capacité thermique élevée. Par conséquent, elle ne nécessite que de petites surfaces d'échange thermique. Le transfert de chaleur le plus efficace se fait par évaporation de l'eau. La chaleur latente (d'évaporation de l'eau) est environ 630 fois supérieure à la capacité calorifique de l'eau à 30 °C (Hv/C). Les capacités calorifiques spécifiques de l'air et de l'eau sont indiquées dans le Tableau I.2.

Tableau I.2 : Capacités calorifiques spécifiques de l'air et de l'eau

Air : (transfert de chaleur sensible)	$C_p = 1\,005,6 + (16,03 \cdot 10^{-3} \cdot t)$	J/kg/K
Eau : (transfert de chaleur sensible)	$C = 4\,192$ $C = 4\,182$	J/kg à 10 °C J/kg à 50 °C
Évaporation de l'eau : (transfert de chaleur latente)	$H_v = 2\,502$ $H_v = 2\,431$	kJ/kg à 0 °C kJ/kg à 30 °C

I.4 Températures de bulbe sec et de bulbe humide

La température de bulbe humide est la température la plus basse à laquelle l'air peut-être refroidi par évaporation adiabatique. La température de bulbe humide est toujours inférieure à la température de bulbe sec, et dépend de la température atmosphérique mesurée, de l'humidité et de la pression de l'air. La température de bulbe sec est la température de l'air sec et représente un facteur très important dans la conception des aéroréfrigérants dans lesquels le transfert de chaleur sensible est le mécanisme sous-jacent. Les températures de bulbe sec et de bulbe humide peuvent être identiques lorsque l'air ambiant est complètement saturé.

Pour le transfert de chaleur latente, la température de bulbe humide est la température utile, et c'est en théorie la température la plus basse à laquelle l'eau peut-être refroidie. Pour les tours de refroidissement par voie humide, dans lesquelles la chaleur est transférée de l'eau de refroidissement dans l'air principalement par évaporation, la température de bulbe humide (c'est-à-dire le degré de saturation) représente donc un facteur de conception primordial.

I.5 Relation entre le transfert de chaleur et la surface d'échange thermique

Un transfert de chaleur efficace nécessitera une surface d'échange relativement faible et, par conséquent, une conception économe et compacte. Comme la capacité calorifique de l'air est plus faible, les systèmes de refroidissement par voie sèche nécessitent des surfaces d'échange et une énergie motrice plus importantes pour la même capacité de refroidissement. Cette surface d'échange plus importante entraîne une augmentation de la surface au sol, ainsi que des coûts d'investissement potentiellement plus élevés. En contrepartie, il y a absence de coûts pour l'eau de refroidissement et son traitement, et absence des conséquences associées sur l'environnement.

La surface d'échange thermique requise dépend également du fluide à refroidir. Le Tableau I.3 montre des exemples de coefficients de transfert thermique et des surfaces associées pour différentes associations d'eau de refroidissement et de fluides de process.

Tableau I.3 : Coefficient de transfert thermique et estimation des surfaces A (m²) par MW et à une différence de température moyenne de 20 K pour différentes applications industrielles

[Bloemkolk, 1997].

Fluide chaud côté process	Coefficient de transfert thermique U (W/m ² K)	Estimation de la surface ⁽²⁾ A (m ² par MW)
Fluides		
-solvant organique	250-750	200-600
-fioul léger	350-900	55-143
-fuel lourd	60-300	166-830
-gaz	20-300	166-2500
Vapeurs condensantes ⁽¹⁾		
-vapeur d'eau	1 000-1 500	33-50
-vapeurs organiques	700- 1 000	50-71
-condenseurs sous vide (eau)	500-700	71-100
-fluides organiques (condensant en partie)	200-500	100-250
Remarques :		
Le point de départ est $\Delta T(\ln)=20$ °C. Refroidissement avec de l'eau. Le calcul repose sur le coefficient d'échange de chaleur globale U et il sert de moyen de comparaison		
Garder à l'esprit que les vapeurs en se condensant évacuent davantage de chaleur par kg que les fluides de refroidissement ; par MW de rejet de chaleur, une quantité relativement faible de vapeur est donc condensée.		
$Q=U.A.\Delta T(\ln)$		

Pour illustrer les données ci-dessus, deux systèmes de refroidissement (le premier en refroidissement par voie sèche et le second en refroidissement par évaporation) sont comparés, et les résultats sont indiqués dans le Tableau I.4.

La tour de refroidissement par voie sèche, dont le diamètre de surface de refroidissement est 20 % plus grand, a seulement une capacité de 47 % du système de refroidissement par évaporation, avec une approche de 20 K par rapport à 12,6 K.

Tableau I.4 : Effet du mode de refroidissement sur la puissance, l'approche et la surface de refroidissement [132, Eurovent, 1998]

Caractéristiques	Tour de refroidissement à tirage naturel par voie sèche	Tour de refroidissement à tirage naturel par voie humide
Puissance	895 MW _{th}	1 900 MW _{th}
Diamètre de la surface de refroidissement	145 m	120 m
Approche	20 K	12,6 K
Température (bulbe sec/bulbe humide)	14/10 °C	11/9 °C
Températures finales minimales	34 °C	21,6 °C

ANNEXE II PRINCIPLE D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE PAR OPTIMISATION DU REFROIDISSEMENT

[tm059, Paping, 1995]

II.1 Objet

La présente Annexe étudie une méthode de calcul de conservation potentielle d'énergie si le refroidissement est réalisé à des températures inférieures. Cette conservation est exprimée en terme d'énergie primaire, avec une grandeur sans dimension en $\text{kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}}$ par K de différence de température dans le procédé de refroidissement lui-même. La réduction de la consommation énergétique est atteinte en utilisant des inhibiteurs qui ont été soumis à une méthode de test standard. Ces inhibiteurs garantissent que les refroidisseurs d'eau puissent rester propres pendant les mois d'été. Il est alors possible de calculer la consommation d'énergie directe et indirecte avec ce coefficient adimensionnel pour chacun des six principaux systèmes de refroidissement installés dans une zone spécifique.

II.2 Synthèse des conclusions

- Dans la pratique, les gradients de température à travers la couche d'encrassement sont de l'ordre de grandeur de **1 à 4 K**.
- Une eau de refroidissement plus froide à proximité immédiate du réseau de tubes entraînera une conservation d'énergie de **$3\frac{1}{2} \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}}/\text{K}$** , soit l'équivalent de 300 euros par MW_{th} de refroidissement par an par degré d'écart de température¹.
- L'utilisation d'un moyen efficace de lutte contre la diminution du coefficient de transfert de chaleur due à l'encrassement des échangeurs entraîne une conservation potentielle d'énergie pour le secteur industriel européen, proportionnelle à ce coefficient de conservation de l'énergie. Pour tout refroidissement de 100 GW_{th} en Europe, le potentiel de conservation de l'énergie s'élève à **11 PJ_{th} par an² par K**. Cela équivaut à une réduction des émissions de dioxyde de carbone de 700 000 tonnes par an par K pour tout refroidissement de 100 GW_{th} en Europe.
- Les conséquences énergétiques du choix pour chacun des six principaux systèmes de refroidissement sont encore plus significatives. La différence dans la température de l'eau de refroidissement minimale réalisable pour chacun des six principaux systèmes de refroidissement peut également être exprimée en dépenses énergétiques nécessaires au refroidissement. Le même coefficient adimensionnel de $3\frac{1}{2} \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}}/\text{K}$ peut être appliqué afin de comparer les solutions alternatives.
- L'utilisation de certains inhibiteurs dans l'eau de refroidissement entraîne des économies d'énergie considérables. Ces économies peuvent dépasser la teneur énergétique primaire de ces additifs de plusieurs facteurs dix. Les conséquences sur l'environnement diminuent proportionnellement à ces économies.
- La conservation d'énergie réalisée grâce à l'utilisation des inhibiteurs est largement supérieure aux coûts relatifs des additifs.

Une illustration de ces effets, tels que mentionnés dans cette Annexe, est présentée dans la Figure II.1. Une température plus basse du réfrigérant, associée à l'utilisation d'un traitement anti-encrassement, aura des conséquences sur le transfert de chaleur à travers les parois de l'échangeur et le film d'eau.

¹ Sur la base de 14,7 \$/baril ; avec une valeur énergétique de 41,87 GJth/tonne équivalent pétrole et 7,45 barils/tonne équivalent pétrole, représentant 5,51 barils par kW_{th} par an ou 81 euros/ kW_{th} par an (ministère des Affaires économiques, Pays-Bas, tableau de conversion NOVEM pétrole/gaz).

² PJth = Petajoule thermique = 10^{15} Joules.

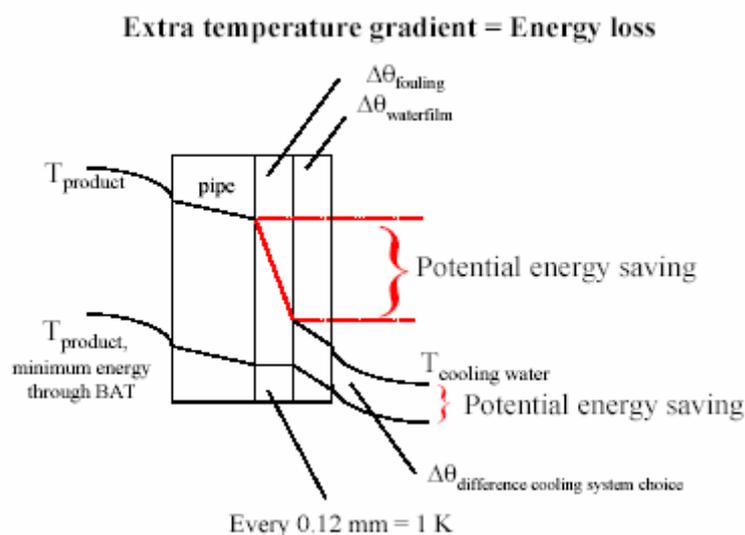


Figure II.1 : Illustration des zones d'économie potentielle d'énergie par réduction du gradient de température à travers la couche encrassante, ainsi que par l'utilisation d'une température du fluide réfrigérant plus basse

II.3 Introduction

Suite à de nombreux contacts informels, plusieurs multinationales possédant des filiales en Europe ont créé, en 1991, le groupement d'industriels utilisateurs des systèmes de refroidissements. Leur initiative a consisté à développer une méthode standardisée pour le test d'inhibiteurs d'eau de refroidissement. Le fondement de cette méthode a été défini par les recherches menées dans les années 1980 par les sociétés DSM et Shell. Le projet «Eau de refroidissement industriel » a été mis en oeuvre sous la forme d'un projet commun dans lequel les clients et les fournisseurs de ces inhibiteurs ont pris part.

La conservation potentielle d'énergie, associée à la réduction du nombre de défaillances dans le process de production grâce à l'utilisation d'échangeurs de chaleur plus propres, représentait la motivation la plus importante des partenaires pour leur investissement dans ce projet. La présente Annexe aborde cette question plus en détail.

La génération de puissance mécanique et/ou d'électricité s'accompagne toujours de refroidissement. Cela est nécessaire car seule une quantité limite d'énergie utile peut être extraite d'un fluide pour une température ambiante donnée. Une partie de cette énergie passera par plusieurs étapes du process avant de finalement atteindre le système de refroidissement de l'usine. Les moyennes annuelles³ de consommation énergétique directe consacrées au refroidissement, exprimées par le ratio KW_e / MW_{th} , et en supposant des échangeurs propres pendant les mois d'été, sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1: Consommation d'énergie en kW_e consommation d'électricité/ MW_{th} refroidissement avec des échangeurs de chaleur propres

Système de refroidissement d'eau	Consommation d'énergie en kW_e , consommation d'électricité/ MW_{th} , refroidissement avec des échangeurs de chaleur propres		
	Σ	Pompe du circuit de refroidissement	Ventilateur
Système à passage unique	≈10 ; échelle de 5 à 25	de 5 à 25	s.o.
Système avec circuit ouvert	≈15 ; échelle de 10 à 25	de 5 à 20	de 5 à 10
Système avec circuit fermé	≈30 ; échelle de 20 à 60	de 5 à 15	de 10 à 50

³ ASHREA Handbook, 1983 Equipment volume ; American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers Inc., Atlanta, USA, 1983.

Avec un rendement de production d'électricité de 40 %⁴, les chiffres ci-dessus devront être multipliés par 2,5 pour exprimer la consommation d'énergie primaire. La consommation relative d'énergie requise pour le refroidissement au moyen d'un système par eau devient alors adimensionnelle.

De plus, cette consommation d'énergie augmentera directement proportionnellement aux températures (supérieures) de l'eau de refroidissement et/ou (à l'augmentation) de l'encrassement des refroidisseurs pendant les mois d'été. Pour calculer la consommation d'énergie indirecte de façon plus fiable, les tableaux précédents de ce document doivent être liés. (Les conditions climatiques des pays européens mentionnés dans le Tableau 1.6, ainsi que les caractéristiques techniques et thermodynamiques des différents systèmes de refroidissement destinés aux applications industrielles pour un climat de site général, mentionnés dans le Tableau 2.1). Le tableau suivant montre les températures d'eau minimales qui peuvent être atteintes à l'entrée des différents systèmes de refroidissement pendant les mois de juillet et août aux Pays-Bas.

En pratique, l'eau du robinet ou l'eau souterraine n'est pratiquement pas utilisée pour le refroidissement. De plus, il est déconseillé d'utiliser ces types d'eau pour cette application, et cette pratique est progressivement abandonnée. Par conséquent, il est possible d'affirmer que les systèmes de refroidissement à passage unique situés en bordures côtières consomment le moins d'énergie primaire.

Tableau II.2 : Températures moyennes minimales d'entrée d'eau de refroidissement possibles pour différents systèmes de refroidissement pendant les mois de juillet et août aux Pays-Bas.

Système de refroidissement	Temp. moyenne minimale possible [°C]	Remarque ; Pays-Bas comme exemple
Refroidissement à passage unique : rivière	23	Limitations locales du rejet de chaleur par des valeurs thermiques limites
Eau de mer sur la côte	19	Mer du Nord de 12 °C inférieure à la zone de mélange
Eau du robinet	15	Coût
Eau souterraine	12	Stock limité
Tour ouverte humide	24	Bulbe humide 19 °C
Refroidissement par air (en comparaison)	40 (temp. produit)	Bulbe sec 28 °C

En outre, la consommation d'énergie augmente lorsque les échangeurs de chaleur sont encrassés. Ce dépôt peut être classé en micro-encrassement ou macro-encrassement. Les colmatages provoqués par les coquillages et d'autres dépôts solides, empêchant l'écoulement de l'eau dans les canalisations, peuvent être considérés comme un macro-encrassement⁵. Le film bactérien, le tartre et les dépôts qui, chacun à leur tour généreront de la corrosion sur ou dans le tube de refroidissement chaud, sont tous considérés comme du micro-encrassement⁶. Une caractéristique commune à toutes les différentes formes de mécanismes d'encrassement est l'augmentation concomitante de la consommation interne d'énergie. Cette Annexe décrit plus en détail la surconsommation d'énergie par K de gradient de température supplémentaire, et elle présente les bases de calcul des conséquences sur l'énergie directe et indirecte de la sélection de chacun des six systèmes de refroidissement.

II.4 Calculs

II.4.1 Principes

Installation de refroidissement	$\Delta\theta_{\log}$	= 10	K	(= énergie motrice)
	Φ_t	= 5	kW _{th} m ⁻²	(= flux de chaleur)
donc	U_{total}	= 0,5	kW _{th} m ⁻² K ⁻¹	(= coefficient de transfert thermique global)

⁴ Central Bureau for Statistics, CBS, La Haye.

⁵ Expérience néerlandaise avec entretien du condenseur, E.J. Sneek, H.A. Jenner, KEMA, Arnhem.

⁶ Practische waterbehandeling (Traitement pratique de l'eau), Prof. J. Defrancoq, de Sikkell Malle.

En supposant un dépôt avec un $\delta_{\text{encras sement}} = 0,12$ mm (= résistance variable) $\lambda_{\text{encras sement}} = 0,6$ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ (= conductivité thermique)⁷

Le transfert de chaleur est assimilable à une série de résistances entre le produit à refroidir, l'épaisseur du tube, la couche laminaire de l'eau et le degré d'encrassement:

$$\frac{1}{U_{\text{total}}} = \frac{1}{\alpha_{\text{product}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{pipe wall}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{water layer}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{fouling}}}$$

Pollution = Extra temperature gradient

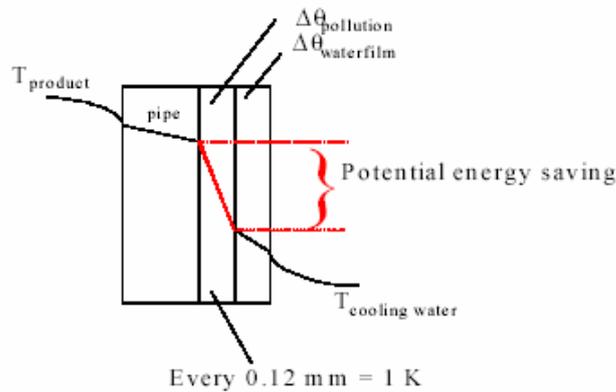


Figure II.2 : Représentation graphique des facteurs de pollution responsables de l'élévation du gradient de température à travers la paroi du tube

Coefficients de transfert thermique relatifs

$$1 = \frac{U_{\text{total}}}{\alpha_{\text{product}}} + \frac{U_{\text{total}}}{\alpha_{\text{pipe wall}}} + \frac{U_{\text{total}}}{\alpha_{\text{water layer}}} + \frac{U_{\text{total}}}{\alpha_{\text{pollution}}}$$

Gradients de température relatifs

$$1 = \frac{\Delta\theta_{\text{product}}}{\Delta\theta_{\text{log}}} + \frac{\Delta\theta_{\text{pipe wall}}}{\Delta\theta_{\text{log}}} + \frac{\Delta\theta_{\text{water layer}}}{\Delta\theta_{\text{log}}} + \frac{\Delta\theta_{\text{fouling}}}{\Delta\theta_{\text{log}}}$$

Avec :

$$\Delta\theta_{\text{fouling}} = \frac{U_{\text{total}}}{\alpha_{\text{fouling}}} * \Delta\theta_{\text{log}} = \frac{U_{\text{total}}}{\left[\frac{\lambda_{\text{fouling}}}{\delta_{\text{fouling}}} \right]} * \Delta\theta_{\text{log}} = \frac{0.5 \text{ kW m}^{-2} \text{K}^{-1}}{\left[\frac{0.6 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1}}{0.12 \text{ mm}} \right]} * 10 \text{ K} = 1 \text{ K}$$

Donc :

$$\Delta\theta_{\text{encrassement}} = 1 \text{ K}$$

On suppose que l'encrassement des échangeurs des installations industrielles n'a presque aucune influence sur la consommation d'énergie pendant les huit mois les plus froids de l'année. Cela repose sur la nécessité d'empêcher certains flux d'écoulement d'être refroidis à des températures trop basses. Les usines doivent s'assurer qu'au moins une pompe d'eau de refroidissement fonctionne en continu. Un ventilateur qui est à l'arrêt n'est pas en mesure de

⁷ VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, sechste erweiterte Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf.

réduire davantage sa puissance. Il est possible de réaliser des économies dans les centrales électriques sur une période de temps plus longue. Cependant, les installations de refroidissement industrielles sont généralement déployées dans le but de refroidir différents produits et, par conséquent, présentent une large gamme de matériaux pour les échangeurs de chaleur. De par cette diversité, les installations de refroidissement industrielles nécessitent une conception appropriée à l'utilisation d'inhibiteurs afin de s'adapter à ces systèmes complexes, qui permettent à leur tour d'utiliser les avantages maximums relatifs aux calculs de la conservation d'énergie pendant seulement un trimestre par an. Ainsi, les calculs présentés dans cette Annexe sont limités à cette courte période et sont uniquement applicables à la puissance de refroidissement des systèmes à eau utilisés dans les installations industrielles. La raison inhérente à ces restrictions est que la caractérisation des additifs n'aurait pas été déterminée si les centrales électriques avaient également été ajoutées à ces calculs

En pratique, une ou plusieurs « solutions » sont utilisées pour résoudre des situations dans lesquelles la conception du système de refroidissement associée à l'inhibiteur ne sont pas en mesure de fournir la puissance de refroidissement requise pendant les mois d'été. (Ces solutions comprennent l'augmentation de la quantité de réfrigérant (eau ou air) ou la température du fluide de process et/ou la pression côté process). De telles solutions partagent une caractéristique commune : une augmentation concomitante de la consommation énergétique interne.

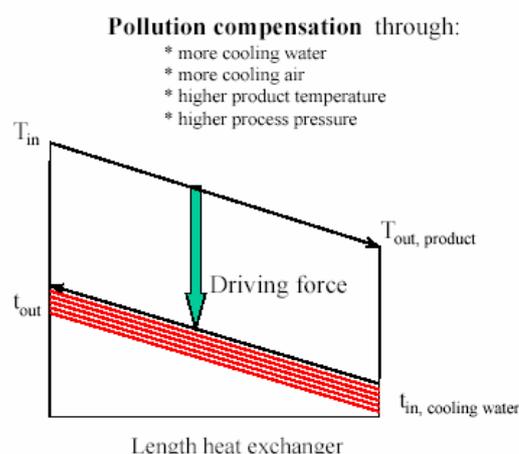


Figure II.3 : Représentation schématique de l'énergie motrice sur la longueur d'un échangeur de chaleur

Dans les calculs suivants, la surconsommation d'énergie provenant du micro-encrassement est exprimée en termes de gradient de température de 1 °C supplémentaire à travers la couche encrassante. Les formules présentées dans la page précédente indiquent qu'un gradient de température de 1 °C supplémentaire est déjà apparent lorsque le film microbien atteint une épaisseur de l'ordre de 0,12 mm. Cela est également applicable à une couche de tartre d'une épaisseur de même ordre. Les calculs prennent l'hypothèse que le transfert de chaleur diminue de façon linéaire avec l'épaisseur de l'encrassement. La réduction de la puissance de l'échangeur de chaleur provoquée par le colmatage par macro-encrassement des premiers 20 % des tubes peut être compensée par l'augmentation du gradient de température requis de 1 °C. Toutefois, chaque tube de refroidissement supplémentaire colmaté entraînera une augmentation exponentielle du gradient de température supplémentaire requis.

Tour de refroidissement évacuant	10 MW _{th} :	
Φ	=	1 000 m ³ h ⁻¹ débit de circulation
$\Delta\theta$	=	8,6 K entre entrée/sortie de l'eau de refroidissement
$\Delta\theta_{\log}$	=	5 K limite de refroidissement de la tour

II.4.2 Quantité d'eau de refroidissement ↑

L'exemple suivant montre la compensation, dans la pratique, d'un gradient de température supplémentaire de 1 K (micro-encrassement) par une augmentation du nombre de pompes d'eau de refroidissement. La température, le débit du fluide de process ainsi que la quantité de chaleur extraite de ce fluide restent constants. La perte de charge moyenne est réglée sur 3,7 bars.

La puissance sera doublée par l'opération en parallèle de deux pompes centrifuges identiques, uniquement en cas de pression purement statique. Toutefois, chaque pompe qui sera mise en marche successivement dans un

système de refroidissement entraînera une modification des caractéristiques de la charge dynamique. Suite à ces modifications, les puissances nominales des pompes peuvent ne pas être atteintes. La réduction de la puissance qui s'ensuit nécessite une augmentation de la consommation d'électricité⁸. Le transfert d'une quantité égale de chaleur nécessite la circulation de 10 % d'eau de refroidissement supplémentaire (= 20 % d'énergie de pompage supplémentaire) afin de compenser le gradient de température de 1 K supplémentaire :

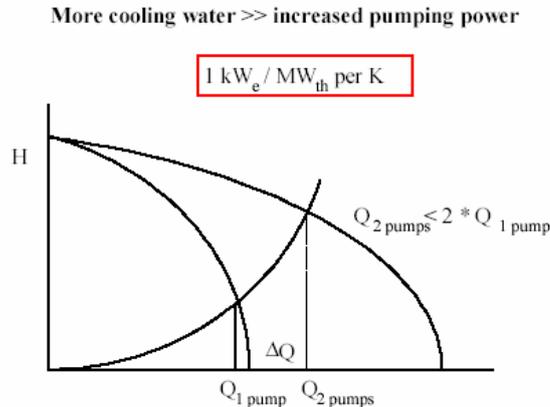


Figure II.4 : Nombre de pompes d'eau de refroidissement et modification de la quantité d'eau de refroidissement due à l'encrassement

$$\begin{aligned}
 W \text{ is } \frac{\Delta\phi * P}{\eta} &= \frac{20\% * \Phi * [\rho * g * \Delta H]}{\eta} \\
 &= \left(\frac{20\% * \frac{1000 \text{ m}^3 / \text{h}}{3600 \text{ s/h}} * \left[1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 37 \text{ m water gauge} \right]}{0.7} \right) \\
 &= \frac{20 * 10^3}{0.7} \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} * \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \\
 &= 30 * 10^3 \left[\frac{\text{Nm}}{\text{s}} \right] = 30 \text{ kW}_e \text{ per } 10 \text{ MW}_{th} \text{ cooling.}
 \end{aligned}$$

Correction pour 4 mois d'été par an :

sur une base annuelle : 1 kW_e / MW_{th} par K

II.4.3 Quantité d'air de refroidissement ↑

La même tour de refroidissement d'une puissance de 10 MW_{th} est utilisée, mais l'élimination de la même quantité de chaleur est désormais réalisée en compensant le gradient de température de 1 K supplémentaire par micro-encrassement par l'augmentation de la quantité d'air de refroidissement que les ventilateurs injectent dans l'échangeur. La consommation électrique du ventilateur augmente, passant de 54 kW_e à 83 kW_e par 10 MW_{th}⁹ :

⁸ Pompen (Pompes), L.W.P. Bianchi, Stam, Culemborg.

⁹ Calcul de POLACEL, Doetinchem (Pays-Bas), et expérience pratique avec un pas variable associé au démarrage/à l'arrêt d'un ou de plusieurs ventilateurs.

Correction pour 4 mois d'été par an :

**sur une base annuelle : $1 \text{ kW}_e / \text{MW}_{\text{th}}$ par
K**

Conclusion : Une augmentation de la quantité d'air de refroidissement ou du débit d'eau de refroidissement nécessite la même surconsommation annuelle d'énergie.

II.4.4 Température du produit ↑; volume des gaz ↑

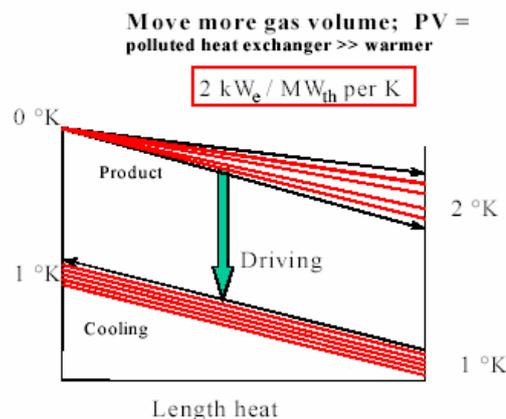


Figure II.5 : Modification du gradient de température du gaz de process (moles) dans un échangeur de chaleur à contre-courant provoquée par l'encrassement

On suppose que la température d'entrée du produit est constante. Cela signifie que la diminution de la température du produit en sortie d'un échangeur de chaleur encrassé sera inférieure à celle en sortie échangeur de chaleur propre. Le gradient de température aux bornes de la couche encrassante sera virtuellement uniformément distribué sur toute la longueur de l'échangeur de chaleur. En conséquence de ces deux effets, la réduction de la température du produit à la sortie de l'échangeur encrassé sera égale à deux fois le gradient de température du micro-encrassement de l'échangeur de chaleur coté eau. Un échangeur de chaleur à contre-courant dans lequel la capacité calorifique de l'eau de refroidissement est supérieure à celle du fluide à refroidir présentera des profils de température convergents au niveau de la sortie de l'échangeur de chaleur. La diminution réduite de la température du fluide de process au niveau de la sortie, provoquée par le micro-encrassement coté eau, sera donc inférieure à 2 °C par K de gradient de température dans l'encrassement. Inversement, une capacité calorifique de l'eau inférieure à celle du produit à refroidir entraînera des profils de température divergents au niveau de la sortie de l'échangeur de chaleur. La diminution réduite de la température au niveau de la sortie du produit, provoquée par le même micro-encrassement coté eau, sera donc supérieure à 2 °C par K de gradient de température dans l'encrassement coté eau.

Dans des conditions de compression adiabatique, pour une masse de produit et un rapport de compression constants, l'élimination de la même quantité de chaleur est désormais réalisée en compensant le gradient de température de 1 K supplémentaire du au micro-encrassement en augmentant la température finale du produit à refroidir de 2 °C . La formule pour la même tour de refroidissement d'une puissance de $10 \text{ MW}_{\text{th}}$ se présentera donc comme suit :

$$W = \int_{P_{in}}^{P_{out}} V * dP = \varphi_v * R * T_{in} * \frac{\kappa}{\kappa-1} * \left[\left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa * \eta_{pol}}} - 1 \right]$$

= le travail de compression est une fonction linéaire de la température d'entrée des gaz.

= par augmentation de la température du produit de 2 °C → , $\frac{T_{in} + 2^{\circ}\text{C}}{T_{in}}$

la consommation électrique du compresseur supplémentaire :

$$= \left(\frac{273 + 27}{273 + 25} \right) - 1 = 0.67 \quad \% \text{ de plus du travail du compresseur par } 2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Correction pour 4 mois d'été par an :

$$\text{sur une base annuelle : } 2 \text{ kW}_e / \text{MW}_{th} \text{ par K}$$

Conclusion : le déplacement du volume est plus onéreux que le transport d'une masse.

II.4.5 Pression du produit ↑ ; compresseur de refroidissement ↑

Pour la même tour de refroidissement d'une puissance de 10 MW_{th} dans laquelle, pour le même débit massique, l'élimination de la même quantité de chaleur est désormais réalisée grâce à la condensation du produit. Cela augmentera la pression côté process du produit à refroidir afin de compenser le gradient de température de 1 K supplémentaire dans le micro-encrassement :

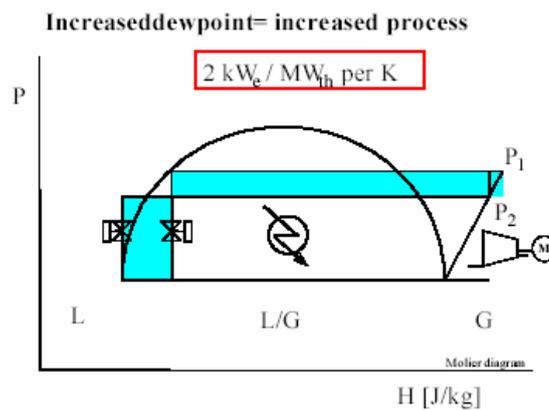


Figure II.6 : Représentation de l'augmentation de la pression côté process afin de compenser l'augmentation de la température provoquée par l'encrassement

Hypothèse
s :

Machine réfrigérante au propylène

pressions d'entrée et de sortie

points d'ébullition

gradient de température-pressure

rendement du compresseur et de la turbine

respectivement $\left[\frac{\theta_{in}}{\theta_{in} - \theta_{out}} \right]_{in} = \left[\frac{273.15 - 33.64}{28.50 - (-33.64)} \right]_{at 28.5^\circ\text{C}} = 3.852$

respectivement 0.33 bar K^{-1}

0,66

Facteur

r de Carnot du cycle de refroidissement =

$$\text{Différence du facteur de refroidissement} = \frac{\left[\frac{\theta_{in}}{\theta_{in} - \theta_{out}} \right]_{in}}{\left[\frac{\theta_{in}}{\theta_{in} - \theta_{out}} \right]_{in-1^\circ\text{C}}} = \frac{\left[\frac{273.15 - 33.64}{28.50 - (-33.64)} \right]_{at 28.5^\circ\text{C}}}{\left[\frac{273.15 - 33.64}{29.50 - (-33.64)} \right]_{at 29.5^\circ\text{C}}} = \frac{63.14}{62.14} = 1.0151$$

$$\text{Cons. élect. suppl. du compresseur} = \frac{1 - 1.0151}{3.852 * 0.66} = 0.594 \quad \% \text{ par K}$$

Correction pour 4 mois d'été par an :

**sur une base annuelle : $2 \text{ kW}_e / \text{MW}_{\text{th}}$ par
K**

Conclusion : les « frigories » sont deux fois plus onéreuses que les calories.

II.5 Potentiel total d'économie d'énergie par °C de baisse de température de la couche limite d'eau de refroidissement

II.5.1 Rendement de la production d'électricité ↑

Le rendement de la production d'électricité aux Pays-Bas s'élève à 40 %¹⁰.

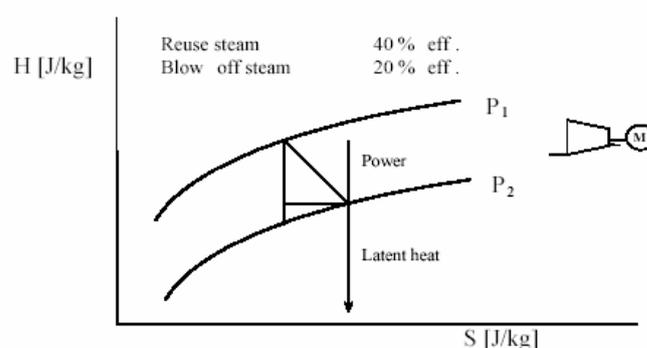


Figure II.7 : Rendement de la production d'électricité pour les pompes, ventilateurs et compresseurs

La production et la consommation de vapeur dans un complexe pétrochimique sont généralement équilibrées à l'automne et au printemps. Pendant l'hiver, la vapeur à haute et moyenne pression sera transférée au réseau de vapeur basse pression. Inversement, pendant l'été, de la vapeur à basse pression sera rejetée en l'évacuant dans l'atmosphère et/ou en la condensant dans les refroidisseurs. De plus, un certain nombre de pompes à vapeur seront éteintes et certains moteurs électriques seront démarrés afin de compenser la modification de l'équilibre énergétique.

Les turbines à vapeur sont également utilisées comme turbines auxiliaires pour faire fonctionner les machines frigorifiques. Dans de telles situations, la vapeur à basse pression supplémentaire qui est produite et rejetée pendant l'été sera éliminée. L'énergie supplémentaire consommée par la machine frigorifique s'accompagnera alors de pertes énergétiques supplémentaires, environ cinq fois plus importantes. L'enthalpie de la vapeur surchauffée à basse, moyenne et haute pression est seulement 20% de fois plus élevée que la chaleur latente de l'eau.

L'industrie néerlandaise utilise 20 % de la puissance de refroidissement totale pour la compression de gaz et les machines frigorifiques¹¹. La moitié de ce refroidissement par cycle frigorifique est réalisée par le biais de turbines à vapeur (auxiliaires), les « frigories » (ou calories « négatives ») étant plus onéreuses que les calories, et les déplacements de volume plus onéreux que le transport de masse. Dans la pratique, cela signifie que pendant les mois d'été, il sera préférentiellement anticipé le démarrage et l'arrêt des pompes à eau et des ventilateurs, plutôt que l'augmentation des pressions du process. De plus, en premier lieu, 80 % de la puissance perdue par un refroidissement inefficace à cause de l'encrassement sera compensée par les commandes de démarrage/d'arrêt des moteurs.

Par conséquent, l'augmentation moyenne de l'énergie primaire par K de gradient de température est :

¹⁰ Central Bureau for Statistics, CBS, La Haye.

¹¹ EST Consult B.V., Woubrugge, décembre 1990, NESR003. Marktonderzoek naar het elektriciteitsverbruik en de mogelijkheden van elektriciteitsbesparing in de Nederlandse industrie (Étude de marché sur la consommation d'électricité de l'industrie néerlandaise, et perspectives en matière de conservation de l'électricité).

$$\left(\frac{80\% * 1}{0.4}\right) + \left(\frac{10\% * 2}{0.4}\right) + \left(\frac{10\% * 2}{0.2}\right) = \underline{\underline{3.5 \text{ kW}_{th} / \text{MW}_{th} \text{ per K}}}$$

Remarque : Le facteur énergétique exprimé ci-dessus peut également être calculé pour d'autres pays européens si la puissance de refroidissement relative à la compression de gaz et aux installations frigorifiques est connue. Le résultat devrait se situer entre 3 et 4 kW_{th} / MW_{th} par K car le rendement de la production d'électricité en Europe se situe aussi autour de 40 %.

II.5.2 Quantité totale d'eau utilisée pour le refroidissement dans l'industrie hollandaise (à l'exception des centrales électriques)

Les chiffres concernant la consommation d'eau pour le refroidissement doivent être disponibles pour calculer la consommation d'énergie directe et indirecte, ainsi que les conséquences sur l'environnement de chacun des principaux systèmes de refroidissement à l'échelle européenne. Aux Pays-Bas, ces données statistiques étaient disponibles sur les dernières dizaines d'années. La plus grande partie de l'eau consommée par l'industrie nationale (= 3,1 * 10⁹ m³ par an) est destinée à être utilisée pour le refroidissement. La quantité totale d'eau utilisée à des fins de refroidissement s'élève à 2,7 * 10⁹ m par an (pour les centrales électriques à 8,3*10⁹ m³ par an). La plus grande partie de cette eau est de l'eau de surface douce, salée ou saumâtre. Les sources statistiques d'origine font la différence entre l'eau utilisée à des fins générales et les eaux utilisées à des fins de refroidissement. Cependant, ces données ne font aucune différence entre les proportions d'eau utilisées pour les systèmes à passage unique et ceux à recirculation. Les calculs indiquent que la quantité de chaleur extraite par les systèmes à eau dans le secteur industriel néerlandais est de l'ordre de 180 PJ_{th} par an¹² (= 5,7 GW_{th}¹³), et elle est également répartie entre les tours de refroidissement et les systèmes à passage unique.

II.5.3 Potentiel total d'économie d'énergie par °C de baisse de température de la couche limite de l'eau de refroidissement

Le chiffre 180 PJ_{th} par an extraits par les systèmes de refroidissement à eau, associé à une consommation énergétique annuelle supplémentaire moyenne de l'ordre de 3½ KW_{th} / MW_{th} par °C de baisse de température de la couche limite de l'eau, entraînerait un potentiel total d'économie d'énergie pour le secteur industriel néerlandais égal à :

0,63 PJ_{th} par an par °C

Ou, en termes financiers :

1,6 million d'euros par an par °C

En supposant que la situation néerlandaise représente seulement 5 % de la capacité de production industrielle européenne dans laquelle le refroidissement est impliqué, il est possible d'estimer que la puissance de refroidissement en Europe appliquée par l'industrie est de l'ordre de 120 GW_{th}, et les centrales électriques refroidissent 200 GW_{th}. Pour l'ensemble du secteur de refroidissement européen, le potentiel d'économie d'énergie s'élèverait donc à :

¹² CBS, Heerlen : chiffres-clés K-261/1991 ; approvisionnements en eau des entreprises en 1991, et tous les cinq ans avant 1957. CBS, Voorburg ; chiffres-clés K-117/1992-1 & -2 ; Consommation énergétique néerlandaise, chiffres annuels de 1992 et des décennies antérieures à 1972.

¹³ Vérifiée également avec les données de :

Emissie Registratie warmte via water E 260 tot en met de 6^e ronde (Enregistrement des émissions de chaleur via l'eau E260 jusqu'à et comprenant le 6^e ronde (pour les plus grandes entreprises d'un point de vue environnemental) dans les années 1990) ; RIVM, Bilthoven.

Enquête de l'auteur sur les dix plus grandes entreprises néerlandaises ; données RIZA ; Lelystad, Pays-Bas.

35 PJ_{th} par an par °C

Ou, en termes financiers :

100 millions d'euros par an par °C

II.6 Exemples de calculs pour les économies d'énergie et la réduction des conséquences sur l'environnement grâce à l'utilisation d'inhibiteurs

II.6.1 La contribution de l'oxydation

L'exemple suivant concerne l'utilisation d'inhibiteurs basés sur des oxydants comme l'hypochlorite de sodium (car c'est un adjuvant dégradable relativement bien connu) :

Hypothèses :

Base :

électrolyte (ou achat en vrac)	2,2	KWh _e / kg éq. chlore
• rendement de production	0,7	W _e / W _e
• rendement thermique	0,4	W _e / W _{th}
• concentration	15	%

Installation de refroidissement

- épaisseur de la couche visqueuse 0,5 mm (aucun inhibiteur en été)
- gradient de température de la couche limite 4 K
- « rapport de conservation » moyen 3,5 kW_{th} / MW_{th}/K

Utilisation d'un inhibiteur

- influent $\approx 1 \text{ mg l}^{-1}$, oxydation stœchiométrique,
- effluent $\leq 0,1 \text{ mg l}^{-1}$, chlore actif
- chloration intermittente, telle que 4 heures en service/hors service
- 1 % de la conversion du chlore dosé équivalent aux sous-produits halogénés également exprimés comme équivalents chlore, s'élevant à environ 3 % des hydrocarbures halogénés [tm160, Bijstra, 1999].

II.6.1.1 Système de refroidissement à passage unique

utilisation de l'hypochlorite	300	kg Cl/MW _{th}	[tm160, Bijstra, 1999] ¹⁴
coûts de l'hypochlorite	114	euros / tonne en camion-citerne	

Par conséquent, le ratio d'économie d'énergie¹⁵ et le ratio performance-prix de l'inhibiteur sont d'une importance primordiale. L'économie d'énergie générée par l'utilisation de cet oxydant est plusieurs dizaines de fois supérieure à l'énergie primaire de l'inhibiteur. Le rendement énergétique environnemental de cet inhibiteur est plus de 10 fois supérieur au taux d'économie financière¹⁶.

L'utilisation d'ozone ou de peroxyde d'hydrogène entraînera une diminution des rapports présentés ci-dessus.

Ratio d'économie d'énergie =

¹⁴ Basé sur la demande en chlore dans le delta européen du Nord-Ouest.

¹⁵ Le ratio d'économie d'énergie est un coefficient adimensionnel qui compare l'économie d'énergie réalisée grâce à l'utilisation de l'inhibiteur à la teneur en énergie primaire de l'adjuvant applicable.

¹⁶ Le taux d'économie financière est un coefficient adimensionnel qui compare l'économie financière réalisée grâce à l'utilisation de l'inhibiteur au coût de l'adjuvant applicable.

$$\left(\frac{8760 \text{ hr/yr}}{300 \text{ kg "as chlorine" per annum} / MW_{th}} \right) * \left(\frac{3.5 \text{ kW}_{th} / MW_{th} \cdot K * 4K}{\left(\frac{2.2 \text{ kWh}_e / \text{kg chlorine}}{0.7 W_e / W_e * 0.4 W_e / W_{th}} \right)} \right) = 52 \frac{J_{output}}{J_{input}}$$

Ratio d'économie financière =

$$\left(\frac{14 \text{ kW}_{th} / MW_{th}}{2 \text{ mt hypochlorite} / \text{year per } MW_{th} \text{ cooling}} \right) * \left(\frac{\text{EURO } 81 / \text{kW}_{th} \text{ per year}}{\text{EURO } 114 / \text{mt}} \right) = 5 \frac{\text{EURO}_{output}}{\text{EURO}_{input}}$$

Remarque : tm = tonne(s) métrique(s)

Le rapport énergétique environnemental adimensionnel peut être agrémenté du calcul d'un rapport massique de la charge environnementale relative supplémentaire. Cela indique également l'économie d'énergie réalisée par l'utilisation d'inhibiteurs, mais désormais exprimée en termes de rapport de la réduction des émissions de dioxyde de carbone dans la production de précurseurs indésirables, résultant de réactions du côté des oxydants.

Rapport massique environnemental =

$$52 \frac{J_{output}}{J_{input}} * \frac{\left(\frac{1.94 \text{ kg CO}_2 / Nm^3 \text{ natural gas}}{31.6 \text{ MJ}_{th} / Nm^3 \text{ natural gas}} \right)}{\left(\frac{3\% \text{ conversion to halogenated ones}}{\left(\frac{2.2 \text{ kWh}_e / \text{kg chlorine} * 3.6 \text{ MJ}_{th} / \text{kWh}_{th}}{0.7 W_e / W_e * 0.4 W_e / W_{th}} \right)} \right)} = 3000 \frac{\text{CO}_2}{C - X}$$

Toutefois, la quantité obtenue avec ces formules n'est pas complètement adimensionnelle. Le rapport massique environnemental peut être utilisé pour estimer le rapport d'effet environnemental, par exemple en introduisant le rapport d'effet des sous-produits chlorés spécifiques dans l'eau de mer, comme le bromoforme (84 %), dibromoacétonitrile (10 %) et les trihalométhanes, comme les dibromochlorométhanés et les bromodichlorométhanés (5 %) [tm157, Jenner et al, 1998].

Leur formation involontaire, qui est linéaire vis-à-vis de la quantité de chloration du système, peut être comparée à la réduction obtenue dans la quantité d'énergie utilisée, lorsque les deux sont exprimés en unités de CO₂ et son effet réducteur de l'ozone correspondant.

II.6.1.2 Système ouvert à recirculation

volume d'eau ; cuve + tubes	50	m ³ / MW _{th}
dosage (pour 3 mg/m ³)	1,0	l h ⁻¹
temps de dosage, <u>dis</u> continu	1,0	h / jour
160		euros / tonne dans des conteneurs de 1 m ³ à plusieurs compartiments

Pour les régimes de dosage continu et/ou des dosages moins adaptés par contrôle du process, environ 3 fois plus d'équivalents en chlore par MW_{th} sont requis.

Ratio d'économie d'énergie =

$$\left(\frac{1 \text{ MW}_{th} \text{ h} * 24 \text{ hours/day}}{11 \text{ hypochlorite/day}} \right) * \left(\frac{3.5 \text{ kW}_{th} / MW_{th} \cdot K * 4K}{\left(\frac{15\% * 2.2 \text{ kWh}_e / \text{kg chlorine}}{0.7 W_e / W_e * 0.4 W_e / W_{th}} \right)} \right) = 285 \frac{J_{output}}{J_{input}}$$

Ratio d'économie financière =

$$\left(\frac{14 \text{ kW}_{th} / \text{MW}_{th}}{365 \text{ l hypochlorite/year per MW}_{th} \text{ cooling}} \right) * \left(\frac{\text{EURO } 81 / \text{kW}_{th} \text{ per year}}{\text{EURO } 160 / \text{metric tonne}} \right) = 20 \frac{\text{EURO}_{\text{output}}}{\text{EURO}_{\text{input}}}$$

Les ratios énergétiques et financiers du même oxydant utilisé dans un système à recirculation sont supérieurs à ceux d'un système de refroidissement à passage unique. A contrario, la consommation d'énergie primaire nécessaire au refroidissement par l'intermédiaire d'un système à recirculation est supérieure à celle d'un système de refroidissement à passage unique. Par conséquent, la majorité des grandes centrales électriques se situe à proximité du littoral.

Le rapport massique de la charge environnementale peut également être calculé pour ce système.

Rapport massique environnemental =

$$285 \frac{J_{\text{output}}}{J_{\text{input}}} * \frac{\left(\frac{1.94 \text{ kg CO}_2 / \text{Nm}^3 \text{ natural gas}}{31.6 \text{ MJ}_{th} / \text{Nm}^3 \text{ natural gas}} \right)}{\left(\frac{3\% \text{ conversion to halogenated hydrocarbons}}{\left(\frac{2.2 \text{ kWh}_e / \text{kg chlorine} * 3.6 \text{ MJ}_{th} / \text{kWh}_{th}}{0.7 W_e / W_e * 0.4 W_e / W_{th}} \right)} \right)} = 16000 \frac{\text{CO}_2}{\text{C-X}}$$

Une fois encore, le rapport massique entre la réduction nécessaire des émissions de dioxyde de carbone et les émissions involontaires d'hydrocarbures halogénés des mêmes oxydants (mais désormais applicable à un système de refroidissement à recirculation) est supérieur à celui d'un système de refroidissement à passage unique. Inversement, la consommation d'énergie primaire par une tour de refroidissement est supérieure à celle d'un système de refroidissement à passage unique.

II.7 Exemples de calculs d'économies d'énergie relatives à une eau de refroidissement plus froide

II.7.1 Eau côtière contre tours de refroidissement

Hypothèses¹⁷ :

température de l'influent	eau côtière	19	°C
	tour de refroidissement	24	°C
pression de l'effluent	système de refroidissement à passage unique	1	mwg
	tour de refroidissement	14	mwg
	(hauteur de la tour + disperseurs)		

Apporter l'eau de refroidissement à une hauteur supplémentaire et ensuite la disperser par les rampes de pulvérisation entraînent une augmentation de la consommation électrique de la pompe par MW_{th} de chaleur extraite par le biais d'une tour de refroidissement :

¹⁷ Onderzoek industrieel waterverbruik (Étude de la consommation industrielle en eau), rapport final, F.C.A. Carner, Krachtwerktuigen Amersfoort, 1992. Samenwerkende Rijn- en Maas waterleidingbedrijven 1980 – 1992, RIWA, Amsterdam. Jaarboeken monitoring Rijkswateren (Chiffres annuels sur le contrôle des eaux nationales) depuis 1980.

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{\Delta\varphi * P}{\eta} = \frac{\varphi * [\rho * g * \Delta H]}{\eta} \\
 &= \frac{\frac{100 \text{ m}^3 / \text{h}}{3600 \text{ s} / \text{h}} * \left[1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 13 \text{ mwg} \right]}{0.7} \\
 &= \frac{3.6 * 10^3}{0.7} * \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right] = 5 * 10^3 \left[\frac{\text{Nm}}{\text{s}} \right] = 5 \text{ kW}_e \text{ per MW}_{th} \text{ cooling}
 \end{aligned}$$

La consommation électrique de la pompe exprimée en énergie primaire tout au long de l'année est :

12,5 kW_{th} par MW_{th} refroidis

L'eau de refroidissement est en moyenne 5 °C plus chaude, donc :

17,5 kW_{th} par MW_{th} refroidis

Ensemble, c'est une différence de consommation d'énergie de :

30,0 kW_{th} par MW_{th} refroidis

Par conséquent, étant donné les avantages en terme d'économie d'énergie, les grands systèmes de refroidissement sont, dans la pratique, conçus de préférence sous la forme de systèmes de refroidissement à passage unique sur le littoral.

II.7.2 Eau de rivière contre tours de refroidissement

La différence de température d'un système de refroidissement à passage unique alimenté par de l'eau de rivière par rapport à une tour de refroidissement est d'environ 1 K. En comptant en plus la maintenance de la perte de charge nécessaire dans le circuit d'eau, la différence totale de consommation d'énergie requise pour le refroidissement s'élève à **16 kW_{th} par MW_{th}**.

II.7.3 Eau souterraine contre tours de refroidissement

La différence de température d'un système de refroidissement à passage unique alimenté par de l'eau souterraine par rapport à une tour de refroidissement est la plus importante, c'est-à-dire 12 K. La différence totale de consommation d'énergie requise pour le refroidissement s'élève donc à **42 kW_{th} par MW_{th}**. On a supposé que l'électricité consommée par une pompe qui pompe de l'eau souterraine est du même ordre que la puissance nécessaire pour maintenir la différence de pression de l'effluent d'une tour de refroidissement. Cependant, la disponibilité limitée de l'eau souterraine restreint les possibilités et l'utilisation de cette technique d'économie d'énergie.

II.8 Annexe – Impacts sur l'environnement

Tableau II.3 : Ratios d'économie des systèmes de refroidissement à passage unique et à recirculation

Type de système de refroidissement	Ratio d'économie d'énergie $J_{\text{sortie}} / J_{\text{entrée}}$	Ratio d'économie financière EUR _{sortie} / EUR _{entrée}	Rapport massique sur l'environnement CO ₂ / C-X
Système de refroidissement à passage unique	52	5	3 000
Système de refroidissement ouvert à recirculation	285	20	16 000

Tableau II.4 : Economie d'énergie avec une source d'eau de refroidissement potentiellement plus froide

Comparaison des systèmes	kW th par MW th	Remarques
Eau côtière comparée aux tours de refroidissement	30	spécifié géographiquement
Eau de rivière comparée aux tours de refroidissement	16	charge thermique locale
Eau souterraine comparée aux tours de refroidissement	42	stock limité

Les chiffres présentés ci-dessus peuvent être utilisés pour décrire le résultat de certaines régions spécifiques d'Europe, par exemple une région fortement industrialisée comme les Pays-Bas. Le remplacement de toutes les tours de refroidissement industrielles par des systèmes de refroidissement à passage unique, alimentés par de l'eau de rivière, entraînerait une économie d'énergie de $91 \text{ PJ}_{\text{th}}^{18} * 16 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}} = 15 \text{ PJ}_{\text{th}}$ par an (l'équivalent d'une réduction des émissions de dioxyde de carbone de 93 000 tonnes métriques par an). Cela nécessiterait la disponibilité de $85 \text{ m}^3/\text{sec}$ d'eau de rivière tout au long de l'année. Inversement, seuls les systèmes de refroidissement situés à une distance relativement faible d'une rivière seraient concernés par un tel remplacement. Les autres distances plus grandes réduiraient les avantages en termes d'énergie qu'offre l'utilisation de cette source d'eau. Il n'est donc pas surprenant que la majorité des industries et des centrales électriques se trouvent à proximité des rivières et des zones côtières, ce qui souligne l'importance d'une conception de refroidissement et d'un choix d'emplacement corrects.

¹⁸ Symposium sur l'eau de 1995 ; programme 43, Nederlands Corrosie Centrum Bilthoven.

ANNEXE III ÉCHANGEURS DE CHALEUR A TUBES ET CALANDRE POUR LES SYSTEMES DE REFROIDISSEMENT INDUSTRIELS À PASSAGE UNIQUE ET OCCURRENCE DE FUITES

La conception de l'échangeur de chaleur est extrêmement importante car c'est l'élément principal d'un système de refroidissement, l'endroit où l'échange thermique se produit. D'un point de vue environnemental, c'est l'endroit où les fuites de substances du process dans le fluide de refroidissement peuvent se produire. Dans les systèmes de refroidissement à passage unique, l'importance de la conception, du fonctionnement et de l'entretien irréprochables de l'échangeur de chaleur est évidente. D'un point de vue préventif, une attention toute particulière doit être portée aux points développés dans la présente Annexe avant d'envisager l'utilisation d'un système indirect (secondaire). Cette Annexe fournit une synthèse de plusieurs points-clés qu'il convient de prendre en compte dans la conception de l'échangeur de chaleur à tubes et calandre couramment utilisé afin d'éviter tout problème environnemental [tm001, Bloemkolk, 1997].

L'échangeur de chaleur à tubes et calandre se compose d'une calandre, de nombreux tubes parallèles, de chicanes (plaques tubulaires) ainsi que d'une ou de deux têtes. L'échange thermique entre les différents fluides se produit en pompant un des fluides dans les tubes et l'autre autour des tubes. Ce faisant, la chaleur est transférée à travers la paroi des tubes. Les chicanes se trouvent à la diagonale des tubes. Elles garantissent un meilleur transfert de la chaleur (par une augmentation de la turbulence du flux autour des tuyaux) et elles soutiennent les tubes L'échangeur de chaleur à tubes et calandre est décrit dans la figure ci-dessous.

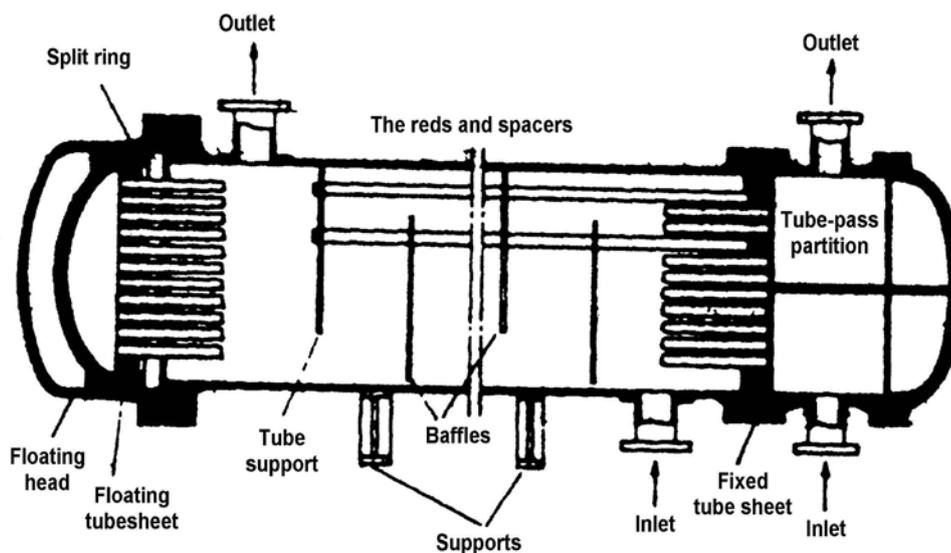


Figure III.1 : Composants majeurs de l'échangeur de chaleur à tubes et calandre
[tm001, Bloemkolk, 1997]

Il existe de nombreux types d'échangeurs de chaleur à tubes et calandre. En faisant le bon choix à partir des paramètres de conception suivants, la conception peut être adaptée aux exigences spécifiques au process et à l'entretien :

- le type de calandre et de tête
- le type de tubes (droits ou en U, avec ou sans ailettes)
- la taille des tubes (diamètre et longueur)
- la distance entre les tubes (écartement), la configuration (disposition)
- le nombre de chicanes, le type de chicane
- la distance entre les chicanes (écartement de chicane)
- le nombre de passes dans les tubes
- la configuration d'écoulement (contre-courant, co-courant)
- nettoyage avec de l'eau (sous pression) ou sans eau, mécanique ou non

L'association TEMA (association des fabricants d'échangeurs tubulaires, Tubular Exchanger Manufacturers Association) a mis au point une nomenclature des différents types d'échangeurs de chaleur à tubes et calandre. La TEMA a également élaboré des instructions de conception mécanique.

Les avantages et les inconvénients de l'échangeur de chaleur à tubes et calandre sont répertoriés ci-dessous.

Avantages :

- disponible pour toutes les applications
- disponible dans presque tous les matériaux
- vaste gamme de débits et de puissances (fonctions)
- fabrication solide et sûre
- disponibilité des bonnes méthodes de conception thermiques et mécaniques

Inconvénients :

- surface d'échange thermique relativement onéreuse par m²
- pas optimal pour le transfert thermique
- le nettoyage (en retirant le faisceau de tubes) du côté de la calandre est laborieux

Comme la conception de l'échangeur à tubes et calandre est robuste et sûre, les raffineries préfèrent ce type d'échangeur de chaleur. Le choix de ce type d'échangeur pour les systèmes à passage unique sera décrit ultérieurement.

III.1 Conception de l'échangeur de chaleur à tubes et calandre pour les systèmes à passage unique

En règle générale, les échangeurs à tubes et calandre TEMA type-AES sont utilisés dans les systèmes à passage unique. L'eau de refroidissement s'écoule dans les tubes et le fluide de process dans la calandre. Les AES se rapportent aux codes utilisés pour décrire les différentes options des échangeurs de chaleur à tube et calandre (Figure III.2)

Système de répartition

Comme la surface côté tubes de l'échangeur peut être plus facilement et efficacement nettoyé que celle côté calandre, les fluides très encrassants sont répartis dans les tubes. De par l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion pour l'eau de refroidissement, il est également plus économique de disposer l'écoulement d'eau côté tubes.

Tête avant de type A

L'ouverture de l'échangeur de chaleur à tubes et calandre en vue de l'inspection et de l'entretien est optimisée avec une « tête avant » de type A, car les tubes de raccordement ne nécessitent pas d'être déplacés lors de l'ouverture de ce type de tête. C'est pour cette raison que ce type de tête est presque toujours utilisé pour les échangeurs de chaleur comportant une substance « polluante » côté tubes.

Calandre de type E

Le choix du type de la calandre dépend des exigences du process pour le fluide côté calandre. En règle générale, c'est le type E qui est choisi (« calandre à une passe »).

Tête arrière de type S

Le choix du type de « tête arrière » est déterminé par les facteurs concernant :

- le besoin de nettoyer le côté calandre (mécaniquement ou avec de l'eau)
- le besoin de nettoyer le côté tubes (mécaniquement ou avec de l'eau)
- la qualité de l'eau de refroidissement (corrosive, entartrage, etc.)
- occurrence d'une dilatation thermique entre le matériau des tubes et le matériau de la calandre
- le besoin d'un contre-courant

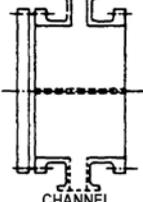
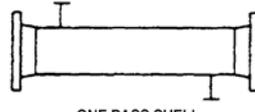
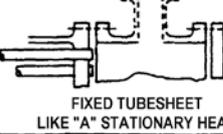
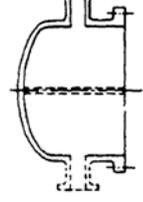
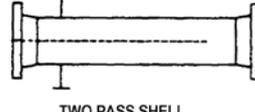
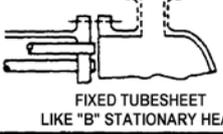
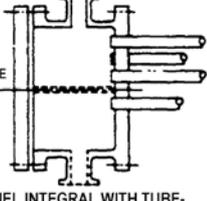
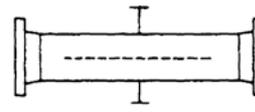
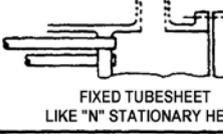
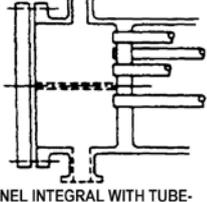
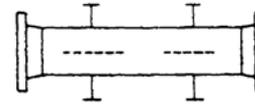
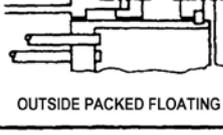
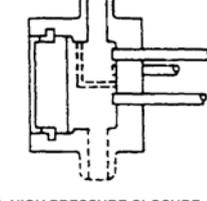
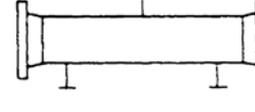
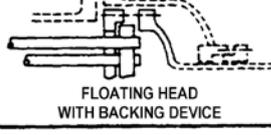
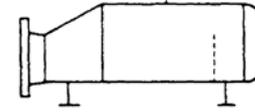
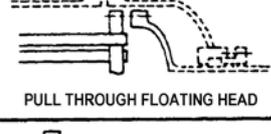
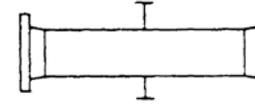
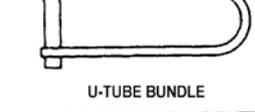
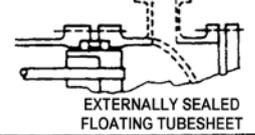
FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES	
A	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E	 ONE PASS SHELL	L	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B	 BONNET (INTEGRAL COVER)	F	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER	G	 SPLIT FLOW	N	 FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
N	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBESHEET AND REMOVABLE COVER	H	 DOUBLE SPLIT FLOW	P	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J	 DIVIDED FLOW	S	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		K	 KETTLE TYPE REBOILER	T	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		X	 CROSS FLOW	U	 U-TUBE BUNDLE
				W	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Figure III.2 : Nomenclature des échangeurs de chaleur (normes de la TEMA [Tubular Exchanger Manufacturers Association])

[tm003, Van der Schaaf, 1995]

En règle générale, le type S (type « tête flottante ») est choisi car il peut être nettoyé mécaniquement (ou avec de l'eau) du côté des tubes et de la calandre. De plus, ce type ne présente aucun problème dans le cas de dilatation thermique entre le matériau des tubes et le matériau de la calandre. Cependant, le type S est le type de « tête arrière » le plus onéreux.

III.2 Fuites dans les échangeurs de chaleur à tubes et calandre

Les fuites, qui s'accompagnent d'une pollution de l'eau de refroidissement par le fluide de process, se produisent dans les échangeurs de chaleur à tube et calandre, dans la majorité des cas suite à des défauts dans le raccord de la plaque tubulaire aux tubes, dans le tube lui-même ainsi que des défauts dans le raccord à brides séparant les deux écoulements (« tête flottante »).

Les fuites peuvent être dues en premier lieu à :

11. une conception médiocre (dans 30 % environ des cas)
12. une fabrication médiocre
13. un fonctionnement hors des limites de la conception (50 à 60 % des cas)
14. une inspection et un entretien médiocres

1. Conception médiocre

Comme une conception incorrecte ou médiocre entraîne inévitablement des fuites, une attention très particulière doit être portée aux paramètres de conception présentés ci-dessous :

- le choix du matériau
- le choix du raccordement de la plaque tubulaire au tube (laminé ou soudé)
- le choix du type de garnissage
- le type de détail sur la face de garnissage
- la conception des brides (épaisseur, sans rotation)
- la conception de la plaque tubulaire (épaisseur, aucune courbe)
- la conception du support de tubes

Dans cette optique, une attention particulière devrait être portée aux conditions de « fonctionnement ». Ce peut être :

- l'apparition de vibrations
- des différences de dilatation thermique
- la division des débits
- les vitesses de débit

Une mauvaise conception comprend également une conception incorrecte des vitesses d'écoulement et de la conception basée sur des données incorrectes.

2. Fabrication médiocre

Une conception satisfaisante ne suffit toutefois pas à empêcher les fuites. Une fabrication médiocre peut également provoquer l'apparition de fuites lors du fonctionnement des échangeurs de chaleur. Lors de la fabrication, les aspects suivants jouent un rôle clé en matière de protection contre les fuites :

- la procédure de resserrage des boulons de bride
- la régularité du traitement des surfaces du garnissage
- le diamètre des trous de tube et la tolérance dans les plaques tubulaires et les chicanes
- la procédure de laminage et de soudure du raccordement de la plaque tubulaire au tube

3. Fonctionnement inapproprié à la conception

Les fonctionnements qui diffèrent des conditions de fonctionnement pour lesquelles l'échangeur de chaleur a été créé peuvent provoquer des dommages, voire des fuites dans l'échangeur de chaleur.

Ces différentes opérations peuvent être :

- les chocs thermiques
- une condition « soudaine » comme une surpression et/ou une température trop élevée
- une augmentation ou une diminution de l'écoulement des flux
- des vibrations
- des moules dans les tubes (qui se sont détachées des canalisations d'eau de refroidissement) associées à des vibrations

En outre, un traitement incorrect peut survenir lors de l'entretien, par exemple lors du nettoyage des tubes avec de la vapeur ou de l'eau chaude (dommages causés par la dilatation thermique).

4. Inspection et entretien médiocres

Lors de l'entretien périodique, l'échangeur de chaleur est ouvert et le faisceau de tubes est retiré, nettoyé et contrôlé. L'inspection, qui vise à détecter et/ou à empêcher les fuites, comprend le contrôle de:

- la corrosion et/ou l'érosion à l'intérieur et à l'extérieur des tubes, et à la connexion de la plaque tubulaire aux tubes
- la corrosion des brides côté garnissage
- la taille des ouvertures pour les tubes dans les chicanes (le diamètre des ouvertures a-t-il augmenté en taille ?)
- la réduction de l'épaisseur des parois des tubes (une attention particulière doit être portée aux extrémités des tubes, pour les tubes situés au niveau des chicanes et pour les coudes des tubes en U)
- les tubes pliés, tordus ou arrachés
- les tubes qui sont collés les uns aux autres ou les tubes détachés
- les plaques tubulaires pliées
- les petites fissures (ou perforations) dans les tubes et la soudure du raccordement de la plaque tubulaire au tube
- la régularité et l'état des surfaces du garnissage

L'entretien périodique se conclut toujours par un test d'eau sous pression, au cours duquel les composants de l'échangeur de chaleur sont mis sous pression afin de vérifier que l'échangeur est toujours capable de fonctionner aux niveaux de pression souhaités. De cette façon, les tubes, les raccordements de la plaque tubulaire au tube et les raccords à brides sont testés en vue de détecter des fuites. Pour déceler les fuites, d'autres méthodes de test plus précises sont également disponibles. Pour cela, de l'air (test « de l'air et de l'eau savonneuse ») ou de l'hélium sont utilisés. Si des défauts ou des zones suspectes sont détectées, leur origine devra être recherchée. Une fois que l'origine a été trouvée, des mesures correctives devront être prises. Dans le cas contraire, et cela s'applique autant à la recherche des causes qu'à la réparation des composants, il est fortement probable que de (nouvelles) fuites apparaissent à l'avenir.

Les mesures correctives comprennent le raccordement des tubes et le remplacement des joints d'étanchéité. Si une entreprise dispose de son propre atelier, les réparations sur un échangeur de chaleur à tube et calandre durera un à deux jours. En privilégiant les mesures préventives plutôt que les mesures correctives, il est possible d'éviter les fuites. Par exemple, les faisceaux de tubes peuvent être remplacés plus tôt. La consignation correcte des tâches d'entretien et des problèmes permet d'optimiser la planification des tâches d'entretien. Il est recommandé de réaliser la fermeture de l'échangeur de chaleur et le serrage des boulons sous contrôle afin d'éviter toute fuite ultérieure. Pour cela, un outil à vitesse réglée peut être utilisé.

III.3 Alternatives

La probabilité d'apparition de fuites peut être réduite en choisissant des alternatives aux choix des matériaux, du type d'échangeur, des raccordements de la plaque tubulaire, du type de garnissage et niveaux de pression du process du système de refroidissement.

Choix des matériaux

Au lieu de l'acier au carbone, des matériaux de qualité supérieure comme le laiton d'aluminium, le cuivre-nickel et le titane, peuvent être utilisés pour le côté eau de l'échangeur de chaleur. Cela augmentera considérablement le prix de l'échangeur de chaleur par rapport à un échangeur de chaleur dont les tubes et les plaques tubulaires sont fabriqués en acier au carbone (Voir aussi l'Annexe IV).

Échangeur de chaleur différent

En optant pour un autre type d'échangeur de chaleur, la probabilité d'apparition de fuites peut être réduite d'une marge considérable.

Les autres solutions sont :

- un échangeur de chaleur à tubes en U
- un échangeur de chaleur à double plaque tubulaire
- une conception en double plaque tubulaire et en U

L'échangeur de chaleur à tubes en U ne dispose d'aucune tête flottante. Par conséquent, la tête arrière ne dispose d'aucun joint à brides. L'échangeur à tubes en U est de 10 à 15 % moins cher que le type à tête flottante. En cas de fuite au niveau du raccordement de la plaque tubulaire aux tubes dans les échangeurs de chaleur avec une conception de double plaque tubulaire, les émissions se produiront dans l'atmosphère et non dans l'autre fluide. La conception de plaque tubulaire double est relativement onéreuse.

Raccordement de la plaque tubulaire au tube

Avec un raccordement soudé de la plaque tubulaire au tuyau, la probabilité de fuite est moins importante qu'avec une conception laminée. Faire un raccordement laminé dans un raccordement soudé peut optimiser l'étanchéité des échangeurs de chaleur. Dans ce cas, on trouve deux soudures : une soudure étanche (une couche de soudure) ou une soudure de résistance (en général, deux couches de soudure). Le prix d'une conception soudée est généralement d'environ 9 à 11 euros par tube supérieur à celui d'une conception laminée.

Type de garnissage

Grâce au joint à brides d'une tête flottante, il est possible de modifier le type de garnissage. Les types habituels de garnissage peuvent être remplacés par un joint avec soudure (« Schweissdichtung »).

ANNEXE IV EXEMPLE DE SÉLECTION DE MATÉRIAUX POUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT HUMIDES DANS LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES (AUTRES QUE CENTRALES ÉLECTRIQUES)

[tm001, Bloemkolk, 1997]

IV.1 Introduction

La sélection de matériaux de construction de systèmes de refroidissement, et en particulier la sélection de matériaux pour les refroidisseurs (échangeurs de chaleur), est une question complexe dans de nombreux cas. Le résultat tient d'un équilibre entre les exigences dues aux propriétés chimiques de l'eau et les exigences opérationnelles (utilisation restreinte d'additifs, nombre de cycles de concentration). Pour répondre à ces exigences, une vaste gamme de matériaux est proposée. La présente Annexe décrit quelques options de matériaux à utiliser en cas d'utilisation d'eau saumâtre dans les systèmes ouverts à passage unique. Elle fournit une sélection qualitative des applications. Au cas par cas, la sélection finale devra impliquer les coûts totaux actualisés afin de faire une comparaison en prenant également en compte les conséquences d'une sélection sur les coûts d'exploitation.

Choix des matériaux pour les échangeurs de chaleur

Il existe de nombreux facteurs qui permettent de déterminer le choix final des matériaux pour les échangeurs de chaleur, comme :

- la composition et la corrosivité de l'eau de refroidissement
- le mode de fonctionnement, par exemple refroidissement par écoulement continu ou à recirculation
- la corrosivité et la nature du fluide à refroidir
- le type de refroidisseur
- la durée de vie
- les coûts

Ce sont quelques-uns des plus importants critères qui doivent être pris en compte dans la conception d'un nouveau refroidisseur, sur la base desquels une sélection finale de matériaux est faite. Dans de nombreux cas, le choix final est le meilleur compromis possible partant du principe que le refroidisseur doit avoir une « durée de vie » économiquement acceptable. Cependant, pendant cette durée de vie, de nombreux refroidisseurs commenceront à fuir. Une cause majeure à ce problème réside dans le fait que, dans la pratique, le refroidisseur n'est pas toujours utilisé dans le respect de ses principes de conception. Sachant par ailleurs qu'une modification des conditions du process, pour quelque raison que ce soit, est relativement courante.

Des causes majeures qui peuvent être à l'origine de fuites sont :

- Des vitesses trop élevées ou trop basses dans le faisceau de tubes, et une circulation médiocre dans la calandre (Tableau IV.1) ;
- Un traitement médiocre de l'eau, c'est-à-dire sur la méthode et le contrôle appliqués ;
- Des températures du métal trop élevées du côté eau de refroidissement.

Concernant les températures, une température de métal de 60°C est considérée comme une limite supérieure, sachant qu'au-delà de cette température la majorité des inhibiteurs de corrosion sont moins efficaces, voire inefficaces. De plus, dans les systèmes à passage unique, la formation de sels de calcium apparaît.

Tableau IV.1 : Vitesse de l'eau de refroidissement et type de matériau

Matériau	Vitesse (m/sec)
Laiton d'aluminium	1-2,1
Cupronickel (90-10)	1-2,5
Cupronickel (70-30)	1-3
Acier au carbone	1-1,8
Acier inox austénitique (316)	2-4,5
Titane	2-5

Choix du matériau des pompes

Le choix du matériau d'une pompe est moins critique car, dans de nombreux cas, cet équipement est doublé (il dispose d'un système auxiliaire). Ainsi, si une pompe tombe en panne, le process est souvent ininterrompu. Une

autre facteur important est le fait que les parois sont souvent plus épaisses que ce qui est vraiment nécessaire (surépaisseur de corrosion).

Choix du matériau pour les tubes d'eau de refroidissement

Dans la plupart des cas, l'acier au carbone avec une surépaisseur de corrosion suffisamment élevée est sélectionné comme matériau pour les tubes d'eau de refroidissement. Si une surépaisseur de corrosion supérieure à 3 mm ne suffit pas pour obtenir une durée de vie acceptable, d'autres matériaux sont sélectionnés comme les plastiques, l'acier au carbone avec un revêtement organique/béton ou, dans des cas exceptionnels, des alliages de qualité supérieure comme l'acier inoxydable, le Monel et d'autres alliages de nickel, etc. Les tubes ont un avantage sur les machines dans le sens où leur remplacement est plus simple et économique, ce qui rend le choix du matériau moins critique.

IV.2 SYSTÈMES DIRECTS À PASSAGE UNIQUE (AVEC DE L'EAU SAUMÂTRE)

La composition et la corrosivité de « l'eau saumâtre » ne sont pas fixes et peuvent varier entre l'eau de surface « douce » et l'eau de mer. L'eau saumâtre est généralement présente dans la zone de transition située entre les rivières et/ou les autres écoulements « d'eau douce » et la mer (deltas). Sa composition et ses caractéristiques peuvent largement varier d'un endroit à un autre et d'une saison à une autre. La profondeur locale de l'eau, le niveau d'écoulement continu (remplacement) et les marées peuvent jouer un rôle important dans la corrosivité de ce type d'eau. Certaines eaux saumâtres ont un niveau de corrosivité supérieur à celui de l'eau de mer. Par exemple, dans eaux peu profondes avec une abondance de plantes, une augmentation des composés soufrés peut apparaître, résultat de la décomposition, et peut provoquer de graves corrosions par piqûre dans alliages de cuivre. Dans de nombreux cas, la quantité de Boue en suspension est considérable, ce qui peut fortement polluer les échangeurs de chaleur de l'installation. Dans ces cas, l'utilisation d'acier inoxydable est discutable car la formation de petits trous (piqûres) se produira certainement rapidement. Comme tous ces facteurs ne sont pas bien connus dans la plupart des cas, il est recommandé de considérer la corrosivité de l'eau saumâtre comme égale à celle de l'eau de mer avec un niveau relativement élevé de vase/Boue en suspension. Un autre avantage, c'est que les connaissances et l'expérience sur l'apparition de corrosion par l'eau de mer sont nombreuses.

Pompes : Selon la situation, les matériaux présentés dans le tableau ci-dessous sont souvent utilisés pour les pompes pour de l'eau saumâtre (d'autres matériaux peuvent être utilisés, mais ils sont généralement plus onéreux) :

Tableau IV.2 : Matériaux utilisés pour des pompes pour de l'eau saumâtre

Corps	Roue	Arbre de commande	Commentaires
Fonte nodulaire)*	Bronze d'étain	316)* La fonte grise est également possible. La probabilité de gratification est largement supérieure. Il est également possible d'utiliser parfois de l'acier moulé.
Bronze d'aluminium Bronze d'aluminium	Acier inoxydable 316)* Bronze d'aluminium	Monel Monel	
Bronze d'étain Bronze d'étain	Bronze d'aluminium Acier inoxydable 316	Monel Monel)* Acier inoxydable austénitique (Cr-Ni-Mo 18-8-2)

La tendance consiste à sélectionner une combinaison pour le corps et la roue, permettant au corps d'être, en principe, la région anodique de l'installation.

Tubes

Dans la plupart des cas, l'acier au carbone avec une surépaisseur de corrosion est utilisé. Une autre possibilité consiste à fournir un revêtement organique à l'acier au carbone ou à le bétonner. Dans ces deux cas, les soudures sont le point faible de l'installation.

De nos jours, les tubes en résine époxy renforcés de fibre de verre sont de plus en plus utilisés, en particulier dans les systèmes souterrains. L'avantage certain de ce matériau est qu'il est presque complètement résistant à l'eau souterraine. Les coûts d'installation sont presque les mêmes que ceux d'un système de tubes en acier au carbone avec revêtement organique interne ou externe. Dans le temps, cette solution est souvent la plus économique des deux.

Échangeurs de chaleur/Refroidisseurs

Comme mentionné auparavant, le choix d'un matériau dans un échangeur de chaleur est relativement complexe car, lorsque le faisceau de tubes est concerné, la corrosivité du fluide à refroidir doit être prise en compte. En supposant que le fluide de process n'est pas corrosif pour le matériau du faisceau de tubes, et qu'une éventuelle contamination du process n'est pas significative (par exemple par les ions du cuivre), le choix du matériau est principalement déterminé par la qualité de l'eau.

Les choix possibles de matériaux pour les échangeurs de chaleur de type « tubes et calandre » pour de l'eau saumâtre sont fournis dans le tableau ci-dessous (l'eau circule dans les tubes).

Tableau IV.3 : Matériaux utilisés pour les échangeurs de chaleur de type tubes et calandre fonctionnant avec de l'eau saumâtre

Calandre/Corps	Enveloppe de l'eau	Tubes	Plaque tubulaire
Acier au carbone	Acier au carbone	Acier au carbone)* ¹	Acier au carbone
Acier au carbone	Acier au carbone)* ²	Laiton d'aluminium	Acier au carbone
Acier au carbone	Acier au carbone)* ²	Laiton d'aluminium	Bronze d'aluminium
Acier au carbone	Acier au carbone)* ²	Laiton d'aluminium et cupronickel)* ⁴	Acier au carbone avec un revêtement en laiton d'aluminium
Acier au carbone	Bronze d'étain	Acier inoxydable 316)* ³	Acier au carbone
Acier au carbone	Acier au carbone)* ²	Titane)* ⁵	Acier au carbone

Commentaires du Tableau IV.3 :

Il existe plusieurs possibilités dans la liste ci-dessus. Le choix final est largement déterminé par le niveau de corrosivité de l'eau saumâtre et par les conditions du process.

)^{*1} les tubes en acier au carbone sont possibles seulement lorsque vous êtes sûr que l'eau n'est pas corrosive (grâce à une expérience pratique, par exemple). Cela n'est presque jamais une option.

)^{*2} Les enveloppes d'eau sont souvent fournies avec un revêtement organique plus quelques anodes actives. Si la plaque tubulaire contient un métal plus précieux, un revêtement organique doit être appliqué à ce métal afin d'empêcher les effets de pile dans les enveloppes de l'eau.

)^{*3} L'utilisation d'un matériau austénitique tel que le 316 n'est pas sans risques. En cas de pollution, une forte probabilité de piqûres existe. Ce procédé peut être extrêmement rapide. Un autre risque est lié à l'apparition possible d'une corrosion sous contrainte dans ce type de matériau. Cependant, l'expérience pratique montre que cela ne se produit pas souvent, ce qui est probablement dû aux températures relativement faibles dans ce type de système. Ce risque peut être considérablement réduit, voire éliminé, si vous utilisez une version supérieure d'alliage, comme le 904L, le 254SMO ou l'Incoloy 825. Ces types de matériaux sont également utilisés lorsque la surface côté process le nécessite.

)^{*4} Les alliages en cupronickel et autres sont choisis si la température de conception du métal est trop élevée pour le laiton d'aluminium.

)^{*5} Dans de nombreux cas, le titane représente la meilleure solution. On pense souvent qu'un échangeur de chaleur en titane est trop onéreux. Le prix de ce matériau a considérablement diminué ces dernières dizaines d'années, et il est appliqué de façon plus rentable. On s'attend à ce que la réduction des différences de coûts et l'augmentation des problèmes avec le traitement de l'eau provoquent une augmentation de l'utilisation du Ti en comparaison des alliages de Cu-Ni qui sont encore appliqués à l'heure actuelle.

Outre sa forte résistance à la corrosion, même dans de l'eau extrêmement polluée, ce matériau présente plusieurs avantages :

- Il est possible d'utiliser des tubes avec des parois extrêmement fines, donc moins de matériau par m² de surface de transfert de chaleur.
- La conductivité de la chaleur est excellente.
- La valeur à la casse est élevée et le matériau est bien adapté à la réutilisation.
- L'espérance de vie du matériau est longue.

Un inconvénient : la prolifération biologique est supérieure à celle des alliages contenant du cuivre, par exemple. Il nécessite donc une utilisation supplémentaire de biocides. Autre inconvénient : le titane ne peut pas être utilisé dans un environnement réducteur, car aucune couche protectrice d'oxyde ne se forme.

IV.3 Système indirect à passage unique (avec de l'eau saumâtre/eau déminéralisée)

Dans le système indirect (secondaire) à passage unique, la chaleur est absorbée dans un circuit de refroidissement secondaire fermé, puis cette chaleur absorbée est transférée dans un système ouvert à passage unique via un échangeur de chaleur. Habituellement, la qualité/corrosivité de l'eau dans ces systèmes est différente pour chaque circuit de refroidissement. La partie primaire est généralement d'une qualité inférieure par rapport à la partie secondaire. Dans ce cas, la partie primaire contient l'eau saumâtre, et la partie secondaire contient l'eau déminéralisée.

Sélection des matériaux pour le système de refroidissement primaire

Les matériaux du système primaire, rempli d'eau saumâtre, sont décrits dans la Section IV.2. L'échangeur de chaleur, situé entre les circuits primaire et secondaire, est d'une importance capitale pour le fonctionnement. Une défaillance de cet échangeur de chaleur entraînera des conséquences graves. Cela doit donc être pris en compte lors du choix des matériaux pour l'échangeur de chaleur. Si le fluide de refroidissement primaire est de l'eau saumâtre, le meilleur choix possible pour les tubes ou les plaques (échangeur à plaques) est le titane. D'autres alliages de qualité supérieure, comme le 254 SMO, peuvent être envisagés dans certains cas, mais en général le titane est la meilleure solution.

Sélection des matériaux pour la boucle secondaire

Un élément essentiel pour un système secondaire fermé est le fait que l'absence d'oxygène dans l'eau évite la corrosion. Dans ce cas, l'eau déminéralisée a été sélectionnée comme fluide de refroidissement. Toutefois, dans un état aéré, cette eau déminéralisée est extrêmement corrosive pour l'acier au carbone. Cela peut être éliminé par l'alcalinisation de l'eau (pH=9). L'eau du robinet avec une teneur en chlore relativement élevée est, en principe, aussi adaptée que l'eau déminéralisée.

Si ces dispositions sont prises, dans ce cas l'eau est « morte », ce qui signifie que sa corrosivité est minime. En principe, tous les composants, y compris les tubes des échangeurs de chaleur, les pompes et ailettes des tubes peuvent être en acier au carbone. Les conditions du process doivent évidemment être prises en compte.

Il est important que la concentration en oxygène dans ces systèmes soit vérifiée de façon régulière. Dans certains cas, les nitrates sont utilisés comme inhibiteurs dans ses systèmes. En gardant une eau alcaline et/ou en la traitant avec des nitrates, l'infiltration d'oxygène est moins critique.

IV.4 Systèmes de refroidissement ouverts à recirculation

IV.4.1 Application de l'eau douce dans une tour de refroidissement ouverte par voie humide

Concernant l'application du matériau, l'un des objectifs de la conception d'un système de refroidissement ouvert à recirculation (tour de refroidissement ouverte par voie humide) consiste à conditionner l'eau dans le système (inhibiteurs, contrôle du pH, etc.) de telle façon que l'utilisation de l'acier au carbone pour la majorité des composants du système soit acceptable d'un point de vue économique.

Ce cas est basé sur l'eau du robinet. En fonction de la composition et des cycles de concentration, la concentration des composants dans cette eau (parfois appelée « épaissement ») augmentera, et le nombre de sels dissous augmentera proportionnellement, contribuant également à l'augmentation de la corrosion. Grâce aux inhibiteurs et aux niveaux de pH corrects, cet effet est supprimé. La conception d'un tel système repose souvent sur le fait que l'eau n'est pas corrosive pour l'acier au carbone.

La plupart des composants, notamment les tubes et les pompes, sont donc fabriqués en acier au carbone. Les tubes dans un échangeur de chaleur sont également souvent fabriqués à partir d'acier au carbone. Dans des systèmes critiques ou pour fournir davantage de sécurité, les tubes sont souvent fabriqués en laiton d'aluminium. Les problèmes surviennent généralement lorsque la substance à refroidir est corrosive. Dans de très nombreux cas, l'acier austénitique ou un alliage supérieur doivent alors être utilisés, avec les mêmes risques que mentionnés auparavant, par exemple des piqûres ou de la corrosion sous contrainte.

Il est extrêmement important que la pollution soit maintenue à son niveau minimum. En principe, cela s'applique à tous les systèmes de refroidissement humides. Dans un système de refroidissement ouvert, la filtration « d'un

courant latéral » en externe est souvent utilisée, ou dans les refroidisseurs critiques (condenseurs), un système d'auto-nettoyage est installé (avec des balles en caoutchouc par exemple).

IV.4.2 Application de l'eau salée dans une tour de refroidissement ouverte par voie humide [tm110, BDAG, 1995]

L'utilisation d'eau salée ou saumâtre dans une tour de refroidissement nécessite des applications qui veillent en particulier à la corrosion des matériaux métalliques. Il est possible de récapituler plusieurs observations. Pour les structures résistantes à l'eau salée, une expérience satisfaisante a été obtenue avec des espèces de bois dur et du bois traité sous pression. Cependant, le bois traité sous pression est obtenu avec du CCA, et ne peut pas être considéré comme une méthode écologiquement rationnelle. L'utilisation de ciment résistant aux sulfates pour les constructions et les renforcements en béton pour les éléments externes et internes donnent de bons résultats. Le silicium, le bronze d'aluminium et/ou l'acier inoxydable peuvent être appliqués, mais uniquement s'ils sont galvanisés au-dessus du niveau de distribution de l'eau. Les revêtements en plastique sont recommandés pour les éléments en bronze d'aluminium/au silicium. Les matériaux du garnissage doivent être ouverts à un faible encrassement, avec une capacité de charge élevée, dans lesquels la combinaison du film (parties supérieures) et du non-film (parties inférieures) a prouvé son efficacité. La vitesse de l'eau doit être assez basse pour éviter la corrosion, mais assez élevée pour éviter l'entassement des solides lourds. Ces mesures particulières peuvent, parmi d'autres, réduire les exigences en matière de traitement de l'eau dans les applications avec de l'eau salée.

ANNEXE V PRODUITS CHIMIQUES UTILISÉS POUR LE CONDITIONNEMENT DE L'EAU DE REFROIDISSEMENT

Dans tous les systèmes à refroidissement par eau, des additifs sont appliqués pour traiter l'eau de refroidissement dans le but de protéger le système de refroidissement et d'éviter une diminution de l'échange thermique à cause du tartre, de l'encrassement et de la corrosion. Une vaste gamme d'additifs est appliquée pour résoudre ces problèmes liés à l'eau de refroidissement. La présente Annexe fournit une vue d'ensemble des divers types d'additifs qui sont appliqués dans les différents systèmes de refroidissement par voie humide. Dans la dernière partie, le traitement de l'eau de refroidissement dans une tour de refroidissement humide ouverte est expliqué afin de décrire la complexité du conditionnement de l'eau de refroidissement et les éléments qui entrent en jeu.

V.1 Inhibiteurs de corrosion

V.1.1 Corrosion

La corrosion peut être définie comme la destruction d'un métal par une réaction chimique ou électrochimique avec son environnement. Le résultat est un oxyde métallique ou un autre sel avec une capacité structurelle médiocre, pouvant être à l'origine d'endommagements sur le matériel. Dans les systèmes de refroidissement, la corrosion entraîne deux problèmes fondamentaux. Le premier problème, le plus évident, est la panne de l'équipement avec le coût de remplacement qui s'ensuit, ainsi que le temps d'arrêt de l'installation. Le second problème est la diminution du rendement de l'installation provoquée par une perte de l'efficacité du transfert thermique, provenant de l'encrassement de l'échangeur de chaleur à cause de l'accumulation des produits de corrosion.

La corrosion est due ou favorisée par la présence d'oxygène, la teneur en sel, la formation de dépôts ou un niveau de pH très bas.

La corrosion peut également être liée à l'encrassement par la croissance d'organismes, appelée alors Corrosion Influencée par les Micro-organismes (CIM) : les bactéries produisant de l'acide causent de la corrosion et les moules qui vibrent sont à l'origine de l'érosion.

V.1.2 Inhibiteurs de corrosion appliqués

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être identifiés selon leur fonction. Ils permettent de supprimer, passiver, précipiter ou adsorber la matière corrosive. Les agents de passivation (anodiques) forment un film d'oxyde protecteur à la surface du métal. Les agents de précipitation (cathodiques) sont simplement des produits chimiques qui forment des précipités insolubles pouvant revêtir et protéger la surface. Les agents d'adsorption ont des propriétés polaires leur permettant d'être adsorbés à la surface du métal.

L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion varie d'un système à l'autre. Dans les **systèmes à passage unique**, les polyphosphates et le zinc sont appliqués, et les silicates et molybdates sont utilisés de façon limitée. Dans certains pays, presque aucun inhibiteur de corrosion n'est dosé dans les systèmes à passage unique, à l'exception d'inhibiteurs pour les métaux jaunes (par exemple, le ferrosulfate) utilisés dans les échangeurs de chaleur ou les condenseurs en alliage de cuivre.

Dans les **systèmes ouverts à recirculation**, un programme de contrôle de la corrosion plus complet est normalement nécessaire. Pendant de nombreuses années, des programmes basés sur le chromate furent utilisés, mais du fait de sa toxicité son utilisation a été considérablement réduite, et il ne devrait d'ailleurs plus être appliqué car il existe d'autres solutions parfaitement adaptées. Les programmes de corrosion les plus utilisés à l'heure actuelle reposent sur les phosphates, et du zinc est ajouté si les conditions de l'eau le nécessitent. Le système est souvent exploité dans des conditions alcalines (pH égal à 8-9) mais dans ce cas, les traitements biocides et les agents dispersants doivent probablement être adaptés. Par conséquent, l'eau est, par nature, moins corrosive. L'inconvénient d'un fonctionnement alcalin est l'augmentation du potentiel d'entartrage. Les conditions alcalines associées aux phosphonates organiques sont efficaces contre la corrosion et l'entartrage.

En théorie, les systèmes fermés ne devraient pas nécessiter d'inhibiteurs de corrosion. Tout oxygène introduit avec l'eau d'appoint initiale devrait être rapidement appauvri par l'oxydation des métaux du système. Ensuite, aucune autre corrosion ne devrait se produire. Toutefois, les systèmes fermés perdent souvent assez d'eau et d'air pour nécessiter une protection contre la corrosion. Une autre théorie est que le temps de résidence élevé de l'eau

(jusqu'à plusieurs mois) est à l'origine du traitement à partir d'inhibiteurs de corrosion. Pour les systèmes fermés, les trois inhibiteurs de corrosion les plus fiables sont le nitrite, le chromate et le molybdate. En règle générale, il a été prouvé que le chromate et le molybdate sont des traitements de qualité supérieure. La toxicité du chromate limite son utilisation, en particulier lorsqu'un système doit être drainé. Dans de nombreux cas, une solution autre que le chromate est disponible, mais son utilisation est encore autorisée dans certains États membres. Les traitements au molybdate fournissent une protection efficace contre la corrosion et sont considérés comme plus acceptables d'un point de vue environnemental que les traitements au chromate.

Quoiqu'il en soit, le type d'inhibiteur de corrosion le plus applicable dépend des conditions des systèmes (pH et matériaux utilisés). Par exemple, les inhibiteurs de corrosion les plus efficaces pour le cuivre sont les azoles aromatiques. Les concentrations présentes dans les systèmes de refroidissement évaporatifs à recirculation sont généralement de l'ordre de 2 à 20 mg/l, en tant que composé actif. Pour certains inhibiteurs anodiques (tels que les chromates, molybdates et nitrites), les concentrations qui étaient utilisées autrefois variaient de 500 à 1 000 mg/l dans les systèmes fermés.

V.2 Inhibiteurs d'entartrage

V.2.1 Entartrage

Si la concentration en sel dans le film aqueux sur l'échangeur de chaleur dépasse sa solubilité, une précipitation se produit, appelée entartrage. Les principales formes de tartre sont le carbonate de calcium et le phosphate de calcium, mais un dépôt de sulfate de calcium, silicates, Zn et Mg peut également se produire en fonction des minéraux contenus dans l'eau. L'entartrage réduit les performances de l'échangeur de chaleur car la conductivité thermique du carbonate de calcium est environ 25 fois inférieure à celle de l'acier. L'entartrage dépend de trois facteurs majeurs : la minéralisation (alcalinité), l'augmentation de la température et le pH de l'eau circulante, mais aussi de facteurs secondaires : la présence de matières organiques en complexation et la composition chimique des surfaces de l'échangeur de chaleur. De plus, certaines géométries du corps de l'échangeur de chaleur favorisent l'entartrage. Les ondulations, les canaux obliques et un rapport de débit d'eau insuffisant par surface de film peuvent favoriser l'entartrage. Dans les systèmes à recirculation, des cycles élevés de concentration peuvent également être à l'origine de l'entartrage.

L'entartrage peut provoquer des problèmes dans les tours de refroidissement, car la surface du garnissage peut être très sensible aux différents types de dépôt. À cause de l'évaporation dans la tour (1,8 % de la circulation par 10 K de refroidissement), les minéraux et les substances organiques contenus dans l'eau de recirculation peuvent se concentrer à un tel niveau qu'un entartrage peut survenir.

Pour les centrales électriques en particulier, un entartrage a été signalé suite à :

- une chauffe de l'eau jusqu'à 30 °C dans des circuits de refroidissement direct et jusqu'à 45 °C dans des circuits avec tour,
- une évaporation de l'eau pour influencer le refroidissement dans les tours, entraînant la concentration du sel dissous jusqu'à un coefficient de 1,6, ou aussi élevé que le facteur de concentration puisse le déterminer,
- des pertes en dioxyde de carbone libre lors du passage de l'eau dans les tours, entraînant une augmentation du pH qui varie avec le débit et le type de garnissage. Avec les anciens corps fixes en bois, le pH atteignait 7,5 à 7,8, mais avec les corps en plastique, il augmente pour atteindre 8,2 à 8,4 dans les petites tours (250 MW_e) ainsi que dans les grandes tours (900 MW_e ou plus).

V.2.2 Inhibiteurs d'entartrage appliqués

La formation de tartre peut jouer un rôle important dans les systèmes de refroidissement à passage unique et dans les systèmes ouverts à recirculation. Dans les systèmes fermés à recirculation, cela n'est pas un problème majeur. Il peut se produire si les déversements nécessitent des ajouts fréquents en eau d'appoint, et selon les facteurs mentionnés auparavant.

L'augmentation de la concentration en sels dans l'eau de refroidissement **des systèmes de refroidissement ouverts à recirculation** et dans les systèmes de distribution est provoquée par l'évaporation dans la tour de refroidissement et doit être contrôlée par la purge de déconcentration. Le rapport de la concentration en particules de soluté dans l'eau de recirculation à celle de l'eau d'appoint est appelé *facteur de concentration*. Le facteur de concentration varie de 2-3 pour les grandes centrales électriques à 8-9 pour certains systèmes de refroidissement industriels à recirculation. En général, les facteurs de concentration du secteur industriel hors centrales électriques sont compris entre 3 et 5.

Dans la pratique, l'entartrage est contrôlé en ajustant la valeur du pH par dosage d'acide et par l'application d'inhibiteurs d'entartrage. L'expérience dans les grands systèmes des centrales électriques équipées de tours de refroidissement a montré que le traitement avec de l'acide (acide sulfurique ou acide chlorhydrique) ne modifie pas le pH, qui reste alcalin. Les acides neutralisent plutôt l'alcalinité afin d'éviter la précipitation de CaCO_3 .

Cependant, dans les eaux décarbonées, le contrôle du pH peut-être effectué en ajoutant des acides. La décarbonation par précipitation des carbonates de calcium dépend de trois facteurs essentiels qui sont la minéralisation (alcalinité), la température et le pH de l'eau circulante. Les facteurs secondaires sont la présence de matières organiques complexantes dans l'eau et la composition chimique des surfaces de l'échangeur de chaleur.

Trois solutions alternatives ont été indiquées pour le traitement chimique de l'eau de refroidissement afin d'éviter l'entartrage dans les échangeurs de chaleur et les tours de refroidissement humide dans les systèmes de grande capacité :

- La décarbonation de l'eau d'appoint (entraînant la formation d'une boue à éliminer)
- L'ajout d'acide
- L'ajout d'inhibiteurs d'entartrage organiques

Les principaux agents de contrôle du tartre sont les polyphosphates, phosphonates, polyacrylates, copolymères et les ter-polymères. En général, les concentrations en agents de contrôle du tartre sont comprises entre 2 et 20 mg/l, en tant que composé actif. Des stabilisateurs de dureté empêchent la formation de cristaux et sont utilisés dans les systèmes à recirculation, mais rarement voire jamais dans les systèmes à passage unique.

Les systèmes fermés à recirculation ne sont pas soumis à la formation de tartre dans le circuit primaire, sauf lorsqu'une eau d'appoint de forte dureté doit être utilisée. De nombreux systèmes fermés utilisent de l'eau adoucie par zéolithe ou des condensats comme eau d'appoint pour empêcher tout problème d'entartrage. En général, une corrosion se produit en cas de fuite d'eau ou d'air. Dans le circuit de refroidissement secondaire, l'eau circule dans un système par évaporation ouvert. À ce niveau, une corrosion peut se produire à l'extérieur des serpents, là où a lieu le transfert thermique par évaporation.

V.3 Inhibiteurs d'encrassement (agents dispersants)

V.3.1 Encrassement

L'encrassement apparaît lorsque que des particules organiques insolubles suspendues dans l'eau dans les **systèmes de refroidissement à passage unique** et dans les **systèmes de refroidissement ouverts à recirculation** forment des dépôts à la surface des systèmes. Les particules, la granulométrie et la vitesse faible de l'eau sont des facteurs qui favorisent l'encrassement. Les agents encrassants peuvent être le sable, la boue, les oxydes de fer et d'autres produits de corrosion, et ils peuvent également réagir avec certains produits chimiques de traitement de l'eau. Ils peuvent être en suspension dans l'air, pénétrer dans le système de refroidissement avec l'eau (boue, argile) ou être introduits par des fuites de process, et ils peuvent être très finement dispersés car leur taille est minimale : de 1 à 100 nm.

Les agents dispersants sont des polymères utilisés pour empêcher l'encrassement en éliminant les particules (organiques) (par exemple, le micro-encrassement et la couche de boue) de la surface de l'échangeur de chaleur en augmentant la charge électrique, résultant de leur absorption. Les particules se repoussent et restent donc en suspension. Pour faciliter la pénétration des biocides dans le micro-encrassement et les couches de boue, il est possible d'utiliser des surfactants souvent appelés biodispersants. Les agents dispersants permettent de garder la surface des échangeurs de chaleur propre, réduisant ainsi le risque de corrosion. Il est courant de doser les biocides en combinaison avec les agents dispersants à des niveaux de 1 à 10 mg/l, en tant qu'ingrédient actif.

V.3.2 Inhibiteurs d'encrassement appliqués

Les agents dispersants les plus efficaces et les plus largement utilisés sont les polymères anioniques de faible poids moléculaire. Les agents dispersants les plus importants sont : les sulfonates organiques et métalliques, les phénolates métalliques, les dialkyldithiophosphates métalliques, les dialkylsulfosuccinates de sodium, l'alkylpolyéthylène et les amines alicycliques ainsi que les sels de phosphate monoéthanolamines, les polyacrylates, les polyméthacrylates et les polymères à base d'acrylates.

V.4 Biocides

V.4.1 Bioencrassement

L'entraînement d'organismes dans l'eau ou l'air peut provoquer un bioencrassement. Le bioencrassement se décline généralement en deux types principaux : le macro-encrassement (les moules, par exemple) et le micro-encrassement (les bactéries, les champignons et les algues, par exemple).

Le macro-encrassement se limite généralement aux **systèmes à passage unique**, et il est plus grave avec de l'eau de mer ou saumâtre qu'avec de l'eau douce. Il peut provoquer un colmatage important des canalisations, mais aussi une érosion et une corrosion. Le macro-encrassement est très spécifique à la qualité de l'eau et à la situation, que ce soit en termes de quantité ou de variété des espèces.

Les problèmes liés au **micro-encrassement** surviennent dans les **systèmes à passage unique et dans les systèmes ouverts à recirculation**. La prolifération microbienne sur les surfaces humides provoque la formation de biofilms. Le résultat d'une prolifération microbienne non contrôlée sur les surfaces est la formation de boue. Le composant biologique ou biofilm est produit par les cellules vivantes et par leurs sous-produits métaboliques. Le micro-encrassement est toujours la première action de colonisation des surfaces au cours du développement du bioencrassement.

L'effet prédominant du bioencrassement est la réduction de la capacité de transfert thermique des échangeurs de chaleur et les pertes d'énergie provoquées par une augmentation de la résistance de frottement. De plus, à l'endroit même où un métal exposé est encrassé, une corrosion d'origine microbienne peut se produire. En outre, les espèces microbiennes peuvent menacer la santé humaine en se diffusant via les tours de refroidissement.

De nombreux traitements et techniques anti-encrassement sont disponibles. Une synthèse de ces applications, le type d'eau de refroidissement et les problèmes d'eau associés sont résumés dans le Tableau V.1.

Tableau V.1 : Étude des organismes encrassants et colmatants, et degré d'encrassement dans l'eau de mer, saumâtre et douce. La dernière colonne présente les techniques de réduction (le degré d'encrassement est décrit comme : + certain ; ++ considérable ; +++ important)

(De : Applied Hydroecology 10, 1-2, 1998)

Pays	Type d'eau de refroidissement ; encrassement, colmatage et entartrage associés			Principales techniques de réduction de l'encrassement
	Eau de mer	Eau saumâtre	Eau douce	
Belgique		Hydrozoaires + Boue ++	Boue ++ Moules zébrées + Palourdes asiatiques + Bryozoaires ++ Gastropodes ++ Dans les tours de refroidissement : Entartrage ++	Eau douce: Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne à l'aide de balles en éponge. Chloration discontinuée par hypochlorite
Danemark	Moules + Boue +	Voir « Eau de mer »	Non utilisée	Eau de mer : Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne à l'aide de balles en éponge. Peintures anti-encrassement non toxiques.
France	Moules +++ Bernacles ++ Colmatage par : Cydippes (méduses) +++ Algues +++	Encrassement : aucun problème particulier grâce aux grandes variations de salinité dans les estuaires. Colmatage par : Macrophytes dérivants +	Moules zébrées ++ Bryozoaires ++ Algues ++ Gastropodes ++ Palourdes asiatiques + Dans les tours de refroidissement : Entartrage ++	Eau de mer : Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne à l'aide de balles abrasives en éponge (certaines installations). Chloration continue à faible dosage (0,5-1 mg/l), par électrochloration Eau douce: Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne à l'aide de balles en éponge. Chloration choc une à deux fois par an
Allemagne			Moules zébrées + Boue ++ Dans les tours de refroidissement : Entartrage ++	Eau douce: Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne à l'aide de balles en éponge. Chloration discontinuée par hypochlorite. H ₂ O ₂ , ozone
Irlande	Moules + Boue + Colmatage par : Poissons +++	Voir « Eau de mer »	Moules zébrées	Eau de mer : Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne à l'aide de balles. Chloration continue par hypochlorite

Tableau V.1 (suite) : Étude des organismes encrassants et colmatants, et degré d'encrassement dans l'eau de mer, saumâtre et douce. La dernière colonne présente les techniques de réduction

(le degré d'encrassement est décrit comme : + certain ; ++ considérable ; +++ important)

(De : Applied Hydroecology 10, 1-2, 1998)

Pays	Type d'eau de refroidissement ; encrassement, colmatage et entartrage associés			Principales techniques de réduction de l'encrassement
	Eau de mer	Eau saumâtre	Eau douce	
Italie	Moules +++ Hydrires ++ Tubicoles ++ Bernacles ++ Boue +++ Colmatage par : Algues + Posidonie +	(seulement une installation) Colmatage par : Algues + Débris +	Moules zébrées, Boue ++ Colmatage par : Plantes dérivantes, Feuilles +	Eau de mer : Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne par des balles abrasives en éponge. Chloration continue ou intermittente par hypochlorite ou électrochloration. Eau douce: Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne par des balles en éponge. Chloration intermittente (quelques cas très rares)
Pays-Bas	Moules +++ Boue ++ Colmatage par : Méduses +++ Poissons ++	Moules ++ Boue + Colmatage par : Poissons +	Moules zébrées + Boue ++ Colmatage par : Poissons ++	Eau de mer et eau douce: filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne par des balles en éponge. Traitement thermique. Chloration continue ou discontinue par hypochlorite
Norvège			Énergie hydraulique : problèmes seulement avec les poissons migrateurs.	
Portugal	Moules ++ Boue +		Palourdes asiatiques +	Eau de mer : Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne par des balles abrasives en éponge (certaines installations). Chloration continue à faible dosage (0,5-1 mg/l), par électrochloration Eau douce : Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne par des balles en éponge.
Espagne	Boue + Tubicoles + Moules ++ Huîtres +		Boue ++ Dans les tours de refroidissement : Entartrage ++	Eau de mer et eau douce: Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne par des balles en éponge. Chloration discontinue, dosage faible et choc par hypochlorite et électrochloration.

Royaume Uni	Bernacles + Moules ++ Boue ++ Colmatage par : Poissons +++ Algues ++ Méduses +	Voir « Eau de mer »	Boue ++ Dans les tours de refroidissement : Entartrage ++	Eau de mer et eau douce: Filtration de l'eau et des débris. Nettoyage des condenseurs en ligne par des balles en éponge. Chloration continue (intermittente en hiver) par hypochlorite et électrochloration
----------------	--	------------------------	--	--

V.4.2 Traitements biocide appliqués

Pour lutter contre le bioencrassement dans les systèmes de refroidissement industriels ouverts par voie humide, des biocides sont incorporés à l'eau de refroidissement. De nombreuses recherches ont été menées sur les biocides, sur leur utilisation et leurs effets, et de nombreuses publications sont disponibles. Les biocides sont des substances qui ralentissent la prolifération microbologique dans l'eau de refroidissement, qui réduisent le nombre total de cellules dans l'eau d'alimentation et qui diminuent la stabilité de la matrice du biofilm, réduisant ainsi la pollution organique dans le système de refroidissement. La prolifération microbologique comprend le développement des micro-organismes, des bactéries, des algues et des champignons, mais aussi le développement de macro-organismes comme les huîtres, les bernacles et les moules.

En général, les biocides sont définis selon leur caractère oxydant ou non oxydant.

Les biocides oxydants possèdent un mode d'action biocide non spécifique à large spectre, limitant ainsi le degré de résistance que les organismes encrassants pourraient développer face à ces biocides. Les biocides non oxydants sont plus sélectifs et plus complexes dans leur fonctionnement, et nécessitent donc un temps de réaction plus long que les bioxydes oxydants.

Toutefois, le problème environnemental lié aux biocides concerne leur toxicité inhérente. Certains antimicrobiens utilisés dans les systèmes de refroidissement sont des composés se décomposant rapidement dans l'eau, réduisant donc certains risques potentiels sur l'environnement. Cette décomposition chimique s'accompagne souvent d'une réduction dans la toxicité du composé. Le composé peut être ajouté au système de refroidissement, il peut accomplir sa tâche d'élimination des microbes dans le système, puis se décomposer en produits chimiques moins toxiques.

La consommation de biocides est déterminée par le type de système de refroidissement, par la ressource en eau (douce ou salée), par la saison, par la fuite de matières organiques du process et par la demi-vie des substances. Dans **les systèmes à passage unique**, on utilise presque uniquement les biocides. En règle générale, ce sont des biocides oxydants comme l'hypochlorite ou des dérivés comme l'hypobromite.

Dans **les systèmes de refroidissement ouverts à recirculation**, l'utilisation de biocides repose sur un biocide oxydant seul ou associé à un biocide non oxydant. La consommation de biocides non oxydants et d'autres agents de conditionnement est presque entièrement déterminée par les systèmes de refroidissement à recirculation. En outre, il fut observé que dans certains systèmes fermés à recirculation, aucun biocide n'est ajouté.

Le Tableau V.2 fournit une indication sur les quantités de biocides qui sont utilisées dans certains États membres européens.

V.4.3 Biocides oxydants

Les biocides oxydants couramment utilisés dans les systèmes de refroidissement industriels sont les halogènes, le chlore et le brome, sous forme liquide et gazeuse, les donneurs organohalogénés, le dioxyde de chlore et l'ozone, le monochloramine et les peroxydes. En cas d'utilisation d'eau de mer, il est plus intéressant d'appliquer le dioxyde de chlore pour son efficacité, et la formation réduite d'hydrocarbures bromés (en particulier le bromoforme, le chlorodibromométhane, le bromodichlorométhane et le dibromoacétonitrile) et de trihalométhanes (THM) par rapport à l'hypochlorite. Mais d'un autre côté, il produit des ions ClO_3^- . Le chlore gazeux (Cl_2) est également utilisé dans certaines installations car il est compact et économique, mais il présente un risque de sécurité lorsqu'il est stocké en vrac, et sa manipulation est quelque peu difficile.

L'hypochlorite de sodium est le biocide oxydant le plus couramment utilisé dans les grands systèmes à passage unique. Il peut être produit sur les sites côtiers par électrolyse de l'eau de mer. Ce procédé, appelé électrochloration, évite le transport et le stockage dangereux du chlore gazeux ou en solution.

La consommation d'hypochlorite de sodium comme chlore actif est généralement inférieure dans les systèmes à eau de mer que dans les systèmes à eau douce, du fait de la teneur supérieure en matières organiques particulières et dissoutes dans l'eau douce. Du fait de sa teneur plus élevée en bromure, la formation d'organohalogénés dans l'eau de mer est rapportée comme étant inférieure à celle dans l'eau douce (rivières), mais aucune publication ne pourrait le confirmer.

Tableau V.2 : Estimation des niveaux de consommation de certains biocides oxydants couramment utilisés dans quelques États membres européens (kg/an)

(KEMA, 1996)

Groupe	Biocides oxydants	Royaume-Uni (1993) ²	Pays-Bas (1995) ³	France (1998)
À base de chlore	Hypochlorite de sodium	731 000 ^{1,5}	1 800 000 ⁴	817 000 ⁶
	Dichloroisocyanurate de sodium	19 300		
	Dioxyde de chlore	13 000		
À base de brome	Bromure de sodium	356 000	22 500	
	1-bromo-3-chloro-5,5-diméthylhydantoin (BCDMH)	286 000	1 000	
Autre	Peroxyde d'hydrogène	910		
	Acide paracétique	975		
Remarques :				
15. Estimation de l'utilisation comme ingrédient actif (les quantités sont nettement plus importantes pour une préparation)				
16. Dans tous les systèmes de refroidissement humides				
17. Uniquement dans les systèmes à recirculation				
18. Mesuré en tant que Cl ₂				
19. Ce chiffre est une sous-estimation car l'électrochloration est davantage utilisée au Royaume-Uni dans la plupart des centrales électrique côtières				
20. Dans le Cl ₂ produit par électrochloration dans les centrales électriques à combustible fossile				

Cela est également valable pour les systèmes de refroidissement qui utilise de l'eau provenant de ports très pollués. Une chloration « faible » continue est souvent la solution préférée, même si une chloration discontinue ou semi continue est de plus en plus pratiquée. Cependant, cela nécessite un monitoring plus intensif du système et de l'eau de refroidissement.

Du chlore gazeux à la solution d'hypochlorite de sodium, l'espèce chimique la plus active est l'acide hypochloreux non dissocié. C'est un agent oxydant hautement réactif, qui réagit avec la plupart des substances organiques dans l'eau pour former le trihalométhane (THM), le chloroforme (3-5 %) et d'autres substances organiques chlorées. Le chlore libre peut également réagir avec de l'ammoniac pour produire des chloramines, ou avec différents composés organiques dissous formant différents types de composés organohalogénés (comme le THM et les chlorophénols). Cela a également lieu dans le système de refroidissement lui-même, et le chlore résiduel ne sera pas en mesure de réaliser sa tâche biocide tant que cette première demande en chlore n'est pas satisfaite.

L'utilisation de l'acide hypobromeux (biocide oxydant, HOBr) peut représenter une solution alternative à l'hypochlorite. L'acide hypobromeux reste indissocié à des valeurs de pH plus élevées par rapport à ce qui est valable pour l'acide hypochloreux. Cela suppose qu'à une valeur de pH égale ou supérieure à 8, l'oxydant libre HOBr soit un biocide plus efficace que l'ion hypochloreux dissocié OCl⁻. Conséquence : dans l'eau douce alcaline, le dosage efficace de l'hypobromite peut être largement inférieur à l'hypochlorite équivalent. Bien que les substances organiques bromées soient 2 à 3 fois plus toxiques que leurs équivalents chlorés, elles se décomposent plus rapidement, et elles peuvent représenter un avantage réel sur l'environnement étant donné leur plus faible demande. Cependant, dans l'eau de mer, l'oxydation des ions bromure par l'hypochlorite entraîne une formation rapide d'hypobromite, et la chloration de l'eau de mer est presque équivalente à la bromuration. L'option hypobromeuse peut présenter un léger avantage pour l'environnement par rapport à l'option hypochloreuse.

Le bromure et l'hypochlorite de sodium, le chloramine et le peroxyde sont utilisés ensemble dans les systèmes à recirculation, ce qui peut permettre également de générer moins de substances dangereuses pour l'environnement. Un inconvénient propre à ce traitement, c'est que pour les solutions à concentrations élevées en

oxydant libre (FO), du bromate carcinogène pourrait se former. Une autre source possible peut être l'ozonation des eaux naturelles par l'oxydation des ions bromure.

La teneur en bromate dépend de la concentration en bromure de l'eau salée utilisée pour produire l'hypochlorite de sodium. La concentration théorique maximale en bromate (BrO₃) dans les solutions d'hypochlorite de sodium produites par électrolyse de l'eau de mer s'élève à environ 100 mg/l ou 3 mg par gramme de chlore. Une large gamme de concentration de bromate est disponible dans les solutions d'hypochlorite du commerce. Si les eaux fortement concentrées en sel sont utilisées pour produire du chlore, il varie de 0,15 à 4 mg de BrO₃ par gramme de chlore.

V.4.4 Biocides non oxydants

Les biocides non oxydants sont des substances réactives relativement lentes, qui réagissent avec des composants spécifiques de la cellule ou des chemins réactifs dans la cellule. Les biocides non oxydants suivants sont couramment utilisés : le 2,2-dibromo-3-nitrilopropionamide (DBNPA), l'aldéhyde glutarique, les composés quaternaires d'ammonium (QAC), les isothiazolones, les bisphénols halogénés et les thiocarbamates. Cependant, de nombreux autres biocides non oxydants existent sur le marché, et la quantité et la fréquence d'utilisation de chaque biocide varie considérablement au sein de l'Europe. Le Tableau V.3 fournit une indication de la consommation de certains des biocides non oxydants.

L'application de biocides non oxydants au lieu de biocides oxydants est recommandé uniquement lorsque ces derniers ne sont pas en mesure de fournir une protection suffisante, par exemple dans les systèmes avec des charges organiques élevées, ou dans les systèmes de refroidissement humide à recirculation dans lesquels le contrôle quotidien n'est pas une pratique. Dans les systèmes humides à recirculation de grande capacité, dans lesquels l'hypochlorite de sodium est principalement utilisé, un contrôle constant est parfois appliqué pour garantir un niveau correct d'oxydants libres disponibles dans le circuit. Toutefois, pour beaucoup de systèmes de refroidissement humide à recirculation plus petits, ainsi que pour les systèmes gérés par des sociétés de gestion de l'eau qui ne disposent d'aucun personnel en permanence sur site, l'application de biocides non oxydants qui sont moins influencés par la qualité de l'eau est préférée aux biocides oxydants [tm005, Van Donk and Jenner, 1996].

Les biocides non oxydants sont principalement appliqués dans les systèmes de refroidissement évaporatifs ouverts à recirculation. En général, ils sont appliqués à l'eau de refroidissement afin de fournir des concentrations d'ingrédients actifs compris entre environ 0,5 ppm et 50 ppm (exceptionnellement 100 ppm).

Les biocides non oxydants agissent sur les micro-organismes par réaction avec des composants spécifiques de la cellule ou des chemins réactifs dans la cellule. La première réaction entraîne un dommage sur la membrane cellulaire et dans la réaction suivante, le dommage est causé au mécanisme biochimique de production d'énergie ou d'utilisation de l'énergie de la cellule.

Les composés quaternaires d'ammonium sont des molécules actives sur la surface cationique. Ils endommagent les membranes cellulaires des bactéries, champignons et algues, augmentant ainsi la perméabilité de la paroi cellulaire, ce qui entraîne la dénaturation des protéines, puis la mort de la cellule. Les isothiazolones sont non spécifiques et interviennent sur la synthèse de l'ATP dans la cellule. Parmi les autres biocides, le (bis)thiocyanate de méthylène (MBT) est largement utilisé contre les bactéries et les champignons. On pense que ce biocide se lie de façon irréversible aux biomolécules, évitant les réactions d'oxydation et de réduction nécessaires. Le glutaraldéhyde est utilisé contre les bactéries aérobiques et anaérobiques, et son activité biocide repose sur la réticulation des protéines.

Tableau V.3 : Estimation des niveaux de consommation de certains biocides non oxydants couramment utilisés dans quelques États membres européens (kg/an)

(KEMA, 1996)

Groupe	Biocides non oxydants	Royaume-Uni (1993) ²	Pays-Bas (1995) ³	France (1998)
QAC	Diméthyl coco benzyl Chlorure d'ammonium	23 400 ¹		
	Composés d'alkyl-benzyl-ammonium	21400		
	Estimation du QAC total	71 152		
Isothiazolines	5-chloro-2-méthyl-4-isothiazoline-3-un	13 200		
	Isothiazolines totales	18 000	1 500	
	Bisphénols halogénés (dichlorophène+fentichlore)	12 150		
	Thiocarbamates	56 800		
Autres	Glutaraldéhyde	56 400	750	
	Chlorure de tétra-alkylphosphonium	9 500		
	2,2-dibromo-3-nitropropionamide	17 200	800	
	(Bis)thiocyanate de méthylène (MBT)	2 270	1 450	
	β-bromo-β-nitrostyrène (BNS)	231	1 950	
	Amines grasses			200 004
	Autres	4 412		
Total estimé	234 963	6 450		
Remarques :				
21. Estimation de l'utilisation comme ingrédient actif (les quantités sont nettement plus importantes pour une préparation)				
22. Dans tous les systèmes de refroidissement				
23. Uniquement dans les systèmes à recirculation				
24. Produit actif utilisé dans une centrale électrique à combustible fossile				

V.4.5 Facteurs déterminant l'utilisation de biocides

[tm005, Van Donk and Jenner, 1996]

Les facteurs suivants sont orientés sur l'utilisation des biocides, mais ils pourraient également être appliqués à l'utilisation d'autres additifs.

- Efficacité

À l'évidence, un biocide doit être efficace dans la situation spécifique où il est utilisé. Cependant, il est important de réaliser qu'un biocide (ou un programme de traitement de l'eau de refroidissement) qui est efficace dans un système, peut ne pas l'être dans un autre, même si ces systèmes sont apparemment identiques. L'une des raisons peut-être le développement d'une population de micro-organismes résistante ou tolérante. Cela représente moins un risque pour les biocides oxydants que pour les biocides non oxydants.

- Type de système

Le type de système détermine la demi-vie hydraulique de l'eau de refroidissement dans les systèmes de refroidissement par voie humide et ainsi, la durée de contact entre le biocide et l'eau de refroidissement. Dans les systèmes de refroidissement humide à passage unique, dans lesquels les temps de résidence sont courts, des biocides oxydants à réaction rapide sont généralement utilisés. Désormais, si les biocides sont utilisés dans des systèmes à passage unique aux Pays-Bas, l'hypochlorite de sodium est appliqué. À l'heure actuelle, les biocides non oxydants à réaction plus lente sont uniquement utilisés dans des systèmes de refroidissement humide à recirculation. La majorité (> 90 %) des systèmes de refroidissement humide à recirculation est traitée avec du NaOCl, Cl₂, ClO₂ ou NaOCl/NaBr.

Le type de process est un facteur essentiel dans le choix d'un biocide, en particulier si l'on considère la réactivité de certains biocides avec des fluides de process qui se seraient déversés dans l'eau de refroidissement. Certains

process, comme le refroidissement direct du métal dans l'industrie métallique, créent des conditions particulières dans l'eau de refroidissement. Les fluides de process qui se répandent dans l'eau de refroidissement peuvent servir de nutriments à la prolifération biologique.

- Qualité de l'eau

La qualité chimique et biologique de l'eau influence le choix d'un programme de traitement de l'eau de refroidissement et par conséquent, le choix d'un biocide. L'apparition d'organismes de macro-encrassement est fortement liée à la qualité de l'eau. D'une manière générale, une amélioration de la qualité de l'eau de surface d'un point de vue biologique peut entraîner une augmentation de l'apparition du macro-encrassement dans les systèmes de refroidissement par voie humide.

Pour les micro-organismes, le type d'eau ne joue pas un rôle majeur dans la détermination des types d'organismes rencontrés. En théorie, une valeur de pH proche de 7 est optimale pour la prolifération microbienne. Les conditions acides favoriseront la prolifération des champignons, et les valeurs de pH supérieures à 8 réduiront la prolifération des algues. Cependant, dans la pratique, les micro-organismes s'adaptent très facilement et peuvent coloniser de nombreux systèmes différents. Cela est illustré par la croyance répandue selon laquelle les champignons préfèrent les milieux acides aux milieux neutres pour proliférer, et qu'ils seront remplacés par des bactéries dans un système alcalin. Cela est fondamentalement correct, mais si un tel système est traité avec un bactéricide sans aucune activité antifongique, la contamination avec des spores fongiques favorise souvent la colonisation du système même à une valeur de pH de 9.

Dans les systèmes à passage unique, la valeur du pH dans le système de refroidissement est égale à celle de l'eau entraînée même si le dosage de l'hypochlorite de sodium peut légèrement augmenter la valeur du pH, mais cela est souvent impossible à mesurer. Dans les systèmes ouverts évaporatifs à recirculation, la valeur du pH est souvent contrôlée (généralement comprise entre 7 et 9) par l'ajout d'acides (généralement de l'acide sulfurique), ou d'une base (généralement de l'hydroxyde de sodium) ou par l'alcalinité naturelle du cycle.

Pour l'application de l'hypochlorite de sodium et de l'hypobromite de sodium comme biocides, on sait que la valeur du pH influence fortement l'équilibre entre l'acide hypohalogéneux et l'ion hypohalite. Les acides hypohalogéneux sont environ cent fois plus toxiques que leur forme anionique. Par conséquent, dans la théorie, la valeur du pH influencera la toxicité, par exemple celle de la dose d'hypochlorite.

Dans la pratique, la valeur du pH ne peut pas être influencée dans les **systèmes à passage unique**. Les systèmes à passage unique à eau douce utilisent généralement de l'eau de refroidissement dont le pH s'élève à 7-8. Les systèmes de refroidissement à l'eau de mer fonctionnent à une valeur de pH d'environ 8. L'équilibre mentionné ci-dessus est donc le plus pertinent pour assurer l'efficacité du traitement dans les systèmes à passage unique, car le temps de résidence de l'eau de refroidissement (et donc la durée de contact du biocide avec les organismes) dans le système de refroidissement est relativement court.

Les systèmes par voie humide à recirculation fonctionnent généralement à une valeur de pH comprise entre 7 et 9. L'expérience dans l'industrie chimique a montré qu'un système à recirculation fonctionnant à une valeur de pH égale à 9 utilise moins d'hypochlorite qu'un système fonctionnant à une valeur de pH inférieure, sans aucune perte d'efficacité pour le traitement. Le sort de l'hypochlorite dans les systèmes à recirculation a été largement étudié. Conclusion principale : 5 à 10 % de l'hypochlorite dosé est perdu dans la tour lors du fonctionnement à une valeur de pH égale à 8,5, alors qu'à une valeur de pH inférieure à 7, cette perte s'élève à 30-40 %.

L'explication de ce phénomène réside dans le fait que l'anion hypochlorite ne peut pas être retiré de la tour de refroidissement, à la différence de l'acide hypohalogéneux. Conclusion : le dosage d'hypochlorite à une valeur de pH égale à 9 est aussi efficace malgré le fait que seulement 1 à 5 % soit présent sous une forme acide, car l'acide hypohalogéneux consommé sera instantanément réapprovisionné à partir du surplus présent sous forme anionique. La conclusion globale est donc que les systèmes à recirculation fonctionnant à une valeur de pH élevée réduiront la quantité d'hypochlorite nécessaire au contrôle efficace du micro-encrassement.

La température de la surface influence la prolifération de la biologie marine et peut donc être utilisée comme facteur pour sélectionner un programme de traitement dans les **systèmes de refroidissement à passage unique**. Le macro-encrassement dans les systèmes à passage unique néerlandais ne se développera pas rapidement pendant les mois d'hiver. Par conséquent, il est inutile de doser les biocides lorsque les températures de l'eau sont inférieures à 12 °C. Les industries dotées de systèmes à passage unique sur la côte méditerranéenne, dans lesquelles le développement du macro-encrassement et la fixation du naissain se produisent douze mois par an, dosent les biocides oxydants tout au long de l'année. En général, la température de l'eau influencera considérablement la variabilité des espèces, le taux de prolifération et la demande en biocides. Dans les systèmes

à passage unique, la température de l'eau ajoutée à l'eau brute (ΔT) est comprise entre 8 et 12 °C, et limitée par une température de déversement maximale. La même restriction se présente aux systèmes à recirculation au niveau du point de déversement même si parfois, des températures de déversement supérieures sont autorisées. Les températures de l'eau brute de recirculation peuvent être comprises entre 20 et 30 °C, voire plus. La plupart des espèces du macro-encrassement aux Pays-Bas ne tolèrent aucune exposition à long terme à des températures de 30 °C, mais certaines espèces, comme la moule en eau saumâtre, prolifèrent très rapidement à ces températures.

Pour les **systèmes à recirculation** avec des facteurs de concentration élevés, la dureté de l'eau d'appoint et la quantité de matières organiques prélevée sont d'une extrême importance, car elles auront des conséquences sur la quantité d'inhibiteurs de tartre et de corrosion nécessaires. Pour les systèmes à recirculation et pour les systèmes à passage unique, la quantité de matières organiques dans l'eau de refroidissement (solides dissous, solides en suspension) est fondamentale car elle influence la demande en biocides. L'ampleur de son influence sur les biocides varie (par exemple, l'hypochlorite réagira avec l'ammoniac, mais pas le dioxyde de chlore). En général, il est recommandé de réduire au minimum toutes les substances qui provoquent une augmentation de la demande en biocides.

V.4.6 Interactions avec d'autres produits chimiques de traitement de l'eau

D'autres additifs, comme les inhibiteurs de corrosion et de tartre, peuvent également influencer le choix d'un biocide adapté. Certains biocides limitent leur efficacité respective, mais ils peuvent également représenter un avantage réciproque. Par exemple :

- Les QAC sont connus pour être en partie neutralisés par les biocides oxydants et par les agents dispersants anioniques.
- Les isothiazolones sont quant à eux stabilisés par l'hypochlorite de sodium.
- L'ozone est un oxydant tellement puissant qu'il oxydera presque tous les autres additifs de l'eau de refroidissement, ce qui est un problème en particulier pour les inhibiteurs de corrosion qui doivent souvent être appliqués, dans une certaine mesure, de façon adjacente à l'application de l'ozone afin de protéger l'équipement.

V.5 Cycles de concentration et bilan hydrique

L'application d'additifs dans les tours de refroidissement par évaporation ouvertes est complexe et largement liée au bilan hydrique et aux cycles de concentration qui caractérisent le fonctionnement du système. La déconcentration est une mesure essentielle permettant de corriger la concentration en solides, et elle joue un rôle majeur dans l'optimisation des performances des systèmes de refroidissement et des traitements de l'eau. Une brève explication du principe de la déconcentration est fournie ci-dessous dans la Figure V.1.

Une quantité d'eau de refroidissement (Q_c) circule dans le système en m^3 par minute. Une fois l'échangeur de chaleur passé, l'eau de refroidissement est refroidie dans la tour de refroidissement par évaporation et par convection. L'évaporation (E), les pertes par entraînement vésiculaire et par dérive et quelques fuites réduisent la quantité d'eau de refroidissement et, par conséquent, la concentration en sels dans l'eau augmente, ce qui peut entraîner l'apparition de tartre et de corrosion.

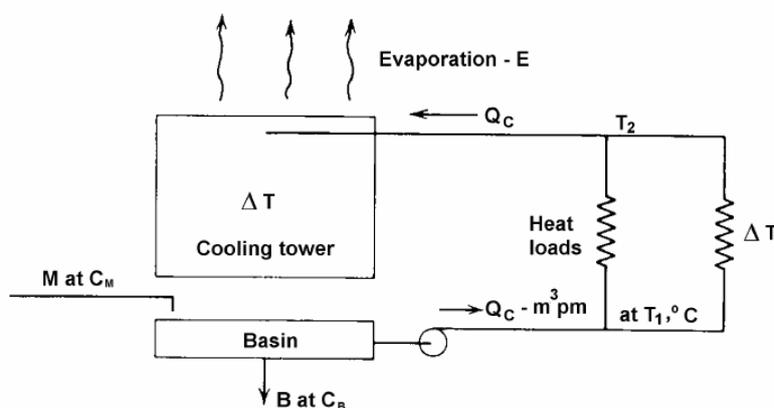


Figure V.1 : Bilans massiques dans un système de refroidissement par évaporation utilisant une tour de refroidissement

[tm135, Anonyme, 1988]

Cette augmentation est équilibrée par une purge du système, un procédé appelé « purge de déconcentration » (B avec une concentration C_B), et compensée par l'ajout d'eau appelée « eau d'appoint » (M avec une concentration C_M). Puisque le bilan du système doit être équilibré, on utilise le facteur de concentration (FC) : $FC = M/B = C_B/C_M$ (car $M \times C_M = B \times C_B$).

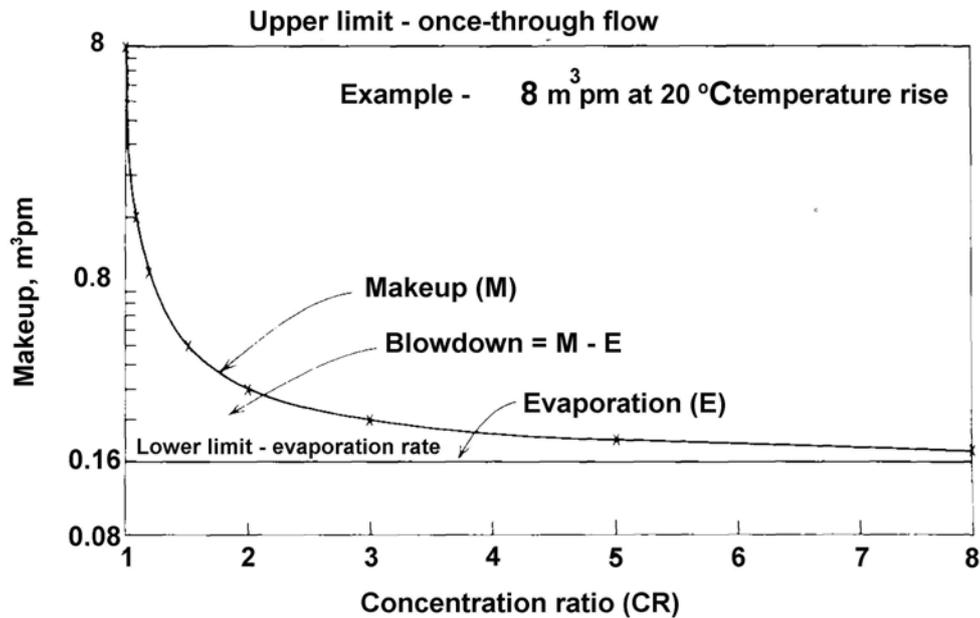


Figure V.2 : Réduction du débit d'eau d'appoint par concentration dans un système de refroidissement par évaporation

[tm135, Nalco, 1988]

$M = E + B$, donc $FC = (E + B)/B = E/B + 1$ et de cette équation, on obtient :

$$B = E / (CR - 1)$$

Cette équation est très utile dans le traitement de l'eau de refroidissement. Une fois que les cycles de concentration ont été déterminés en fonction des concentrations de l'eau d'appoint et des purges de déconcentration, la déconcentration réelle du système ou la déconcentration nécessaire pour maintenir le système à un nombre souhaité de cycles, peut être calculée.

ANNEXE VI EXEMPLE DE LÉGISLATION DANS LES ÉTATS MEMBRES DE L'EUROPE

Le texte suivant a intégralement été ajouté afin de fournir un exemple de législation qui a été appliquée avec succès en Europe dans le cadre de la réduction des émissions des systèmes de refroidissement.

Règlement administratif général du 31 janvier 1994

sur l'amendement du règlement-cadre administratif général sur

les exigences minimales en matière de rejet d'eau résiduelle dans les eaux

(actuellement, août 2000, en cours de révision)

Extrait de

l'Annexe 31 : Traitement de l'eau, systèmes de refroidissement, génération de vapeur

1. Périmètre

1.1 Eau résiduelle dans laquelle la charge polluante provient principalement du traitement de l'eau issue des systèmes de refroidissement des procédés industriels.

2 Exigences

Les exigences suivantes en matière de rejet de l'eau résiduelle doivent être respectées. Les exigences liées à la demande chimique en oxygène, en azote comme somme d'ammonium, de nitrite et d'azote des nitrates, en composés phosphorés inorganiques et en substances filtrables reposent sur des règles techniques généralement reconnues, et les exigences restantes sur la meilleure technologie disponible.

Ces exigences ne doivent pas s'appliquer aux rejets d'eau résiduelle inférieurs à 0,5 m³ par jour.

2.1 Exigences générales

L'eau résiduelle ne doit pas contenir (à l'exception des phosphonates et des polycarboxylates) des agents complexant organiques qui ne sont pas facilement biodégradables conformément aux exigences du niveau de base de la loi sur les produits chimiques visant à déterminer la biodégradabilité au moyen des Directives de l'OCDE 301 A-301 E de mai 1981.

L'eau résiduelle ne doit contenir aucun composé de chrome ou de mercure, de nitrite, de composés organométalliques (liaisons carbone-métal) ou de mercaptobenzothiazole provenant de l'utilisation des ressources d'exploitation et auxiliaires.

Les exigences de ce premier et ce deuxième paragraphes sont réputées conformes si les substances spécifiées ne sont pas utilisées, si toutes les ressources d'exploitation et auxiliaires sont répertoriées dans un journal d'exploitation et si les informations du fabricant sont disponibles et indiquent que ces substances ne sont ni présentes dans les ressources d'exploitation et auxiliaires, ni en mesure de se former sous de telles conditions de fonctionnement.

2.3 Exigences en matière de rejet d'eau des systèmes de refroidissement.

2.3.1 Eau des systèmes de refroidissement à un passage unique ou des systèmes de refroidissement à eau douce à extrémité ouverte

Les exigences après un traitement de choc par des substances microbicides doivent se présenter comme suit :

	Échantillon aléatoire qualifié ou échantillon composite sur 2 heures (mg/l)
Bioxyde de chlore, chlore et brome (exprimés comme équivalents du chlore)	0,2
Composés organohalogénés adsorbables (AOX)	0,15

Les substances microbicides autres que le peroxyde d'hydrogène et l'ozone ne doivent pas être présente dans l'eau résiduelle. Ces exigences sont réputées conformes si ces substances ne sont pas utilisées, si toutes les ressources d'exploitation et auxiliaires sont répertoriées dans un journal d'exploitation et si les informations du fabricant sont disponibles, indiquant que ces substances ne sont pas présentes dans les ressources d'exploitation et auxiliaires.

2.3.2 Eau issue du rejet des circuits de refroidissement primaires dans les centrales électriques (eau d'entraînement des systèmes de refroidissement à recirculation)

	Échantillon aléatoire (mg/l)
Demande chimique en oxygène (DCO)	30
Composés phosphorés en tant que phosphore, total ²⁾ <i>Si seuls les composés phosphorés inorganiques sont utilisés, la valeur du paramètre phosphore est augmenté et passe à 3 mg/l.</i>	1,5

Les exigences après un traitement de choc par des substances microbicides doivent se présenter comme suit :

	Échantillon aléatoire (mg/l)
Composés organohalogénés adsorbables (AOX)	0,15
Bioxyde de chlore, chlore et brome (exprimés comme équivalents du chlore)	0,3
Toxicité aux bactéries luminescentes T _B	12

La toxicité aux bactéries luminescentes est également réputée conforme si le circuit d'évacuation est maintenu fermé jusqu'à ce qu'une valeur T_B de 12 ou moins est atteinte conformément aux informations du fabricant sur les concentrations à l'entrée et sur le comportement de biodégradation, appuyés par un journal d'exploitation.

L'eau résiduelle ne doit contenir aucun composé du zinc provenant des agents de conditionnement de l'eau de refroidissement. Cette exigence est réputée respectée si toutes les ressources d'exploitation et auxiliaires sont répertoriées dans un journal d'exploitation et si les informations du fabricant sont disponibles, indiquant que les agents de conditionnement de l'eau de refroidissement utilisés ne contiennent aucun composé de zinc.

2.3.3 Eau résiduelle issue du rejet des autres circuits de refroidissement

	Échantillon aléatoire (mg/l)
Demande chimique en oxygène (DCO) <i>La valeur du paramètre DCO est augmentée pour passer à 80 mg/l après un nettoyage avec des agents dispersants.</i>	40
Composés phosphorés en tant que phosphore, total ²⁾ <i>La valeur du paramètre phosphore est augmentée pour passer à 4 mg/l si seuls les agents de conditionnement de l'eau de refroidissement sans zinc sont utilisés. Elle est augmentée pour passer à 5 mg/l si seuls les agents de conditionnement sans zinc contiennent uniquement des composés phosphorés inorganiques.</i>	3
Zinc	4
Composés organohalogénés adsorbables (AOX)	0,15

Les exigences après un traitement de choc par des substances microbicides doivent se présenter comme suit :

	Échantillon aléatoire (g/l)
Bioxyde de chlore, chlore et brome (exprimés comme équivalents du chlore)	0,3
Composés organohalogénés adsorbables (AOX)	0,5
Toxicité aux bactéries luminescentes T _B	12

La toxicité aux bactéries luminescentes doit également être réputée conforme si le circuit d'évacuation est maintenu fermé jusqu'à ce qu'une valeur T_B de 12 ou moins est atteinte conformément aux informations du fabricant sur les concentrations à l'entrée et sur le comportement de biodégradation, appuyés par un journal d'exploitation.

2.5 Dans le cas des étangs de retenue, toutes les valeurs doivent concerner l'échantillon aléatoire. Ici, les valeurs concernent la qualité de l'eau avant la déconcentration.

La conformité aux exigences du point 2.3 concernant le paramètre DCO peut également être vérifiée en déterminant le carbone organique total (COT). Dans ce cas, la valeur DCO doit être remplacée par trois fois la valeur COT, définie en milligrammes par litre.

²⁾ Détermination dans l'échantillon d'origine conformément à la norme DIN 38406 - E22 (édition de mars 1988) ou une procédure d'analyse et de mesure équivalente.

ANNEXE VII EXEMPLE D'UN CONCEPT DE SÉCURITÉ POUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT HUMIDE OUVERTS (PRINCIPE DE LA VCI)

VII.1 Introduction au concept

Ce concept de sécurité a été défini afin de fournir une assistance en matière de protection des eaux issues du rejet temporaire, via l'eau de refroidissement, de substances (du process) qui sont à l'origine de nuisances durables dans les plans d'eau. Ce concept spécifie les mesures de contrôle et de transition, liées aux systèmes de refroidissement à passage unique et aux systèmes alternatifs, comme une fonction de la persistance de la pollution de l'eau par les substances pouvant être rejetées dans l'eau de refroidissement.

La capacité d'une substance à provoquer des modifications néfastes sur le long terme ou à présenter un danger pour un plan d'eau peut être définie sur la base de phrases de risques (phrases R) établies par la réglementation européenne sur les substances dangereuses. Un score est attribué, comme le montre le tableau ci-dessous, à chacune des phrases R relatives aux éléments protégés de l'environnement aquatique ainsi qu'au sol et à la santé humaine. Les scores de toutes les phrases R attribués à la substance concernée sont ajoutés afin d'obtenir le total. Ce total est ensuite lié à la mesure de sécurité requise concernant l'eau de refroidissement polluée. Les décisions concernant la mise en œuvre de ces mesures et de la technologie appliquée peuvent, bien entendu, être prises uniquement dans les entreprises concernées et avec une connaissance des circonstances particulières.

Il sera recommandé d'appliquer immédiatement ce concept aux nouvelles installations et de modifier les systèmes de refroidissement existants s'ils ne respectent pas ces exigences dans un délai de :

- 5 ans pour les substances avec un total ≥ 9
- 8 ans pour les substances avec un total compris entre 0 et 8

Pour les substances avec un total ≥ 5 , des mesures en matière de contrôle des systèmes de refroidissement à passage unique devraient être initiées immédiatement, prenant en considération les exigences propres à chaque cas.

Les exigences de ce concept de sécurité concernent tous les débits d'eau de refroidissement qui ne sont pas liés aux installations de purification industrielle ou à une installation de purification appropriée. Les exigences concernant les substances avec un total ≤ 4 ne concernent pas les rejets indirects qui sont réalisés dans une installation de traitement des boues.

Tableau VII.1 : Scores pour plusieurs phrases R permettant de calculer le total des substances du process

Score	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Écotoxicité et dégradation/ bio-accumulation				52/53		51/53		50/53	
Écotoxicité et/ou dégradation/ bio-accumulation n.e.d.				* 3)		* 2)		* 1)	
Écotoxicité			52			50			
Écotoxicité n.e.d.						*			
dégradation/ bio-accumulation			53						
dégradation et/ou bio-accumulation n.e.d.			*						
Toxicité aiguë chez les mammifères (toxicité orale aiguë préférée)	22 20/22 21/22 20/21/22 21 20/21 65		25 23/25 24/25 23/24/25 24 23/24			28 26/28 27/28 26/27/28 27 26/27			
Toxicité aiguë chez les mammifères n.e.d.					*				
Carcinogénicité et/ou mutagénicité		40							45 et/ou 46
Effet irréversible		40/21 40/22 40/20/22 40/21/22 40/20/21/22		39 39/24 39/25 39/23/25 39/24/25 39/23/24/25		39/27 39/28 39/26/28 39/27/28 39/26/27/28			
Exposition récurrente		33 48 48/21 48/22 48/20/22 48/21/22 48/20/21/22		48/24 48/25 48/23/25 48/24/25 48/23/24/25					
Toxicité pour la reproduction		62 et/ou 63		60 et/ou 61					
Réaction dangereuse avec de l'eau			29 15/29						

Légende du tableau :

n.e.d. = attributs non encore déterminés (testés ou connus)

* = score, si un ou plusieurs des attributs, « l'écotoxicité », « la dégradation/bioaccumulation » et « la toxicité aiguë », n'ont pas été testées ou sont inconnues.

Note 1) - Écotoxicité et dégradation et/ou bioaccumulation n.e.d., ou écotoxicité n.e.d. et une simple dégradation non prouvée ou

- Écotoxicité n.e.d. et potentiel de bioaccumulation disponible ou classé en tant que R 50 et dégradation et/ou bioaccumulation n.e.d.

Note 2) - Écotoxicité > 1 et ≤ 10 mg/l et dégradation et/ou bioaccumulation n.e.d.

Note 3) - Écotoxicité > 10 et ≤ 100 mg/l et dégradation et dégradation n.e.d.

Note 4) - Reportez-vous à l'Annexe 2 pour obtenir une description des marqueurs R

VII.2 Exigences du concept

Les exigences imposées à la technologie de refroidissement sont déterminées par le total de points respectivement le plus élevé de ces substances de process qui peuvent pénétrer dans l'eau de refroidissement. Ces exigences sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau VII.2 : Exigences du principe de sécurité VCI pour la technologie de refroidissement

Score : 0 point	Score : 1-4 points	Score : 5-8 points	Score : ≥ 9 points
(D1 + A1)	(D1 + A1 + U1)	(D1 + A2 + U1) (D2 + A1 + U1)	(D3 + A2 + U1) / (D2 + A2 + U2) / (Z) (E) / (K) / (L) / (S)
... autres options			

D1, A1 et U1 peuvent toujours être remplacés par des mesures supérieures D2 (ou D3), A2 et U2.

Les codes du tableau se présentent comme suit :

- DI Système de refroidissement à passage unique ;
- D2 Système de refroidissement à passage unique doté d'une pression d'eau de refroidissement qui est clairement maintenue et contrôlée au-dessus de la pression de process (la pression de l'eau de refroidissement ne devrait pas être inférieure à la pression de process, quel que soit l'endroit du système de refroidissement, mais pas non plus par des procédés hydrauliques) ;
- D3 Système de refroidissement à passage unique doté d'un refroidisseur fabriqué avec un matériau anticorrosion de grande qualité et d'une maintenance régulière ;
- Z Stockage intermédiaire avec contrôle analytique avant tout rejet ;
- E Refroidissement via des circuits primaires/secondaire (découplage) ;
- K Refroidissement à circulation via des systèmes de refroidissement de retour ;
- L Système de refroidissement par air ;
- S Système de refroidissement spécifique (exemples : pompes à chaleur, installations frigorifiques d'absorption, systèmes de compression de vapeur, transformateurs thermiques) ;
- A1 Contrôle analytique ou autre de l'eau de refroidissement ;
- A2 Contrôle analytique automatique de l'eau de refroidissement (en fonction de l'annexe) ;
- U1 Transition immédiate du rejet d'eau de refroidissement dans les installations de retenue ou de purification, sous réserve que cette installation soit adaptée à la substance libérée, ou transition immédiate vers le système de refroidissement de réserve, ou arrêt de la partie de l'installation de production concernée ;
- U2 Transition automatique du rejet d'eau de refroidissement dans les installations de retenue ou de purification, sous réserve que cette installation soit adaptée au rejet de la substance libérée, ou transition automatique dans le système de refroidissement de réserve, ou arrêt de la partie de l'installation de production concernée.

VII.3 Annexe 1 - Contrôle analytique automatique des systèmes de refroidissement à passage unique

Les systèmes analytiques automatiques sont adaptés au contrôle des systèmes de refroidissement à passage unique si une fuite peut être déterminée avec une sécurité et une rapidité suffisantes. Ainsi, il suffit que le système analytique fournisse des tendances. La mesure des concentrations absolues n'est pas nécessaire pour de tels systèmes, mais simplement la détection des écarts par rapport aux états normaux.

La mesure peut être directement prise par des capteurs situés dans le flux d'eau de refroidissement, ou via un échantillonnage automatique semi continu à l'extérieur du flux d'eau de refroidissement.

Pour les paramètres et les méthodes analytiques suivants, l'équipement approprié au contrôle automatique des systèmes de refroidissement à passage unique, tel que décrit ci-dessus, est présent sur le marché. Concernant le choix de l'équipement pour cette fonction, la fiabilité du système est généralement plus importante que l'augmentation des demandes sur sa précision.

Le choix d'un système approprié est déterminé par la ou les substances libérées, relatives à une fuite. De plus, il est fortement dépendant des circonstances spécifiques à chaque cas. Dans ce cadre, il devrait d'abord être vérifié que le contrôle analytique automatique peut être effectué à l'aide d'un paramètre ou d'une méthode analytique décrite dans la Liste 1 ci-dessous. Si cela s'avère impossible, l'utilisation de systèmes conformément à la Liste 2 doit être vérifiée.

Liste 1 : - valeur du pH
- conductivité
- potentiel redox
- turbidité
- réfractométrie

- photométrie
- équipement d'avertissement du niveau de carburant
- équipement d'avertissement du niveau de mousse
- contrôles du mercure

Liste 2 : - CT (carbone total)
- Carbone organique total (COT)
- Carbone organique dissous (COD)
- substances purgeables par le biais de la DIF (détection à ionisation de flamme)
- combinaison de COT/DIF
- Composés organiques chlorés purgeables
- Toximètres bactériens

VII.4 Annexe 2 – Phrases R utilisées pour calculer le score de la VCI

Tableau VII.3 : Description des phrases R utilisées pour calculer le score de la VCI dans le cadre du choix de systèmes de refroidissement

R 20/21	Nocif par inhalation et par contact avec la peau.
R 20/21/22	Nocif par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 20/22	Nocif par inhalation et si avalé.
R 21	Nocif par contact avec la peau.
R 21/22	Nocif par contact avec la peau et si avalé.
R 22	Nocif si avalé.
R 23/24	Toxique par inhalation et par contact avec la peau.
R 23/24/25	Toxique par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 23/25	Toxique par inhalation et si avalé.
R 24	Toxique par contact avec la peau.
R 24/25	Toxique par contact avec la peau et si avalé.
R 25	Toxique si avalé.
R 26/27	Très toxique par inhalation et par contact avec la peau.
R 26/27/28	Très toxique par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 26/28	Très toxique par inhalation et si avalé.
R 27	Très toxique par contact avec la peau.
R 27/28	Très toxique par contact avec la peau et si avalé.
R 28	Très toxique si avalé.
R 29	Un contact avec de l'eau libère un gaz toxique.
R 33	Risque d'effets cumulatifs.
R 39	Risque d'effets irréversibles très graves.
R 39/24	Risque d'effets irréversibles très graves par contact avec la peau.
R 39/25	Risque d'effets irréversibles très graves si avalé.
R 39/23/25	Risque d'effets irréversibles très graves si par inhalation et si avalé.
R 39/24/25	Risque d'effets irréversibles très graves par contact avec la peau et si avalé.
R 39/23/24/25	Risque d'effets irréversibles très graves par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 39/27	Risque d'effets irréversibles très graves par contact avec la peau.
R 39/28	Risque d'effets irréversibles très graves si avalé.
R 39/26/28	Risque d'effets irréversibles très graves si par inhalation et si avalé.
R 39/27/28	Risque d'effets irréversibles très graves par contact avec la peau et si avalé.
R 39/26/27/28	Risque d'effets irréversibles très graves par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 40	Risques possibles d'effets irréversibles.
R 40/21	Nocif : risques possibles d'effets irréversibles par contact avec la peau.
R 40/22	Nocif : risques possibles d'effets irréversibles si avalé.
R 40/20/22	Nocif : risques possibles d'effets irréversibles par inhalation et si avalé.
R 40/21/22	Risque possible d'effets irréversibles nocifs par contact avec la peau et si avalé.
R 40/20/21/22	Risque possible d'effets irréversibles nocifs par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 44	Risque d'explosion si chauffé dans une condition de confinement.
R 45	Peut provoquer un cancer.

R 48	Risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée.
R 48/21	Nocif : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée et par contact avec la peau.
R 48/22	Nocif : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée et si avalé.
R 48/20/22	Nocif : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée, par inhalation et si avalé.
R 48/21/22	Nocif : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée, par contact avec la peau et si avalé.
R 48/20/21/22	Nocif : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée, par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 48/24	Toxique : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée et par contact avec la peau.
R 48/25	Toxique : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée et si avalé.
R 48/23/25	Toxique : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée, par inhalation et si avalé.
R 48/24/25	Toxique : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée, par contact avec la peau et si avalé.
R 48/23/24/25	Toxique : risque d'effets néfastes graves sur la santé par exposition prolongée, par inhalation, par contact avec la peau et si avalé.
R 50	Très toxique pour les organismes aquatiques.
R 51	Toxique pour les organismes aquatiques.
R 52	Nocif pour les organismes aquatiques.
R 53	Peut provoquer des effets négatifs sur le long terme dans l'environnement aquatique.
R 60	Peut diminuer la fécondité.
R 61	Peut avoir des effets négatifs sur le fœtus.
R 62	Risque possible de diminution de la fécondité.
R 63	Risque possible d'effets négatifs sur le fœtus.
R 65	Nocif : Peut provoquer des lésions pulmonaires si avalé.
R 15/29	Un contact avec de l'eau libère un gaz toxique et hautement inflammable.

ANNEXE VIII EXEMPLES D'ÉVALUATION DES PRODUITS CHIMIQUES POUR L'EAU DE REFROIDISSEMENT

VIII.1 Concept d'évaluation comparative pour les produits chimiques de l'eau de refroidissement

VIII.1.1 Introduction

Généralités

Il est bien établi que le BREF sur le refroidissement est « horizontale » par nature, et qu'il est impossible d'identifier un « système de refroidissement MTD » en tant que tel car de nombreuses paramètres dépendent du processus spécifique à refroidir, ainsi que de sa situation (en particulier le climat, l'alimentation en eau, etc.).

C'est pour cette raison que l'approche à adopter dans le BREF doit consister à fournir des « outils » permettant d'aider les autorités des États membres à rationaliser les options qui sont disponibles, et à sélectionner une solution de refroidissement optimale (à la fois en termes d'équipement et « de conditions d'exploitation ») qui représentera la MTD pour l'autorisation IPPC.

Tout d'abord, concernant « l'équipement de l'installation », ces sélections seront effectuées lors de la conception des nouveaux systèmes, mais également dans le cadre des évolutions ou des retrofits des systèmes existants.

Deuxièmement, les « conditions d'exploitation », qui sont appliquées à la fois dans les systèmes nouveaux et existants, ont été distinguées afin de faire l'objet de discussions. Un élément-clé de ces « conditions » concerne l'optimisation du système de refroidissement en termes de rendement et de longévité de l'installation par l'utilisation de produits chimiques. Les décisions d'optimisation basées sur les MTD devront être prises par rapport aux types et quantités de produits chimiques qui seront utilisés, à des fins d'autorisation.

Une approche a été développée au sein du groupe technique sur une simple méthode de « benchmarking » afin d'aider les États membres à comparer différents produits chimiques sur la base de leurs éventuelles conséquences sur l'environnement. Sans cet outil, la complexité d'une telle prise de décisions pourrait représenter un obstacle sérieux pour la détermination des MTD d'une façon rationnelle au niveau local.

Comme cela sera décrit ci-dessous, la plupart des éléments principaux relatifs à la définition de cet outil de benchmarking basé sur les risques est déjà présente dans la réglementation communautaire et ses supports officiels. La présente approche cherche à rassembler des éléments issus de : la Directive IPPC, la Directive Cadre sur l'eau et la réglementation sur l'évaluation des risques et le « document d'orientation technique » d'une manière cohérente, afin de fournir un outil permettant d'évaluer les produits chimiques utilisés dans l'eau de refroidissement.

VIII.1.1.1 Contexte

Dès ses toutes premières réunions, le groupe technique a convenu par consensus que toute évaluation des produits chimiques de l'eau de refroidissement devrait impliquer les propriétés intrinsèques et les caractéristiques de la situation locale (*approche basée sur les risques*).

Le concept qui s'ensuit d'évaluation par benchmarking est le résultat d'une prise en compte des projets et des méthodologies d'évaluation existants, et cherche à fournir un point de départ pour traiter correctement les propriétés intrinsèques et la situation au niveau local dans l'évaluation des différents régimes de traitement possibles.

Le concept d'évaluation n'entre pas dans un débat sur l'approche des dangers intrinsèques, mais se concentre sur la tâche visant à expliquer et clarifier la procédure de benchmarking (classement relatif).

Il est principalement axé sur chaque substance, fournissant des indications brèves sur la façon dont la méthode pourrait être étendue aux traitements chimiques complets multi-substances.

De plus, seul le cas le plus complexe (et le plus fréquent) des systèmes ouverts à recirculation (systèmes de refroidissement dotés d'une tour de refroidissement par évaporation) est abordé, avec la possibilité d'une extension ultérieure pour les systèmes à passage unique, les systèmes fermés etc.

VIII.1.1.2 Contexte législatif correspondant

Il est inutile d'évoquer ici en détail les exigences législatives à l'origine du développement des documents de référence des MTD. Il suffit de mentionner l'Article 16.2 de la Directive IPPC sur l'échange d'informations, ainsi que l'initiative de la Commission de développer, grâce à l'institution d'un Forum d'échange d'informations, un outil qui devrait permettre d'aider et de guider les autorités des États membres dans la définition des valeurs limites d'émissions (VLE) pour les installations classées IPPC.

Cependant, il est important de souligner l'un des principaux aspects de la Directive : le contrôle des émissions et de leur impact sur l'environnement par une méthode de MTD « combinée » a défini des valeurs limites d'émissions à contrôler par rapport aux normes de qualité environnementale.

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE), qui sera bientôt adoptée, est fortement impliquée également.

Même si une évaluation correcte des traitements chimiques utilisés dans les systèmes de refroidissement devrait être soumise à une évaluation multi-médias, il est également juste de mentionner que les principaux problèmes associés à l'utilisation de ces produits chimiques concernent le principal récepteur potentiel des substances polluantes : l'environnement aquatique.

Il est donc nécessaire de rappeler rapidement en quelques mots les parties applicables de la DCE.

VIII.1.1.3 La Directive Cadre sur l'Eau (DCE)

Alors que la DCE fournit non seulement des éléments permettant d'éviter et de contrôler les émissions des installations IPPC industrielles, elle fournit également un lien clé avec la Directive IPPC. Elle définit des méthodes et des procédures pour que la Commission puisse établir la liste des priorités afférentes aux substances dangereuses, et proposer à cette fin des contrôles d'émissions et des NQE (normes de qualité environnementale, ou « normes de qualité ») qui seront adoptées par le Conseil et le Parlement européen.

De plus, elle fournit aux États membres le droit de fixer les normes de qualité de toutes les autres substances qui sont pertinentes, quel que soit le bassin fluvial, à la réalisation des objectifs définis par la Directive elle-même.

Plus important encore, elle présente dans une annexe (Annexe V, paragraphe 1.2.6) une procédure simple qui sera utilisée par les autorités des États membres pour calculer les normes de qualité environnementale (NQE) des substances chimiques dans l'eau.

En d'autres termes, elle fournit l'une des conditions requises par la Directive IPPC pour la mise en oeuvre d'une approche combinée : des méthodes et des procédures permettant de calculer les Normes de Qualité Environnementales.

Conformément au texte de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) (Annexe V, paragraphe 1.2.6), les États membres doivent déterminer les NQE comme suit :

Méthode de test	Facteur de sécurité
Au moins un L(E)C ₅₀ précis pour chacun des trois niveaux trophiques du dossier de base	1 000
Une CSEO chronique (poisson, daphnie ou un organisme représentatif des eaux salines)	100
Deux CSEO chroniques d'espèces représentant deux niveaux trophiques (poisson et/ou daphnie ou un organisme représentatif des eaux salines et/ou des algues)	50
CSEO chroniques d'au moins trois espèces (normalement poisson, daphnie ou un organisme représentatif des eaux salines et des algues) représentant trois niveaux trophiques	10
Autres cas, y compris les données de terrain ou les écosystèmes modèles, qui permettent de calculer et d'appliquer des facteurs de sécurité plus précis.	Évaluation au cas par cas

Alors qu'une analyse plus détaillée de l'importance et des implications de ce tableau sera réalisée ultérieurement, il est utile de faire quelques remarques à ce niveau :

- Les Normes de Qualité définies sur cette base prennent uniquement en compte la protection du système aquatique, sans considérer les effets indirects sur les humains
- Les chiffres issus du tableau ci-dessus sont des Concentration Sans Effet Prévu (CSEP) (se reporter au document d'orientation technique du règlement 793/93/CEE)
- La Commission a développé une procédure de priorisation, qui repose sur un système dans lequel le résultat des effets aquatiques est associé à un résultat de bioconcentration et à un résultat sur les effets sur les humains. Cette procédure a été utilisée pour fournir un socle à la « liste des priorités » (proposée par la Commission) des substances qui doivent être contrôlées au niveau de l'UE par le biais de contrôles d'émissions et de NQE qui doivent être adoptées conformément à la Directive Cadre sur l'Eau.

Le concept suivant d'évaluation par benchmarking repose également sur la méthode de calcul des normes de qualités décrite ci-dessus et ce, pour les raisons suivantes :

- dans le cadre du BREF, la méthode doit être claire, simple, transparente et facile d'utilisation
- il est probable que l'environnement aquatique reste le maillon faible de la chaîne, même si beaucoup de travail serait nécessaire pour le prouver
- les méthodes de benchmarking seront utilisées de façon combinée avec la législation européenne sur les produits chimiques, qui comprend implicitement l'évaluation des effets négatifs indirects potentiels par l'inclusion de bioaccumulation (sur l'environnement aquatique et sur les hommes), des propriétés CMT (cancérogènes, mutagènes, tératogènes) ainsi que des effets chroniques dans la classification des produits chimiques dangereux. La DCE nécessite également que les États membres définissent des NQE pour la qualité requise des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire: ce sera un autre point à vérifier pour prendre en compte la santé humaine dans l'une des voies d'exposition les plus importantes.

VIII.1.2 Benchmarking : introduction au concept

Le concept d'évaluation par benchmarking repose sur des comparaisons substance par substance à l'aide d'une mesure théorique normalisée de la Concentration Prévisible dans l'Environnement (appelée ici CPE normalisée). Cette CPE normalisée est comparée à la concentration sans effet prévu (CSEP) ou aux NQE de la substance, déterminée conformément à la méthode présentée dans l'Annexe V de la Directive-cadre sur l'eau. De cette façon, il est possible de calculer un ratio pour chaque substance, ce qui permet de réaliser un classement préalable des substances en fonction de leur impact potentiel.

Etant donné que les termes CSEP et CPE font désormais partie du langage législatif dans le cadre de la réglementation sur les émissions et que leur signification deviendra connue, il est utile à ce point de clarifier ces concepts puisqu'ils s'appliquent à la procédure de benchmarking.

VIII.1.2.1 La CSEP

La procédure de benchmarking ne tente pas de classer les produits chimiques mentionnés dans le BREF par elle-même.

La situation réelle est compliquée par le fait que les traitements chimiques des systèmes de refroidissement sont rarement composés d'une seule substance. La tentative de classement des traitements dans un BREF pourrait impliquer l'application d'une procédure « additive » sur une liste énorme de combinaisons de substances possibles dans les traitements. En supposant que ces combinaisons peuvent être disponibles, cela nécessiterait beaucoup de travail et de temps, et elles ne parviendraient pas à être exhaustives ou mises à jour.

C'est pourquoi ce concept d'évaluation vise à offrir une méthodologie standardisée plutôt qu'une évaluation numérique des substances de traitement.

Les autorités des États membres (EM) peuvent alors utiliser cette méthodologie en cas de besoin, au niveau de l'Etat Membre, voire mieux au niveau local.

Quel que soit le taux, les données sur la toxicité aquatique doivent être disponibles et mises à disposition par les fournisseurs de produits chimiques pour permettre d'évaluer les CSEP. Il s'agit d'un aspect fondamental, quel que soit la procédure de classification.

Il convient également de noter que la procédure de l'Annexe V, et son tableau associé, n'ont pas été créés récemment par la Commission dans le cadre de la DCE. En fait, l'approche et le tableau proviennent du guide technique sur l'évaluation des risques pour les produits chimiques nouveaux et existants (un extrait de cette partie pertinente est joint au paragraphe VII.1.6 de l'Annexe I).

Quelques précisions seulement semblent opportunes à ce niveau.

Moins il y aura de données disponibles et plus l'incertitude pour convertir les données de toxicité en CSEP sera grande. La disponibilité des données chroniques réduit l'incertitude. En utilisant un ensemble de situations intermédiaires, avec des données de toxicité chronique sur trois niveaux trophiques, permet d'utiliser un facteur de 10, par rapport à un facteur de 1 000 lorsque seules des données de toxicité aiguë sont disponibles. Les coûts relatifs à la réalisation de tests de toxicité chronique sont nettement supérieurs aux coûts de tests de toxicité aiguë. Ainsi, il est probable que des données de toxicité aiguë soient plus disponibles que celles concernant la toxicité chronique.

Lorsque la procédure de benchmarking est appliquée localement, les données disponibles devront être utilisées avec le facteur d'évaluation correspondant.

Dans ce cas, il incombera au fournisseur des produits chimiques de décider si des ressources supplémentaires doivent être investies ou non dans l'obtention de données chroniques, et pourquoi et comment cela pourrait s'avérer nécessaire. Par exemple, pour une installation donnée, il se peut que l'utilisation de données aiguës seules (qui implique l'obtention d'une NQE en divisant le LC₅₀ par un « facteur de sécurité » de 1 000 pour la prise en compte de l'incertitude) entraîne des difficultés à se conformer à la NQE rigoureuse qui en découle. Dans ce cas, le fournisseur peut choisir d'obtenir les données chroniques qui sont plus « certaines », mais aussi plus longues et plus coûteuses. Les données chroniques impliquent la division des concentrations du résultat de tests par un coefficient de sécurité de seulement 10, ce qui entraînera une NQE plus « certaine » pouvant également être plus réalisable.

VIII.1.2.2 La CPE

Dans le cadre des produits chimiques utilisés dans un système de refroidissement, la CPE « réelle » doit être considérée et définie comme la concentration finale du produit chimique dans l'eau de rivière, après rejet et dilution dans l'eau de rivière, et à une distance appropriée du rejet.

Lorsqu'un produit chimique est utilisé dans un système de refroidissement, il est soumis à un ensemble de conditions physico-chimiques qui détermineront son avenir dont :

- la décomposition dans le système de refroidissement à cause de l'hydrolyse ou de la photolyse,
- l'adsorption par le système,
- la partition entre l'eau et l'air,
- le fait de terminer dans la boue,
- la biodégradation dans le système de refroidissement lui-même, dans les installations de traitement des déchets (chimiques/biologiques), et dans la rivière.

La partie qui n'est pas « perdue » terminera dans la rivière et sera diluée. Une évaluation précise de la CPE dans la rivière n'est possible qu'au niveau local.

Il existe des modèles et des algorithmes pour réaliser cette tâche, mais ils doivent prendre en compte les conditions spécifiques à chaque site. À l'évidence, la CPE finale dépendra de la quantité de produit chimique qui est introduite, dépendante à son tour des dimensions du système et des conditions de fonctionnement (nombre de cycles de concentration, taille de l'installation et quantité de chaleur à évacuer).

La plus grande partie de l'analyse suivante sera axée sur la description d'une méthode simple permettant de calculer une CPE « standardisée » ($CPE_{\text{normalisée}}$) qui, même si elle ne ressemble pas aux valeurs de CPE réelles, permet d'effectuer une évaluation préalable rapide des produits chimiques par rapport à un autre. Précisons que la $CPE_{\text{normalisée}}$ a seulement une valeur restreinte et limitée, et peut être uniquement utilisée comme point de départ général de l'évaluation des effets potentiels de produits chimiques relativement les uns par rapport aux autres.

VIII.1.3 Bilans matière des tours de refroidissement basiques

La figure VIII.1 ci-dessous présente un descriptif simplifié d'un système de tour de refroidissement.

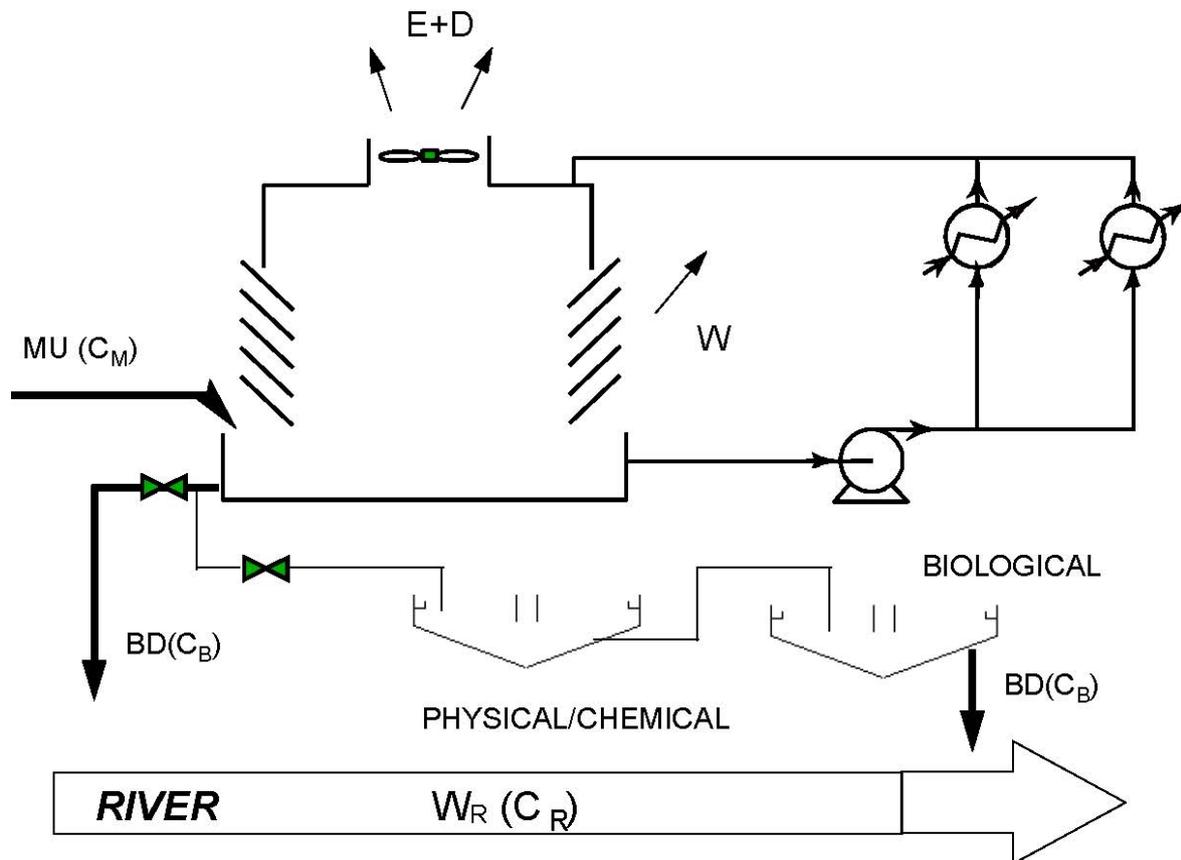


Figure VIII.1 : Bilan matières d'une tour de refroidissement

VIII.1.3.1 Équations de base des tours de refroidissement

MU	: Taux d'appoint	mc/heure
BD	: Taux de purge	mc/heure
W	: Pertes par entraînement	mc/heure
E	: Taux d'évaporation	mc/heure
C_M	: Concentration de substance dans MU	mg/l -gr/mc
C_B	: Concentration de substance dans BD	mg/l -gr/mc
N_c	: Cycles de concentration = C_B/C_M	

VIII.1.3.2 Bilan hydrique

$$MU = BD + E + W$$

VIII.1.3.3 Bilan matières

$$MU \times C_M = (BD + W) \times C_B$$

VIII.1.3.4 Concentration

$$N_c = C_B/C_M = MU/BD + W$$

VIII.1.3.5 Discussion

L'eau pénètre dans le système de refroidissement par la conduite d'alimentation. L'eau doit être «alimentée» pour compenser les pertes provoquées par l'évaporation, l'entraînement et la purge. L'«entraînement» représente la quantité d'eau qui s'échappe de la tour de refroidissement sous la forme de gouttelettes. On

suppose que les gouttelettes emportent avec elles les produits chimiques entraînés au même niveau de concentration que dans la purge.

Lorsque l'eau recircule dans l'équipement de l'installation, elle transporte la chaleur qui est à son tour évacuée par évaporation dans la tour de refroidissement. Aucun produit chimique ne passe dans la vapeur d'eau (eau évaporée).

Le taux d'évaporation « E » est déterminé par la conception. Pour compenser l'évaporation et l'entraînement (et les pertes dues à purge, voir ci-dessous), il est nécessaire de continuer à apporter une quantité équivalente d'eau d'appoint.

L'eau d'appoint, qu'elle soit de l'eau ou de l'eau de surface, entraîne avec elle des solides dissous et en suspension, dont la concentration et le type varieront d'un cas à l'autre. Une partie de l'eau en recirculation doit donc être purgée pour éviter une concentration trop importante des substances dues à l'évaporation au-delà des valeurs tolérables.

La valeur du taux de purge doit être fixée afin de maintenir une concentration optimale des substances dans l'eau en recirculation, permettant d'éviter, en même temps que le traitement chimique approprié, l'encrassement par la précipitation et le dépôt de solides, et la corrosion.

Le taux de purge est fixé par le traitement chimique et les conditions d'exploitation. Fréquemment, dans la pratique et dans les systèmes plus anciens, la purge ne peut pas être contrôlée. Elle provient, au moins en partie, de pertes d'eau non planifiées, provenant des différentes parties de l'équipement qui est refroidi.

Le nombre de cycles de concentration correspond au ratio entre la concentration des substances dans la purge et leur concentration dans l'eau d'appoint. Par exemple, si la concentration de l'ion calcium dans l'eau d'appoint s'élève à 200 ppm, avec un nombre de cycles égal à 2, la concentration en calcium dans l'eau en recirculation s'élèvera à 400 ppm.

Le bilan matières ci-dessus montre que le nombre de cycles de concentration est égal au rapport $MU/(BD + W)$, et lorsque que l'entraînement est négligé, au rapport MU/BD .

Les produits chimiques sont introduits dans le système de refroidissement par la conduite d'alimentation (rarement) ou dans le bassin de la tour de refroidissement. Une certaine concentration de produits chimiques doit être « maintenue » dans l'eau recirculante, équivalente à la concentration maintenue dans l'eau de purge. Plus le nombre de cycles est élevé, plus la purge est faible, plus les conditions du système sont rigoureuses, plus la quantité de produits chimiques perdus en continu est faible.

Cette dernière affirmation est vraie, sauf lorsque les substances contenues dans l'eau d'appoint sont autorisées à se concentrer de plus en plus dans la tour, et dans ce cas davantage de produits chimiques différents pourront être nécessaires pour maintenir un bilan approprié des dépôts et de la corrosion dans le système.

Pourtant, en principe pour économiser de l'eau et des produits chimiques (consommation, coûts et conséquences sur l'environnement), il convient de rechercher un bon équilibre avec nombre de cycles de concentration le plus haut possible.

Une certaine concentration de produits chimiques pour le traitement doit être « maintenue » dans l'eau recirculante, et donc dans la purge, afin que ceux-ci puissent faire effet.

Normalement, dans les traitements multi-substances complexes, il est conseillé de contrôler le niveau d'une substance facilement mesurable, et de le conserver aux valeurs conseillées par les fournisseurs des produits chimiques. Cela correspond à l'hypothèse implicite que le rapport entre les différents produits chimiques reste le même, quels que soient les différents taux de « pertes » de chaque produit chimique dans le système.

Cela correspond à également à l'hypothèse essentielle suivante : si la concentration de produits chimiques est mesurée (un produit chimique mesuré, les autres calculés) dans la purge, cette valeur correspond à ce qui est disponible dans le système de refroidissement, et toutes les autres pertes dans ce dernier ont déjà été prises en compte.

En d'autres termes, pour évaluer l'impact des produits chimiques sur l'environnement aquatique, seul le sort ou les variations de concentration des produits chimiques en aval de la conduite de purge doivent être prévus (précédemment appelées pertes du « système »), et les réductions de la concentration, provenant de procédés tels que l'hydrolyse, l'adsorption, etc., sont déjà pris en compte.

Cette hypothèse sera utilisée dans le concept de benchmarking.

VIII.1.4 Calcul de la CPE et benchmarking

Le Tableau VIII.1 ci-dessous récapitule l'approche simple que suggère le benchmarking de substances unitaires.

L'approche suggérée débute avec le concept de calcul de la $PEC_{\text{rivière}}$ « réelle », et consiste à la diviser par la NQE correspondante, provenant de la DCE.

Le Tableau VIII.1 ci-dessous montre comment la CPE « réelle » peut être calculée, et comment, grâce à des approximations successives, il est possible de normaliser/standardiser l'estimation de la CPE, et donc de rendre le calcul applicable dans un objectif de « benchmarking ». Si le taux de purge BD, le débit de la rivière et les pertes de produits chimiques sont connus, la concentration de la substance dans la rivière est obtenue à partir d'une équation très simple (1) décrite dans le tableau.

Tableau VIII.1 : Calcul de la CPE et benchmarking

$CPE_{\text{rivière}}/NQE$ (NQE de la Directive-cadre sur l'eau)	
C_B	= Concentration dans la purge gr/mc
C_R	= Concentration dans la rivière gr/mc = $CPE_{\text{rivière}}$
BD	= Taux de purge en mc/heure
W_R	= Débit de la rivière en mc/heure
t	= (1 - % de pertes dans la tour)
w	= (1 - % de pertes dans la station d'épuration - STEP)
r	= (1 - % pertes dans la rivière)
(1)	$C_R = \frac{BD \times C_B \times (t) \times (w) \times (r)}{W_R}$ Évaluation/Prévision locales
t = 1	w = 1
r = 1	BD = 1
De plus, si $W_R = 1$, $C_B = C_R$ = proportionnelle à $CPE_{\text{rivière}}$	

L'équation (1), avec tous ses éléments connus ou calculés, peut être utilisée de cette façon uniquement pour les évaluations au niveau local.

Pour évaluer les pertes dans le système de refroidissement, dans la station d'épuration ainsi que dans la rivière, de nombreuses données spécifiques doivent être disponibles concernant les données chimiques et physico-chimiques de chaque substance. Cela va de la volatilité à la biodégradabilité en passant par le taux de dépôt, et concerne les conditions spécifiques du système, comme la durée de résidence des produits chimiques dans la tour (proportionnelle au rapport entre le volume du système et le taux de purge), le type et les performances des stations d'épuration (chimiques et biologiques), la durée de résidence dans la rivière après le mélange initial, et ainsi de suite.

Dans une approche de benchmarking « de type bureau », ces données ne sont pas disponibles, d'où le besoin de simplification et d'approximation.

- Tout d'abord, il est supposé (cf. Tableau VIII.1) que les pertes dans le système de refroidissement sont déjà prises en compte en se référant à la concentration du produit chimique dans la purge.
- Deuxièmement, il est supposé qu'aucune perte ne survient dans la station d'épuration. Cette deuxième hypothèse n'est pas correcte en pratique : elle met tous les produits chimiques au même niveau, qu'ils soient ou non éliminés par précipitation dans une installation de traitement chimique, ou par biodégradation partielle ou complète dans une installation de traitement biologique. Il convient de prendre en compte l'introduction d'un facteur de correction pour les produits chimiques aux différents degrés de biodégradabilité. Il faudrait également introduire une différence entre diverses situations de traitement qui varieraient au cas par cas et d'un site à un autre.
- Troisièmement, il est supposé qu'aucune perte ne survient dans la rivière, ce qui est normalement le cas dans les évaluations des risques.

La clé de l'approche de benchmarking proposée repose dans les hypothèses suivantes, à savoir que le taux de purge soit égal à 1, comme le débit de la rivière. Cela signifie que la valeur de la CPE a été normalisée ($CPE_{\text{normalisée}}$) afin de pouvoir effectuer une comparaison parmi les produits chimiques, indépendamment du taux de purge (taille de l'installation et condition d'opération) et du débit de la rivière.

Il est évident que pour le même produit chimique, la CPE sera supérieure dans une installation plus grande avec un taux de purge supérieur, et lorsque que les rejets sont effectués dans une petite rivière. Mais cela est sans importance lorsque c'est un groupe de produits chimiques qui doit être comparé (c'est-à-dire « faisant l'objet d'un benchmarking »). Ce qui importera pour la finalité du benchmarking, c'est le débit d'alimentation du produit chimique ou, en d'autres mots, la concentration qui doit être « maintenue » dans le système à recirculation, et donc dans la purge. Normalement, les fournisseurs de produits chimiques recommandent une plage de concentrations qui varient au cas par cas : le débit d'alimentation moyen recommandé devrait être utilisé.

VIII.1.5 Méthodes de calculs

VIII.1.5.1 Substance unique

Les traitements chimiques avec une seule substance s'appliquent rarement. Dans la plupart des cas, différentes combinaisons de produits chimiques, inorganiques et organiques, sont utilisés dans les systèmes de refroidissement. Des exemples de substances uniques sont principalement liés à l'utilisation de biocides uniques dans le système, ou à des polymères uniques dans les stations d'épuration. Quoiqu'il en soit, le niveau des États membres laisse encore assez à désirer concernant l'évaluation des substances les plus courantes qui sont sur le marché.

Au niveau local, il est plus facile d'imaginer qu'il deviendra nécessaire de comparer les traitements complets les uns par rapport aux autres, plutôt que les substances individuelles. Une vision équilibrée de l'impact global des différentes substances sur l'environnement aquatique peut être acquise uniquement au niveau local, lorsque les différents traitements proposés doivent être comparés.

Quel que soit le taux, la procédure de benchmarking proposée ici implique des évaluations très simples des substances individuelles. La concentration moyenne conseillée de la substance dans la purge représente l'un des termes qui doivent être connus. Elle est généralement exprimée en parties par million (ppm) ou milligrammes par litre (mg/l) dans la purge, et elle a été précédemment appelée $CPE_{normalisée}$.

L'autre élément de l'équation est la CSEP ou la NQE. L'État membre l'a peut-être déjà fixée, ou elle devra faire l'objet d'un « accord » au niveau local à l'aide de la procédure de l'Annexe V sur la DCE, basée sur les données procurées par le fournisseur des produits chimiques. Normalement, les NQE sont également exprimées en ppm et parfois, en ppb ou microgrammes par litre.

Le rapport CPE/CSEP peut donc être facilement calculé pour toutes les substances qui nécessitent d'être évaluées. La valeur obtenue est un simple rapport numérique (si la CSEP et la NQE sont exprimées dans les mêmes unités, ppm ou ppb). Plus le rapport est bas, plus l'impact *potentiel* de la substance sera faible.

Il est souligné encore une fois que ce concept de benchmarking représente une méthodologie standardisée permettant d'évaluer les impacts potentiels des produits chimiques de l'eau de refroidissement, sans tenir compte des caractéristiques locales spécifiques et des caractéristiques physico-chimiques des substances, à l'exception de la toxicité. Ainsi, elle est utile pour l'identification des zones qui nécessitent une investigation complémentaire, et lors de la conception des traitements chimiques dans les procédures de conception et d'exploitation globales de l'installation. Toutefois, elle n'est ni adaptée ni conçue pour être utilisée comme outil de décision pour les évaluations au niveau local : le fait qu'une substance ait un plus faible rapport $CPE_{normalisée}/NQE$ n'implique pas qu'il s'agisse de la meilleure solution pour une situation en particulier, une fois que les autres facteurs spécifiques aux substances, à l'installation et au niveau local sont pris en compte.

VIII.1.5.2 Traitements multi-substances complexes

Dans la pratique, c'est le cas que rencontrent le plus souvent les autorités locales et les opérateurs des installations dans les demandes d'autorisation.

Avant d'effectuer une évaluation de la CPE réelle et complète substance par substance avec l'assistance du fournisseur, pouvant s'avérer nécessaire dans certains cas, l'approche de benchmarking simplifiée peut être utilisée pour concevoir des traitements chimiques dans les procédures de conception et d'exploitation globales de l'installation.

Il convient de prendre en compte l'utilisation d'une procédure complémentaire par laquelle le rapport CPE/CSEP pour chaque substance est calculé à l'aide de la méthode décrite ci-dessus, puis sont ajoutés pour produire un « indice » numérique relatif. Cette approche est semblable à celle qui est utilisée pour classer les préparations chimiques en fonction de la classification de chaque substance dont elles sont composées. Plus la

valeur de la somme obtenue est basse, moins les conséquences sur l'environnement du traitement complexe sont prévisibles.

Il va sans dire que la somme de toutes les valeurs des rapports individuels, entraînant un résultat inférieur à 1, serait préférable à un résultat supérieur à 1. Cela aurait une signification uniquement lorsque le facteur de dilution local réel est connu et inséré dans l'évaluation.

Cependant, lorsque l'on obtient des valeurs supérieures à 1 et que le traitement spécifique semble présenter d'autres avantages écologiques et économiques d'un point de vue technique (moins d'eau, moins d'énergie), il sera nécessaire de mettre en place une procédure d'évaluation des risques plus complexe. Cela peut impliquer à la fois un calcul précis de toutes les pertes de produits chimiques dans le système, mais aussi un affinement de l'évaluation de la CSEP (données chroniques au lieu de données aiguës).

Il ne semblerait pas que l'idée de réaliser dans le BREF, voire au niveau des États membres, un exercice de benchmarking général incluant tous les traitements et combinaisons possibles soit réaliste. Il est plus approprié d'envisager l'évaluation comparative multi-substances (c'est-à-dire des traitements) au niveau local, voir la Section VII.2 de la présente Annexe.

VIII.1.6 Annexe I : Extrait du document d'orientation technique

Chapitre 3 (Évaluation des risques environnementaux), Section 3.1 de la Partie II du « Document d'orientation technique en appui de la Directive 93/67/EEC de la Commission sur l'évaluation des risques des nouvelles substances notifiées et le règlement de la Commission (CE) 1488/94 sur l'évaluation des risques des substances existantes ».

3.3 Évaluation des effets pour le secteur aquatique

3.3.1 Calcul de la CSEP

La fonction d'évaluation des risques concerne la protection de l'environnement dans son ensemble. Certaines hypothèses sont faites en ce qui concerne l'environnement aquatique, permettant une extrapolation, quoique incertaine, des données de toxicité à court terme des espèces uniques et leurs effets sur l'écosystème. On suppose que :

- la sensibilité de l'écosystème dépend des espèces les plus sensibles,
- la protection de la structure de l'écosystème protège la fonction de communauté.

Ces deux hypothèses ont des conséquences importantes. En définissant les espèces qui sont les plus sensibles aux effets toxiques d'un produit chimique dans un laboratoire, l'extrapolation peut ensuite être basée sur les données propres à ces espèces. De plus, le fonctionnement de tout écosystème dans lequel ces espèces existent est protégé sous réserve que la structure ne soit pas trop altérée de manière à provoquer un déséquilibre. Il est généralement accepté que la protection des espèces les plus sensibles doit permettre de sauvegarder la structure et par conséquent, la fonction.

Pour toutes les nouvelles substances, le groupe de données permettant de prévoir les effets sur l'écosystème est très limité : seules les données à court terme sont disponibles dans le dossier initial. Pour la plupart des substances existantes, la situation est identique : dans de nombreux cas, seules les données de toxicité à court terme sont disponibles. Dans ces circonstances, on reconnaît que, même en l'absence d'une validité scientifique forte, des facteurs d'évaluation d'origine empirique doivent être utilisés. Des facteurs d'évaluation ont également été proposés par l'APE et l'OCDE (OECD, 1992d). Dans l'application de tels facteurs, l'objectif consiste à prévoir une concentration sous laquelle un effet inadmissible ne se produirait probablement pas. Ce n'est pas un niveau sous lequel le produit chimique est considéré comme étant sûr. Cependant, une nouvelle fois, un effet inadmissible peut se produire.

En définissant les dimensions des facteurs d'évaluation, de nombreuses incertitudes doivent être résolues pour pouvoir extrapoler les données de laboratoire sur les espèces uniques dans un écosystème de plusieurs espèces. Ces sujets ont été traités dans d'autres articles, qui peuvent être résumés sous les mots-clés suivants :

- Variation intra- et inter-laboratoire des données de toxicité
- Variations intra- et inter-espèces (variance biologique)
- Extrapolation de la toxicité à court terme et à long terme

- Données de laboratoire sur l'extrapolation de l'impact sur le terrain (l'extrapolation est nécessaire aux tests des espèces uniques sur l'écosystème. Les effets additifs, synergiques et antagonistes issus de la présence d'autres substances peuvent également jouer un rôle).

La valeur du facteur d'évaluation dépend de la fiabilité selon laquelle une CSEP_{eau} peut être obtenue à partir des données disponibles. Cette fiabilité augmente si des données sur la toxicité sur les organismes sont disponibles à plusieurs niveaux trophiques, groupes taxonomiques et avec des styles de vie représentant différentes stratégies alimentaires. Ainsi, les facteurs d'évaluation inférieurs peuvent être utilisés avec des groupes de données plus importants et pertinents que les données du dossier de base. Les facteurs d'évaluation proposés sont présentés dans le Tableau VII.1.

Pour les nouvelles substances, un facteur d'évaluation égal à 1 000 sera appliqué sur le L(E)C₅₀ le plus faible du dossier de base. De plus, pour les substances existantes, le facteur d'évaluation est généralement appliqué aux données pertinentes sur la toxicité les plus basses, indépendamment du fait que les espèces aient été testées dans un organisme standard (Cf. remarques du Tableau 14). Pour les tests à court terme, on utilise le L(E)C₅₀ alors que la CSEO est utilisée avec les tests sur le long terme. Pour certains composés, de nombreuses valeurs L(E)C₅₀ à court terme validées peuvent être disponibles. C'est pour cette raison qu'il est proposé de calculer la moyenne arithmétique si plus d'une valeur L(E)C₅₀ est disponible pour les mêmes espèces. Avant de calculer cette moyenne arithmétique, une analyse des conditions de test doit être effectuée afin de découvrir pourquoi des différences ont été trouvées dans la réponse.

Le test d'inhibition de la croissance des algues du dossier de base porte, en principe, sur plusieurs générations. Cependant, pour appliquer les facteurs d'évaluation appropriés, l'EC₅₀ est traité comme une valeur de toxicité à court terme. La CSEO de ce test peut être utilisée comme une CSEO supplémentaire lorsque d'autres données à long terme sont disponibles. En général, une CSEO algale ne doit pas être utilisée sans le support des CSEO à long terme des espèces d'autres niveaux trophiques. Toutefois, si un produit chimique présente une toxicité spécifique sur les algues, la CSEO algale définie à partir du test du dossier de base doit être appuyée par un second test sur les espèces des algues.

Les micro-organismes représentant un niveau trophique supplémentaire peuvent uniquement être utilisés si des cultures pures non adaptées ont été testées. Les recherches avec des bactéries (par exemple, les essais sur la croissance) sont considérées comme des tests à court terme. De plus, les algues bleu-vert doivent être comptées parmi les principaux producteurs de leur nutrition autotrophique.

Tableau VIII.2 : Facteurs d'évaluation permettant d'obtenir une CSEP

Description	Facteur d'évaluation
Au moins un L(E)C ₅₀ à court terme pour chacun des trois niveaux trophiques du dossier de base (poisson, daphnie et algues)	1 000 (a)
Une CSEO à long terme (poisson ou daphnie)	100 (b)
Deux CSEO à long terme des espèces représentant deux niveaux trophiques (poisson et/ou daphnie et/ou algues)	50 (c)
CSEO à long terme d'au moins trois espèces (normalement poisson, daphnie et algues) représentant trois niveaux trophiques	10 (d)
Données de terrain ou écosystèmes modèles	Étudié au cas par cas ^(e)

REMARQUES :

- a) L'utilisation d'un facteur de 1 000 sur les données de toxicité à court terme est un facteur conservateur et protecteur, conçu pour garantir que les substances pouvant provoquer des effets inverses soient identifiées dans l'évaluation des effets. On suppose que chacune des incertitudes identifiées ci-dessus apporte une contribution significative à l'incertitude dans son ensemble. Pour toute substance donnée, il peut exister une preuve que ce n'est pas le cas, ou qu'un composant particulier de l'incertitude est plus important que tous les autres. Dans ses circonstances, il peut être nécessaire de varier ce facteur. Cette variation peut entraîner une augmentation ou une diminution du facteur d'évaluation en fonction de la preuve disponible. En aucun cas, un facteur inférieur à 100 ne doit être utilisé pour obtenir une CSEP_{eau} à partir des données de toxicité à court terme, à l'exception des substances avec une émission intermittente (Cf. le paragraphe 3.3.2). Une preuve de la variation du facteur d'évaluation pourrait comprendre un ou plusieurs des aspects suivants :

- Une preuve des composés structurellement semblables (la preuve d'un composé étroitement lié peut démontrer qu'un facteur supérieur ou inférieur peut être approprié).

- La connaissance du mode d'action (certaines substances, grâce à leur structure, peuvent agir de manière non spécifique. Un facteur inférieur peut donc être envisagé. De même, un mode d'action spécifique connu peut entraîner l'augmentation d'un facteur).
- La disponibilité des données d'une vaste sélection d'espèces couvrant des groupes taxonomiques supplémentaires, autres que ceux qui sont représentés par les espèces du dossier de base.
- La disponibilité des données d'une variété d'espèces couvrant les groupes taxonomiques des espèces du dossier de base sur trois niveaux trophiques minimum. Dans un tel cas, les facteurs d'évaluation peuvent uniquement être diminués si ces points de données multiples sont disponibles pour le groupe taxonomique le plus sensible.

Il peut arriver que le dossier de base ne soit pas complet : par exemple, pour les substances qui sont produites à < 1 t/a (notifications conformément à l'Annexe VII B de la Directive 92/32/EEC). La toxicité aiguë de la daphnie est déterminée à son maximum. Dans ces cas exceptionnels, la CSEP devrait être calculée avec un facteur de 1 000. La variation d'un facteur de 1 000 ne devrait pas être considérée comme étant normale, et devrait être entièrement appuyée par une preuve complémentaire.

- b) Un facteur d'évaluation de 100 s'applique à une CSEO à long terme (poisson ou daphnie) si cette CSEO a été générée pour le niveau trophique indiquant le $L(E)C_{50}$ le plus bas dans les tests à court terme. Si la seule CSEO à long terme disponible provient d'une espèce (organisme standard ou non - standard) qui ne dispose pas du $L(E)C_{50}$ le plus bas à partir des tests à court terme, elle ne peut pas être considérée comme protectrice des autres espèces plus sensibles à l'aide des facteurs d'évaluation disponibles. Ainsi, l'évaluation des effets repose sur les données à court terme avec un facteur d'évaluation égale à 1 000. Cependant, la CSEP obtenue, basée sur les données à court terme, peut ne pas être supérieure à la CSEP basée sur la CSEO à long terme disponible.

Un facteur d'évaluation de 100 s'applique également à la plus basse des deux CSEO à long terme couvrant deux niveaux trophiques, lorsque ces CSEO n'ont pas été générées pour le niveau trophique indiquant le $L(E)C_{50}$ le plus bas dans les tests à court terme.

- c) Un facteur d'évaluation de 50 s'applique à la plus basse des deux CSEO à long terme couvrant deux niveaux trophiques lorsque ces CSEO ont été générées, couvrant le niveau trophique indiquant le $L(E)C_{50}$ le plus bas dans les tests à court terme. Il s'applique également à la plus basse des trois CSEO couvrant trois niveaux trophiques lorsque ces CSEO n'ont pas été générées à partir du niveau trophique indiquant le $L(E)C_{50}$ le plus bas dans les tests à court terme.
- d) Normalement, un facteur d'évaluation de 10 sera uniquement appliqué lorsque que les CSEO de toxicité à long terme sont disponibles pour au moins trois espèces sur les trois niveaux trophiques (par exemple, poisson, daphnie et algues ou un organisme non standard au lieu d'un organisme standard).

Lors de l'examen des résultats relatifs aux études sur la toxicité à long terme, la $CSEP_{eau}$ devrait être calculée à partir de la concentration sans effet observé (CSEO) la plus basse disponible. L'extrapolation des effets sur l'écosystème peut être faite avec une plus grande confiance, et ainsi, une réduction du facteur d'évaluation à 10 est possible. Toutefois, cela est suffisant uniquement si l'on peut considérer que les espèces testées représentent un ou plusieurs groupes sensibles. La détermination devrait normalement être uniquement possible si des données étaient disponibles sur au moins trois espèces parmi les trois niveaux trophiques. Il peut parfois être possible de déterminer avec une forte probabilité que l'espèce la plus sensible a été examinée, c'est-à-dire qu'une autre CSEO à long terme à partir d'un groupe taxonomique différent ne serait pas inférieure aux données déjà disponibles. Dans ces circonstances, un facteur de 10 appliqué à la CSEO la plus basse à partir de deux espèces seulement serait également approprié. Cela est particulièrement important si la substance n'est pas en mesure de se bioconcentrer. S'il est impossible de se faire une opinion, un facteur d'évaluation de 50 doit être appliqué afin de prendre en compte toute variation de sensibilité inter-espèces. Un facteur de 10 ne peut pas être diminué sur la base des études de laboratoire.

- e) Le facteur d'évaluation à utiliser sur les études de mésocosme ou les données de (semi-)terrain devra faire l'objet d'une révision au cas par cas.

Pour les composés avec un log Kow élevé, aucune toxicité à court terme ne peut être décelée. De plus, même dans les tests à long terme, un état stable peut ne pas encore avoir été atteint. Pour les tests avec du poisson pour les narcotiques non polaires, ces derniers peuvent être justifiés en utilisant des QSAR à long terme (Cf. le paragraphe 3.2.1.2 et le chapitre 4 sur l'utilisation des QSAR). On peut envisager d'utiliser un facteur d'évaluation supérieur dans les cas où un état stable semble ne pas avoir été atteint.

Pour les substances pour lesquelles aucune toxicité n'est observée dans les tests à court terme, un test à long terme a été mené si le $\log Kow > 3$ (ou si le $FBC > 100$) et si la $CPE_{locale/régionale}$ est $> 1/100^e$ de l'hydrosolubilité (paragraphe 4.5). Le test de toxicité à long terme doit normalement être un test de daphnie afin d'éviter un test de vertébrés inutile. La CSEO de ce test peut alors être utilisée avec un facteur d'évaluation de 100. Si outre le test à long terme requis, une CSEO est déterminée à partir d'un test d'algues du dossier de base, un facteur d'évaluation de 50 est appliqué.

L'évaluation des effets réalisée avec des facteurs d'évaluation peut être appuyée par une méthode d'extrapolation statistique si la base des données suffit à son application (Cf. Annexe V).

VIII.2 Concept d'une méthode d'évaluation locale des produits chimiques de traitement de l'eau de refroidissement, avec une attention particulière sur les biocides

VIII.2.1 Introduction

L'une des questions environnementales majeures identifiées dans le BREF sur les systèmes de refroidissement humides industriels est le traitement chimique de l'eau de refroidissement (contrôle anticorrosion, antitartre, anti-encrassement, bioencrassement), ainsi que les émissions dans l'eau de surface. Une attention particulière est portée aux biocides du fait de leur toxicité élevée, qui est nécessaire dans le cadre de leur fonction particulière.

Le BREF de refroidissement identifie trois niveaux sur lesquels des techniques peuvent être utilisées pour réduire l'impact des additifs/biocides de l'eau de refroidissement sur les eaux de réception :

25. Mesures de prévention (Tableau 4.7)
26. Optimisation du fonctionnement, incluant le monitoring (Tableau 4.8)
27. Sélection et application des additifs (Tableau 4.8)

Les trois niveaux de contrôle interagissent les uns avec les autres, et les discussions du GTT ont permis d'établir que la sélection des additifs appropriés est un exercice complexe qui doit prendre en compte plusieurs facteurs locaux et spécifiques aux sites.

Le besoin de fournir un aperçu des concepts soulignant l'évaluation des additifs/biocides dans l'eau de refroidissement a été identifié comme une mesure MTD essentielle pour réduire les conséquences sur l'environnement des additifs, et des biocides en particulier. À cette fin, le BREF contient une annexe qui définit un outil d'évaluation de dépistage basé sur des méthodologies et des données existantes (« Evaluation par Benchmarking »). Le Chapitre 3 fournit également certaines informations générales sur les régimes d'évaluation utilisés aux Pays-Bas et en Allemagne.

Dans un BREF horizontal, il est uniquement possible et approprié de faire des conclusions générales sur les concepts qui faciliteront l'application des principes de MTD concernant la sélection des biocides et des autres additifs. Les caractéristiques spécifiques aux installations, les conditions climatiques et l'environnement local sont des éléments-clés dans la détermination d'une approche compatible MTD au niveau local pour les installations individuelles.

La justification de l'importance portée aux biocides, dans un régime d'évaluation, est que leurs propriétés intrinsèques proviennent du fait qu'ils sont considérés comme étant potentiellement plus dangereux sur les organismes des eaux de réception. Au point de rejet, les déversements des systèmes de refroidissement utilisant des biocides peuvent présenter une toxicité aiguë. Les circonstances locales, les caractéristiques des substances utilisées et en particulier la dilution réelle dans l'eau de réception déterminent si les NQE (normes de qualité environnementale) peuvent être respectées. Une sélection et une réduction correctes des éventuelles conséquences provenant de l'utilisation des biocides peuvent uniquement être abordées de manière adéquate lorsque les conséquences potentielles peuvent être évaluées. Le critère selon lequel une application d'additifs/de biocides peut être jugée comme une approche MTD est l'état écologique des eaux de réception.

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, ce BREF devrait fournir des instructions sur la façon de résoudre les problèmes spécifiques au site pour l'évaluation locale des biocides utilisés dans les systèmes de refroidissement. Une telle évaluation locale peut être considérée comme une étape ultérieure et plus détaillée, suivant un exercice de dépistage préalable (facultatif) comme la méthode de benchmarking présentée dans l'Annexe VI.1.

Par conséquent, ce BREF vise à fournir des instructions sur les concepts applicables à l'évaluation des circonstances locales, sans prescrire la méthodologie elle-même. Des méthodologies et des modèles nombreux et en évolution constante sont disponibles pour évaluer les scénarios d'émissions au niveau local (qui vont du

scénario simple au scénario le plus complexe). Les autorités des États Membres devraient pouvoir sélectionner et utiliser des méthodologies adaptées aux conditions locales et au niveau de préoccupation concernant les éventuels effets sur l'environnement.

VIII.2.2 Éléments-clés

Pour aborder la réduction de l'impact spécifique à l'utilisation des biocides dans les systèmes de refroidissement conformément aux principes des MTD, il convient d'être conscient de deux éléments constitutifs majeurs :

- La Directive 98/8/CE sur les produits biocides qui, depuis le 14 mai 2000, ajuste la mise sur le marché européen des produits biocides. Dans ce cadre, l'UE examinera les scénarios d'exposition afin d'évaluer les risques associés aux 23 catégories de produits qui sont couvertes. L'un des types de produits pris en compte pour l'autorisation couvre les biocides utilisés dans les systèmes de refroidissement (type de produit 11). Conformément à la Directive, les nouveaux biocides doivent être évalués et approuvés immédiatement. Une extension a été apportée pour les substances existantes qui seront étudiées le moment venu.
- La future Directive-cadre sur l'eau (DCE), qui fournit un cadre global des objectifs liés à la qualité. Ils spécifient une méthodologie qui sera utilisée pour établir les normes de qualité environnementale (NQE) des substances chimiques, définie dans l'Annexe V du texte de la DCE. La méthodologie de définition des NQE est identique à celle qui est utilisée pour déterminer les concentrations sans effet prévus (CSEP) classiques en fonction des méthodes de test définies dans la législation de l'UE sur les produits chimiques. La méthode comprend un « facteur de sécurité » pouvant atteindre 1 000 afin de prendre en compte les incertitudes liées à l'extrapolation du test de toxicité sur les organismes sélectionnés pour la protection de l'écosystème aquatique.

Les données de toxicité des biocides utilisés dans les systèmes de refroidissement sont généralement disponibles, ou elles le deviendront en même temps que les données des autres propriétés intrinsèques pertinentes (par exemple, la biodégradabilité et la bioconcentration) en fonction des procédures d'enregistrement définies dans la Directive sur les produits biocides. En fonction de ces données, la méthodologie définie dans l'Annexe V de la DCE peut être utilisée pour déterminer la NQE (c'est-à-dire la valeur CSEP) d'une substance dans l'eau.

La NQE peut alors être comparée à la concentration prévisible dans l'environnement (CPE) afin de déterminer dans quelle mesure l'impact potentiel se produira. Puisque la NQE correspond à la CSEP, il est souvent fait référence à la « Comparaison CPE/CSEP ». Comme précisé ci-dessus, de nombreuses méthodes sont disponibles pour calculer la concentration des substances qui devraient être présentes dans les eaux de réception après un déversement (c'est-à-dire la CPE).

La valeur CPE/CSEP peut être utilisée comme critère dans la détermination des MTD pour une approche compatible MTD des biocides utilisés dans les systèmes de refroidissement. On doit cependant reconnaître qu'une certaine distinction doit être faite dans cette approche entre les installations nouvelles et existantes. Une valeur CPE/CSEP < 1 dans l'eau de réception après un mélange et une dilution réalistes pourrait fournir le critère (comme valeur limite) de l'utilisation des biocides dans les nouveaux systèmes de refroidissement. Pour les systèmes de refroidissement existants dans lesquels de nombreux paramètres de conception et d'autres caractéristiques d'installation sont déjà définis, il ne sera pas toujours possible d'atteindre CPE/CSEP < 1 à un coût qui est économiquement viable, tel que décrit dans la définition des MTD. Dans ces cas, la CPE/CSEP < 1 doit rester la cible (comme point de référence), mais un objectif à plus long terme doit être envisagé, s'adaptant aux cycles de remplacement des équipements etc.

La Figure VIII.2 montre une présentation graphique illustrant un exemple de détermination d'une approche compatible MTD pour l'utilisation des biocides dans les systèmes de refroidissement existants. Un fonctionnement correctement optimisé dans un système de refroidissement très bien conçu peut-être considéré comme une MTD lorsqu'une valeur CPE/CSEP < 1 est atteinte. Pour les installations qui ne peuvent pas atteindre une valeur CPE/CSEP < 1 à cause d'une conception sous-optimisée ou d'autres facteurs locaux/spécifiques aux sites, il sera nécessaire d'optimiser le fonctionnement du système autant que possible.

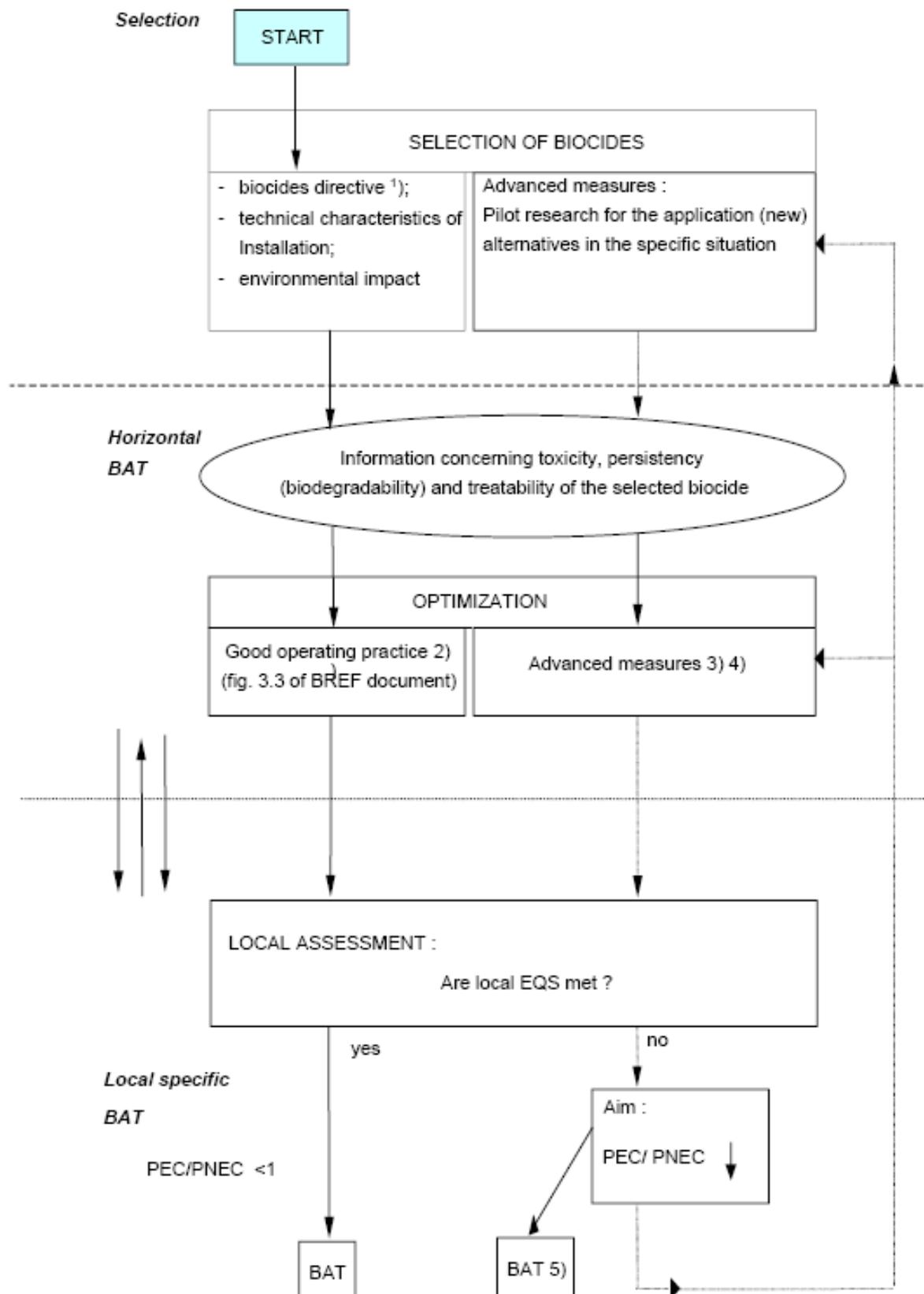


Figure VIII.2 : Approche combinée pour l'évaluation des biocides dans l'eau de refroidissement des installations existantes

Légende de la Figure VIII.2 :

- 1) La mise en oeuvre de cette directive est en cours de préparation.
- 2) Optimisation de l'utilisation des biocides grâce au suivi des paramètres applicables au contrôle du système de refroidissement et à l'optimisation du dosage (préférer un dosage automatique).
- 3) Des mesures telles que le prétraitement et la filtration d'une partie du flux en externe peuvent être envisagées. Des mesures au point de rejet peuvent également être prises en compte. Le choix d'une mesure est souvent lié à la situation. Une grande variété de mesures au point de rejet peut être envisagée, comme le traitement biologique, la filtration sur sable, les techniques d'adsorption, l'oxydation par ozone, etc.
- 4) Dans ce cas, les critères des MTD concernant les mesures doivent être appliqués. Cela signifie une évaluation des différents aspects tels que : la disponibilité des mesures, l'impact économique des mesures nécessaires par rapport aux conséquences environnementales d'une mesure.
- 5) Dans ce cas, si la situation est optimisée en terme d'implémentation des mesures (contrôle du process, optimisation de l'utilisation des biocides et mise en oeuvre des mesures au point de rejet), le tout dans le cadre des critères normaux des MTD sur les mesures de réduction (Cf. 4). Le résultat de l'évaluation ci-dessus représente la solution la plus proche de l'objectif CPE/CSEP = 1. Les autres additifs appropriés (avec moins de conséquences sur l'environnement) ne sont pas disponibles. Pour cette raison, cela peut être considéré comme une MTD pour les installations existantes.

VIII.2.3 Exemple de proposition de méthode d'évaluation locale

[tm004, Baltus and Berbee, 1996] et [tm149, Baltus et al, 1999]

Un exemple a été élaboré ci-dessous selon la méthode qui a été discutée à la réunion du GTT du 29 au 31 mai à Séville, et décrite depuis lors dans la proposition d'évaluation des biocides de l'Annexe VII du présent BREF.

Selon le plan de la proposition, il est possible de distinguer trois étapes majeures :

1) La SÉLECTION DES BIOCIDES :

La sélection des biocides est un choix spécialement conçu pour chaque système de refroidissement, et normalement est le résultat de discussions expertes entre les opérateurs des installations et les fournisseurs de produits chimiques. La méthodologie de benchmarking décrite dans l'Annexe VII du présent document peut représenter un outil de prise en charge complet lors de la sélection des biocides. Il faut noter que le résultat de cette étape est uniquement une première identification des priorités relatives aux biocides possibles. Les étapes suivantes 2 et 3 peuvent fournir un ordre de préférence différent des biocides possibles.

2) L'ÉTAPE D'OPTIMISATION :

L'étape d'optimisation inclut les techniques de process, de dosage et de contrôle ainsi que la purification de l'eau d'appoint, la filtration d'un flux partiel externe et des mesures de contrôle du process telles qu'une fermeture temporaire de la purge d'un système à recirculation.

3) L'ÉVALUATION LOCALE :

L'évaluation locale est la dernière étape de l'évaluation des biocides, et elle fournit aux opérateurs d'installation, aux fournisseurs de produits chimiques et aux organismes réglementaires un critère leur permettant de déterminer dans quelle mesure les opérations, les techniques et mesures de contrôle doivent être appliquées pour respecter les NQE locales.

À titre d'exemple, la situation suivante a été élaborée : un système de refroidissement à recirculation doit être traité avec des produits chimiques pour empêcher l'encrassement microbologique du système de refroidissement. Les dimensions du système sont présentées dans la Figure VIII.3.

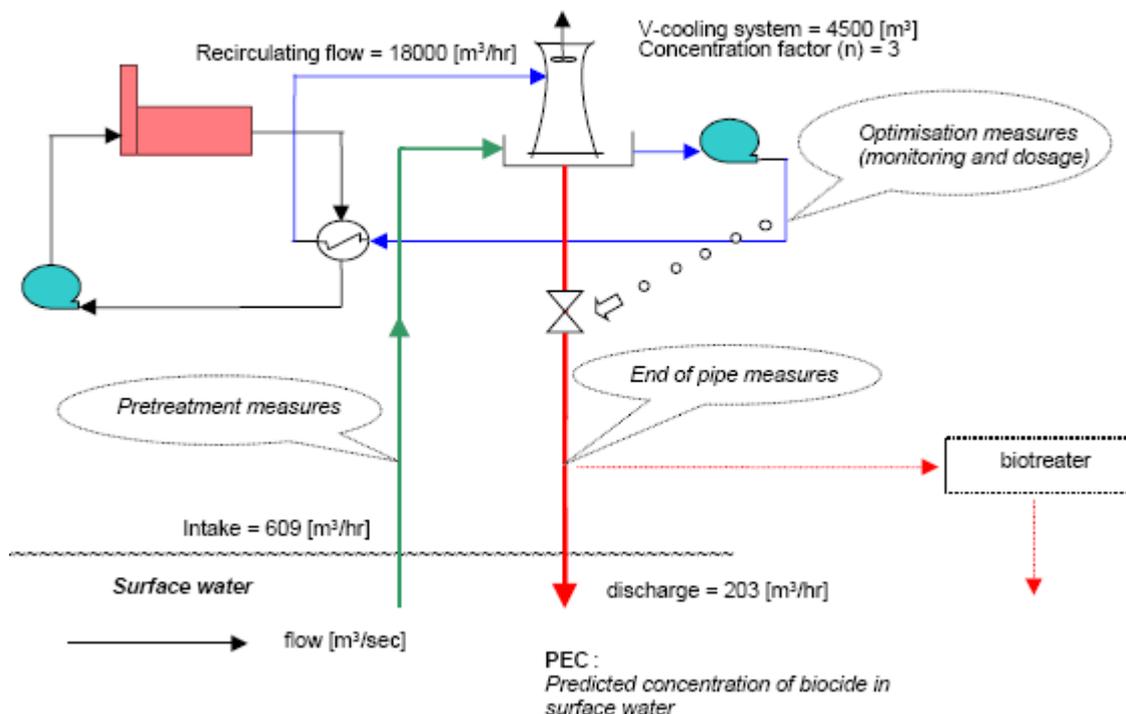


Figure VIII.3 : Représentation schématique d'un système de refroidissement à recirculation avec exemple de données pour une méthode de sélection locale de produits chimiques destinés aux systèmes de refroidissement

Dans cet exemple, il est supposé que le résultat de l'étape 1 (méthode d'évaluation comparative) a permis de sélectionner l'hypochlorite en combinaison avec la dibromonitrilopropionamide (DBNPA).

L'optimisation, en termes de suivi approprié et de dosage de l'hypochlorite, indique que la concentration moyenne dans l'effluent ne doit pas dépasser une concentration égale à 0,2 mg de FO/l. Pour le biocide non oxydant DBPNA, l'optimisation des résultats induit un dosage choc à une concentration de 4 mg/l (fréquence : une fois par jour).

La DPBNA est un additif qui s'hydrolyse facilement dans l'eau ($\tau_{1/2} = 2$ heures). Cette propriété de l'additif peut représenter un avantage dans la réduction des émissions à partir du système de refroidissement, mais aussi améliorer l'utilisation efficace du biocide. En fermant la purge pendant et après le dosage, pendant une certaine durée, la concentration du biocide sera réduite dans le système. Dans ce cas particulier, lorsque la DPBNA est envisagée, la fermeture temporaire de la purge fournit une option supplémentaire (optimisation) permettant de réduire la quantité de biocides rejetée dans l'environnement. Du point de vue des opérateurs, la question est : dans quelle mesure sera-t-il possible de fermer la purge du système à recirculation afin de réduire la concentration de la DBPNA par hydrolyse à un niveau suffisant, sans entraver les bonnes performances opérationnelles du système de refroidissement ? Ce niveau suffisant est une concentration de DPBNA dans l'effluent, entraînant une concentration dans la réception (CPE : concentration prévisible dans l'environnement) qui ne dépassera pas la NQE.

Dans le tableau suivant, la concentration prévisible de DBNPA dans plusieurs types d'eau de surface est calculée, et dans la dernière colonne, le pourcentage de réduction requis pour respecter la NQE de ces eaux de surface a été déterminé.

Tableau VIII.3 : Concentrations prévisibles de DBNPA dans différentes eaux de surface pour cet exemple

Situation : Système de refroidissement à recirculation; volume de purge : 203 m ³ /heure ; biocide utilisé : DBPNA ; dosage : choc (quotidien) : Concentration : 4 mg/l ; NQE : 7 µg/l.							
Eau de réception	Dimensions				Dilution après rejet	CPE [ug/l]	Réduction nécessaire [%] pour respecter les NQE
	Débit [m³/sec]	Largeur [m]	Profondeur [m]	Vitesse [m/sec]			
Rivière de taille moyenne	25	50	2,6	0,192	110	36,4	80,5
Rivière de grande taille	262	125	3,8	0,552	770	5,2	0
Petite rivière/Ruisseau	1	10	1,5	0,067	10	400	98,5
Grand canal	40	200	6	0,033	92	43,5	83,9
Petit canal	2	25	2	0,04	14	286	97,6
Fossé	0,15	5	1	0,03	3	1 333	99,5
Lac	-	-	1,5	0,01	3	1 333	99,5

Le Tableau VIII.3 indiquent qu'un déversement direct entraîne un dépassement de la NQE pour la plupart des eaux de surface sélectionnées. Seul un déversement de l'effluent dans une rivière de grande taille entraîne une concentration acceptable de DBPNA dans l'eau de surface.

Pour cet exemple, la CPE est calculée à l'aide d'un modèle qui est généralement accepté aux Pays-bas, et qui est utilisé par les autorités pour une évaluation de l'impact local après détermination de la MTD de façon plus générale (approche combinée). Le modèle hollandais repose sur les équations de Fisher. La CPE est calculée à une distance égale à 10 fois la largeur du système de l'eau de réception, avec un maximum de 1 000 m (pour les lacs, à une distance de ¼ du diamètre). Il est prévu que la majorité des États membres auront leur propre méthodologie, ou utiliseront les facteurs de dilution de différents types de receveurs afin de définir la CPE.

La norme de qualité environnementale de la DBPNA est calculée en fonction de la méthodologie qui a été décrite dans l'Annexe V de la Directive-cadre sur l'eau. Les données répertoriées dans le tableau ci-dessous entraînent une NQE de la DBNPA égale à 7 µg/l (une CSEO et 3 données aiguës entraînent un coefficient de sécurité de 100 ; concentration la plus basse /100 → 7 µg/l [1]).

Tableau VIII.4 : Données écologiques de la DBNPA

Paramètre	Concentration
LC-50 (poisson) 96 heure	2 [mg/l]
CIM (algues)	2 [mg/l]
LC-50 (crustacés)	0,7 [mg/l]
CSEO (poisson)	4 [mg/l]

La fermeture temporaire de la purge du système représente une option efficace pour optimiser l'utilisation des biocides et pour diminuer la charge de biocides rejetée lorsque des additifs facilement dégradables sont utilisés. Le tableau ci-dessous présente le *temps* nécessaire à la réduction des émissions de biocides pour que la NQE puisse être respectée dans l'eau de surface après déversement. La dernière colonne de ce tableau indique les conséquences de la fermeture de la purge en termes d'augmentation de la concentration en sel dans l'eau en recirculation.

Tableau VIII.5 : Conséquences de la fermeture de la purge

Situation : DBPNA du biocide : $k = 0,3 \text{ [sec}^{-1}\text{]}$; $\tau_{1/2} = 2 \text{ heures}$; $C_0 = 4 \text{ [mg/l]}$; $C = C_0 * \exp (Qv/V+k)*t \text{ [1]}$; $V =$ volume du système $\text{[m}^3\text{]}$; $Qv =$ déversement $\text{[m}^3\text{/heure]}$; $t =$ temps [heure] .			
Eau de réception	Réduction nécessaire [%]	Durée de fermeture nécessaire de la purge [heure]	Remarques
Rivière de taille moyenne	80,5	3,7	Augmentation de la concentration en sels : facteur 1,2
Rivière de grande taille	0	0	
Petite rivière/ Ruisseau	98,5	10,7	Augmentation de la concentration en sels : facteur 1,8
Grand canal	83,9	4,3	Augmentation de la concentration en sels : facteur 1,2
Petit canal	97,6	9,7	Augmentation de la concentration en sels : facteur 1,7
Fossé	99,5	14,2	Augmentation de la concentration en sels : facteur 2,5
Lac	99,5	14,2	Augmentation de la concentration en sels : facteur 2,5

En fonction des spécificités de chaque situation, les conséquences mentionnées ci-dessus en terme de concentration de la fraction inerte (sels) doivent être évaluées pour savoir si ces dernières sont acceptables. D'autre part, il est toujours possible d'anticiper ces conséquences par le biais d'une purge supplémentaire avant le dosage et la fermeture, permettant de générer des concentrations plus basses de la fraction inerte dans le système de refroidissement.

Mesures supplémentaires :

Si la NQE ne peut pas être respectée, il est nécessaire d'évaluer si des biocides alternatifs devraient être envisagés et/ou si d'autres mesures peuvent être prises.

Exemples de mesures :

- Prétraitement de l'eau de refroidissement utilisée (filtration d'une partie du flux en externe)
- Optimisation par l'amélioration du dosage et du monitoring
- Traitement au point de rejet, par exemple traitement de la purge dans le traitement biologique

ANNEXE IX EXEMPLE DE MODÈLE POUR L'ESTIMATION DES ÉMISSIONS DE BIOCIDES DANS LA PURGE

RIZA a conçu un modèle simplifié pour estimer le déversement des biocides d'une tour de refroidissement ouverte par voie humide [tm004, Baltus en Berbee, 1996]. Ce modèle suppose que :

- la façon principale d'éliminer les biocides se produit par la purge et par volatilisation, adsorption etc.
- cette purge est très petite par rapport à la quantité d'eau en circulation
- le pH et la température sont constants
- avec un dosage choc, la concentration initiale est la même dans tout le système de refroidissement immédiatement après le dosage
- l'hydrolyse est une réaction chimique de premier ordre et le facteur de dissociation obtenu est connu
- le volume de la purge est bien plus petit que le volume du débit d'eau en recirculation

À partir de ces hypothèses, qui simplifient légèrement la réalité des choses, l'équation suivante pourrait permettre de calculer la fraction d'un biocide qui sera finalement libéré dans l'environnement récepteur :

$$\text{Fraction (\%)} = \Phi_v \times 100 \% / (\Phi_v + kV)$$

Φ_v = purge (m³/heure)

k = facteur de dissociation (heure⁻¹) (k=0 si les substances ne se dissocient pas)

V = volume du système (m³)

On suppose que la différence entre 100 % de la substance et la fraction réellement libérée est hydrolysée. Partant du principe qu'aucune autre réaction chimique ne survient, ce modèle peut être considéré comme décrivant le pire des cas. Il est réaliste de prévoir que le pourcentage de biocides réellement émis soit inférieur au résultat de ce modèle. Il est important de reconnaître que cela représente juste un modèle permettant d'évaluer approximativement le déversement, et qu'il ne fournit aucune information sur la toxicité de la purge. En particulier, dans le cas des biocides largement hydrolysés, les substances obtenues peuvent être encore plus nocives que le traitement d'origine.

Le facteur de dissociation (k) est essentiel car c'est une mesure de la vitesse à laquelle un biocide disparaît du système par dissociation. Si cela se produit dans un délai très court, il peut être utile de fermer la purge et d'attendre le moment où la concentration du biocide atteint son niveau le plus bas. Pour empêcher que trop de sel ne soit présent dans le système, l'eau du système doit être adoucie juste avant le dosage. La purge doit être ouverte après quelques heures pour empêcher l'augmentation des concentrations en sels. Il est évident que cela fonctionne mieux avec des biocides à hydrolyse rapide qu'avec des biocides à hydrolyse lente. Les biocides à hydrolyse rapide sont par exemple le β -brome- β -nitrostyrène ou le DBNPA. Les biocides à hydrolyse lente sont par exemple les isothiazolines.

Certains résultats liés à l'utilisation de ce modèle ont montré qu'avec un pH de 8 et des températures comprises entre 25 et 40 °C, les biocides peuvent toujours être persistants et émis dans la purge pour plus de 80 %. Le pourcentage des biocides à hydrolyse rapide dans la purge semblait nettement inférieur (25 %). Il ne faudrait pas en conclure qu'ils sont plus favorables, car leur toxicité ou la toxicité de leurs produits de dissociation peut être très élevée, et ainsi créer une situation encore moins favorable dans l'eau réceptrice.

ANNEXE X COÛTS D'INVESTISSEMENT ET D'EXPLOITATION RELATIFS À L'ÉQUIPEMENT ET AUX ÉLÉMENTS DES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT POUR LES APPLICATIONS AUTRES QUE LES CENTRALES ÉLECTRIQUES

[tm001, Bloemkolk, 1997]

Dans cette annexe, certaines des données présentées concernent les investissements des grands systèmes de refroidissement industriels. Dans la pratique, les prix varieront largement, comme l'indiquent les gammes de prix. Pour les systèmes plus petits (en série), les coûts d'investissement et d'exploitation seront à nouveau différents, mais afficheront également une large variation. D'un point de vue général, les coûts d'investissement importants vont de pair avec des coûts d'exploitation plus faibles. Cela pourrait indiquer simultanément un impact plus faible sur l'environnement.

Pour chaque configuration, une indication du coût a été fournie. Toutefois, les calculs effectués sur les coûts des systèmes de refroidissement montrent une grande variété, et il peut être conclu que les différences de coûts entre les divers systèmes n'indiquent pas forcément la version la moins chère. Des différents facteurs qui influencent finalement les coûts globaux, les exigences des utilisateurs et les exigences légales à respecter sont très importantes. C'est pour cette raison qu'une estimation de la faisabilité d'un système ou l'application d'une technique doit être réalisée selon chaque cas. De plus, le prix de l'énergie doit être pris en compte, en particulier dans les cas où la récupération thermique est considérée comme jouant un rôle essentiel. Les coûts sont basés sur l'année 1995.

Un aspect primordial du calcul des coûts d'un système de refroidissement et des améliorations possibles concerne la comparaison entre les coûts d'investissement initiaux d'un système (ou d'une mesure appliquée) et les coûts annuels obtenus. Dans la pratique, des coûts d'investissement élevés peuvent entraîner une réduction des coûts de maintenance, mais aussi une augmentation des coûts fixes annuels, ce qui peut représenter un obstacle aux investissements. À titre de comparaison, le coût doit être exprimé par rapport à la puissance thermique pour laquelle le système est conçu (kW_{th} ou MW_{th}).

Éléments et coûts

Pour les applications industrielles (autres que les centrales électriques), de nombreux éléments qui déterminent les coûts ont été répertoriés dans le Tableau X.1 pour les systèmes à refroidissement par eau et par air, afin de calculer les coûts totaux et de comparer les différents systèmes. Les coûts sont basés sur les niveaux tarifaires des différents composants d'un système de refroidissement. Dans la même référence, les coûts et les variations de coûts des différents éléments des systèmes de refroidissement ont été décrits.

Coûts fixes

Les coûts des échangeurs de chaleur dépendent de leurs type, matériaux et dimensions. Les échangeurs de chaleur à plaques sont moins chers que les échangeurs à tubes et calandre, même dans un matériau plus onéreux comme le titane, mais ils sont limités dans leur niveau de pression autorisé. Les condenseurs sont environ 25 % plus chers que les échangeurs de type tubes et calandre. Les matériaux tels que l'acier inoxydable et le Cu-Ni sont plus chers que l'acier (de 2 à 5 fois). Les tubes spéciaux peuvent être de 10 à 15 % plus chers. Les coûts des refroidisseurs à air dépendent principalement de la surface d'échange thermique et du type de ventilateur. La température finale requise est également un facteur décisif. Le matériau de l'échangeur d'un aéroréfrigérant est généralement moins important que dans les systèmes à refroidissement par eau, mais cela dépend également de la corrosivité de la substance à refroidir.

Les coûts des conduites et de la distribution varient considérablement avec le diamètre, le matériau et la longueur.

Les fournitures pour les arrivées et sorties dépendent fortement de leur situation. La longueur, le diamètre et la construction des tubes d'alimentation et de drainage peuvent en particulier déterminer le niveau des coûts. Un niveau de coût d'environ 13 000 euros par MW était indiqué pour une installation d'une puissance de 300 MW. Ces coûts resteront relativement élevés pour les installations plus petites.

Les systèmes de refroidissement à eau sont équipés de pompes afin de pomper l'eau environnante. Les systèmes indirects possèdent deux circuits d'eau de refroidissement et nécessitent donc des pompes supplémentaires. Les investissements en matière de pompes varient selon la charge, la puissance et le matériau. Plus l'eau de refroidissements est propre, plus le choix des matériaux requis est facilité.

Les prix des tours de refroidissement dépendent fortement du modèle et des dimensions. La suppression du panache peut être nécessaire, auquel cas les investissements en matière de tours de refroidissement seront 1,5 à 2 fois supérieurs. Les bacs de collecte de l'eau font également partie de l'installation de la tour de refroidissement.

Le prix d'une tour de refroidissement dépend en partie de l'espace souhaité pour l'installation. Une approche plus petite de la tour de refroidissement entraîne une augmentation de la taille et du prix de la tour de refroidissement, tant en matière d'investissement pour la tour de refroidissement elle-même qu'en consommation énergétique. Le tableau ci-dessous le décrit avec un exemple.

Coûts variables

Les coûts variables des systèmes de refroidissement dépendent fortement du système. Les facteurs de coûts les plus importants sont (en 1995) :

- l'énergie (0,05-0,06 euro par kWh),
- l'eau souterraine, incluant les prélèvements, les taxes et le pompage (0,09-22 euros par m³),
- l'eau souterraine à l'exception du pompage (0,09-0,11 euro par m³),
- y compris les prélèvements et les taxes sur l'eau potable (0,4-1,4 euro par m³),
- dans certains cas, des produits sont également utilisés, par exemple de l'eau de rivière floculée ou une condensation élevée. Ces coûts sont inférieurs à ceux de l'eau achetée.

Les paramètres opérationnels déterminants des systèmes de refroidissement à eau sont l'énergie des pompes et, dans le cas d'une tour de refroidissement, le ventilateur complémentaire et le supplément d'eau. De plus, le traitement de l'eau de refroidissement s'ajoutera à ces coûts, mais celui-ci varie en fonction du traitement associé au système de refroidissement. Les systèmes à passage unique nécessitent seulement généralement le contrôle du bioencrassement, alors que les systèmes à recirculation nécessitent des agents dispersants et anticorrosion supplémentaires.

Les coûts d'exploitation des systèmes de refroidissement par voie sèche se composent principalement de coûts énergétiques. Les coûts énergétiques des aéroréfrigérants proviennent de l'utilisation de ventilateurs. Les coûts de maintenance des aéroréfrigérants représentent de un tiers à la moitié de ceux des systèmes de type tubes et calandre.

Méthodologie

Différentes méthodologies ont été développées pour comparer les coûts entre les différents systèmes de refroidissement. L'approche suivante est utilisée comme exemple, mais d'autres méthodes reposent sur le même principe. Cette méthode n'est pas précise dans l'absolu et, en d'autres termes, elle ne vise pas à être utilisée pour fournir des estimations d'investissement sûres. Cependant, elle est adaptée pour comparer les coûts d'investissement des différents systèmes de refroidissement.

Pour les différents systèmes, les facteurs de coûts universels doivent être ajoutés et peuvent être exprimés sous la forme d'un pourcentage fixe des coûts d'installation de l'équipement (Coûts Directs du Domaine, CDD). Ces facteurs et les pourcentages associés dans cet exemple se présentent comme suit :

- coûts indirects (5 % des coûts d'investissement)
- coûts d'ingénierie (8 % des coûts d'investissement)
- coûts imprévus (15 % des coûts d'installation de l'équipement)

Les coûts d'investissement et les facteurs de coûts représentent les coûts d'investissement totaux (CIT).

Les coûts annuels représentent le total des coûts fixes (intérêts + amortissements) et des coûts variables (exploitation). Il faut garder à l'esprit qu'un investissement plus important entraîne non seulement une augmentation des coûts fixes annuels, mais qu'il peut également être un obstacle à l'investissement. Les coûts de maintenance sont également inclus dans les coûts annuels.

Comparaisons

En fonction des éléments ci-dessus, l'investissement pour les différents systèmes de refroidissement a fait l'objet d'un calcul et d'une comparaison. Un calcul a également été effectué pour les coûts d'exploitation associés. Le total est récapitulé dans le Tableau X.2. En calculant les coûts annuels, la période d'amortissement à un certain intérêt doit être appliquée. Les coûts d'exploitation font également l'objet d'un calcul. Les coûts de maintenance annuels sont basés sur les coûts d'investissement totaux (CIT).

Tableau X.1 : éléments de coûts pour les systèmes de refroidissement par eau et par air

[tm001, Bloemkolk, 1997]

Type de coûts	Éléments de coûts	Systèmes de refroidissement par eau	Systèmes de refroidissement par air
Fixes	Échangeur(s) de chaleur (type, dimensions et modèle)	X	x
	Échangeur de chaleur (matériau)	X	x
	Canalisations du process, ponts tubulaires	X	x
	Pompes/Pompes de réserve	X	x
	Équipement d'alimentation	X	
	Alimentation/Drainage des canalisations	X	
	Équipement de sortie	X	
	Tour(s) de refroidissement (possible)	X	x
	Ventilateurs	X	x
	Insonorisation	X	x
Variables	Systèmes indirects (échangeur de chaleur, tubes, pompes supplémentaires)	X	x
	Eau (souterraine, du robinet)	X	
	Taxe de déversement de l'eau	X	
	Contrôle des fuites	X	x
	Conditionnement de l'eau	X	
	Consommation électrique (pompes et ventilateurs)	X	x
	Entretien	X	x

Les calculs ont montré que le niveau d'investissement et la consommation d'énergie déterminent en grande partie la sensibilité des coûts. La variation des coûts entre les différents échangeurs de chaleur (de type tubes et calandre), due à la configuration sélectionnée et au choix du matériau, est primordiale. Les matériaux et les modèles bon marché déterminent les limites inférieures calculées, et les matériaux spécifiques déterminent la limite supérieure. Il ne faut pas oublier que les matériaux de grande qualité peuvent considérablement diminuer les coûts d'entretien et d'exploitation ainsi que l'utilisation de produits chimiques.

Calculés sous forme de coûts annuels, les coûts d'investissement et d'exploitation diffèrent fortement. Des facteurs tels que le besoin en eau (d'appoint), le prix et la consommation d'énergie sont fortement influents. Le choix du matériau a également des conséquences pour les coûts d'exploitation annuels. En appliquant un refroidissement par voie sèche, la température finale qui peut être obtenue est importante. En outre, plus la température finale requise est basse, plus le système de refroidissement à air devient cher. Avec le refroidissement à eau, une température finale basse influence moins les estimations de coûts sauf si des faibles approches sont utilisées dans le calcul.

Tableau X.2 : Indications des coûts des systèmes de refroidissement par eau et air des applications industrielles, à l'exception des centrales électriques (1993-1995)
[tm001, Bloemkolk, 1997]

Systeme	Installation x 1 000 (euros/MW _{th})	Investissement total x 1 000 (euros/MW _{th})	Investissement déterminé par	Coûts d'exploitation x 1 000 (euros/MW _{th})	Intérêts et amortissement ⁶ x 1 000 (euros/MW _{th}) par an	Total général des coûts annuels (euros/MW _{th})
Passage unique (plage : 0,2–10 MW _{th}) (plage > 10 MW _{th}) vers les éléments - échangeurs de chaleur ² - tuyaux, etc. - pompes - alimentation/purge	68–182 34–91 68 (36–136) 9,1–14 4,5–9,1 (9,1–14)'		- matériau, modèle - longueur, matériau - capacité, DP - - situation (alimentation/dr ainage)	- énergie 4,5–6,8 - conditionnement 0,5–1,8 - entretien 2,7–7,7		
Total	59–173	77–227		7,7–16	10–30	18–46
Passage unique indirect	18–50 ^{2,3} (supplémentaire)		échangeurs de chaleur supplémentaires échangeurs de chaleur supplémentaires			
Total		100–269		10–19	13–37	23–56
Tour ouverte humide à recirculation (plage : 0,2–1 MW _{th}) (plage > 1 MW _{th}) vers les éléments - tour de refroidissement - échangeurs de chaleur - tubes/pompes	59–136 45–68 18–45 ⁴ 36–136 14–23		- modèle - matériau, modèle - matériaux des échangeurs de chaleur	- supplément 6,3–22 - énergie 6,5–13 - entretien 2,3–9,1 - conditionnement 1,8–4,5		
Total	68–203	89–266		19–41	11–35	30–76
Recirculation indirecte avec tour ouverte humide	18–45 ^{2,3} (supplémentaire)		échangeurs de chaleur supplémentaires pompes supplémentaires	- énergie 9,3–16 - entretien 2,7–11 - conditionnement 1,8–4,5 - supplément 6,3–22		

Systeme	Installation x 1 000 (euros/MW _{th})	Investissement total x 1 000 (euros/MW _{th})	Investissement déterminé par	Coûts d'exploitation x 1 000 (euros/MW _{th})	Intérêts et amortissement ⁶ x 1 000 (euros/MW _{th}) par an	Total général des coûts annuels (euros/MW _{th})
Total	86–255	112–331		20–43	14–43	34–86
Refroidissement par voie sèche						
Direct			température de fin ⁸	- énergie 1,4–5,4 - entretien 1,4–3,45		
Total	81–220	105–288		2,8–8,8	14–38	17–47
Indirect	supplémentaire 14– 45 ^{2,3}		température de fin ⁸	- énergie 3,6–8,9 - entretien 1,8–5,4		
Total	95–266	123–351		5,4–14,3	16–46	21–60

1. Cf. texte
2. Coûts relatifs à l'échangeur de chaleur supplémentaire en fonction du type
Facteurs de coûts généraux des matériaux :
 - acier 1 spécial (par alliage Cu/Ni) 1,5–5
 - acier traité 1,3–1,7 cuivre 1,5–2
 - rvs 304/316 1,5–3 titane 1,7–2,5
3. Le coût dépend de l'échangeur de chaleur et des pompes supplémentaires ainsi que de la distribution ; souvent des échangeurs de chaleur de type plaques.
4. Le système est d'un facteur 2–2,5 fois plus cher avec la suppression du panache de vapeur.
5. Coûts d'entretien : 3,5 %; pour le refroidissement par air 1–1,5 %
6. Suppose un amortissement à un taux de 5 %, lorsque les coûts fixes annuels s'élèvent à environ 13 % des investissements (annuités).
7. Nombre d'heures d'exploitation par an : 8 000
8. Limite de prix supérieure pour les fonctions de refroidissement jusqu'à 30 °C ; limite de prix inférieure pour 60 °C
9. Aucune donnée de coût connue

ANNEXE XI EXEMPLES DE TECHNIQUES À CONSIDERER DANS L'APPROCHE MTD PRIMAIRE POUR LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT

XI.1 Introduction

De nombreuses options sont disponibles pour réduire les effets des systèmes de refroidissement industriels sur l'environnement. L'objectif de l'approche générale consiste à assurer une protection par une conception et une construction correctes qui, dans le cas des nouveaux systèmes de refroidissement industriels, sont généralement plus simples à mettre en œuvre que dans les systèmes existants. L'application des mesures de réduction dépend de la configuration de refroidissement ainsi que des limites liées au site, comme l'espace disponible. Les autres facteurs tels que la consommation électrique, les exigences opérationnelles et l'économie joueront également un rôle important. En fonction de l'approche générale, présentée au Chapitre 1 et appliquée dans le cadre de la réduction des conséquences sur l'environnement, telle que décrite dans le Chapitre 3, cette Annexe explique plus en détail les techniques et les solutions alternatives. Les techniques peuvent être envisagées lors de l'optimisation des systèmes de refroidissement dans le sens de l'approche MTD.

La liste est une vue d'ensemble des informations plus détaillées sur plusieurs techniques de réduction avancées par le GTT dans le cadre de l'échange d'informations sur les MTD des systèmes de refroidissement industriels. Pour chaque technique qui a été signalée par le GTT, une brève description est fournie, suivie par l'effet de réduction (quantitativement/qualitativement), les effets croisés, les limites des dimensions des installations, les coûts ainsi que les installations de référence. Comme pour l'évaluation de la technique de refroidissement appropriée, l'application de l'une des techniques présentées ci-après devra être évaluée à la lumière de la configuration de refroidissement utilisée ou planifiée. Puisqu'il est possible de sélectionner plusieurs techniques pour un objectif environnemental identique, leurs performances écologiques et leur applicabilité technique devraient être les critères de choix initiaux, suivis des coûts d'investissement et de maintenance, ainsi que des effets croisés sur les autres domaines environnementaux. En règle générale, pour nombre de techniques décrites, ni les données de coût, ni les effets croisés ne sont disponibles, et ils nécessitent de plus amples recherches.

Il convient de veiller à l'application et à la faisabilité des techniques. Les résultats environnementaux obtenus sont atteints sous certaines conditions au niveau du process, et ne fournissent aucune garantie pour des résultats quantitatifs semblables dans un environnement avec un process différent. Ces résultats sont utiles pour illustrer l'orientation de l'amélioration. Dans le cas des systèmes de refroidissement industriels en particulier, les exigences du process ainsi que la taille et le fonctionnement des systèmes de refroidissement varient largement, et auront des conséquences sur les résultats de toute mesure de réduction qui soit appliquée.

XI.2 Économies d'eau de refroidissement par réutilisation de l'eau

L'utilisation d'eau pour le refroidissement est, ou peut être, restreinte d'une manière générale ou temporaire selon les variations de disponibilité saisonnières, créant ainsi une pénurie périodique. Dans plusieurs États membres européens, la pression s'accroît sur l'industrie pour limiter et optimiser son utilisation d'eau. Ainsi, l'accent a été mis sur un changement de technologie ainsi que sur le remplacement des systèmes à passage unique par des systèmes de refroidissement à recirculation (si possible), ou sur le fonctionnement de leurs tours de refroidissement à recirculation avec des cycles de concentration élevés. D'autres options couramment appliquées dans les tours de refroidissement sont les éliminateurs de gouttes.

De plus, de nombreuses options de traitement de l'eau peuvent consister à récupérer l'eau utilisée, puis à la préparer en vue d'une réutilisation dans le cycle de refroidissement. Certaines politiques visent également à augmenter la part du refroidissement par voie sèche, puisque cela ne nécessite pas d'eau et ne présente donc aucun des problèmes associés, alors que d'autres considérations peuvent limiter cette option (climat, coûts d'investissement, espace).

Une revue des méthodes de traitement a mis au jour les options suivantes [tm065, Meier and Fulks, 1990] :

- Adoucissement à la chaux à froid
- Adoucissement par procédé à chaud
- Concentrateurs d'saumure
- Traitement biologique
- Osmose inverse
- Electro Dialyse Reverse (EDR)
- Bassins d'évaporation

Parmi ces options, l'osmose inverse et l'Electro Dialyse Reverse sont des procédés qui consomment beaucoup d'énergie et qui se révèlent donc relativement onéreux. L'adoucissement par procédé à chaud est très efficace, mais il a pour inconvénient de nécessiter un refroidissement ou une récupération thermique supplémentaire. Le traitement biologique est utilisé pour retirer la matière organique de l'eau, et il est particulièrement intéressant s'il fait parti du programme de traitement de l'effluent pour réutilisation en eau d'appoint. Les bassins d'évaporation sont une méthode simple de réduction des effluents de l'installation. Leurs besoins en taille et leurs limites en matière de rejet des boues peuvent interdire leur utilisation.

XI.2.1 Réutilisation de l'eau (résiduelle) comme eau d'appoint pour les tours de refroidissement

[tm066, Phillips and Strittmatter, 1994] et [tm064, Meier, 1990]

Description

L'eau à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation peut être utilisée comme eau d'appoint pour les tours de refroidissement. Les effluents du process du même site tout comme les effluents des installations municipales de traitement de l'eau peuvent être appliqués. La chimie de l'eau est importante. Une analyse de l'eau peut fournir un bilan hydrique complet de chaque partie de l'installation. Cette analyse devrait donner des informations sur la chimie de l'eau dans les tours, les cycles de concentration, l'indice de temps de séjour, la vitesse, la métallurgie du système, les températures, la chimie du traitement en cours et les performances d'exploitation. Parfois, l'eau doit être d'abord filtrée et une large gamme de méthodes de filtration peut être appliquée, mais elle n'est pas abordée dans le périmètre de ce document.

La chimie de l'eau décide du traitement chimique requis dans la tour de refroidissement pour conserver le nombre de cycles. Une augmentation du niveau de corrosion a en particulier été signalée. Dans certains cas, le facteur de concentration restrictif peut être optimisé à l'aide d'inhibiteurs de tartre pour augmenter le nombre de cycles de concentration, ou à l'aide de techniques telles que l'osmose inverse permettant de supprimer les solides dissous.

Réduction

Le pourcentage de réduction dépend largement de la demande du système de refroidissement à recirculation et de la disponibilité de l'eau réutilisable au moment requis. Des pourcentages allant jusqu'à 15 % furent rapportés.

Effets croisés

Il est possible que les déchets, tels que les résidus de filtre issu de la filtration de l'eau avant son utilisation, doivent être rejetés. L'économie réalisée en termes d'utilisation de l'eau douce devra être évaluée par rapport aux coûts environnementaux et financiers liés à l'utilisation supplémentaire d'additifs pour conditionner les eaux usées. Le traitement chimique du flux à réutiliser peut-être très complexe et nécessiter une main-d'œuvre supplémentaire pour faire fonctionner le système.

Limites de l'application

La réutilisation de l'eau est facultative pour les installations nouvelles et les installations existantes, indépendamment de leur taille même si, pour les demandes plus importantes, l'apport de ressources en eau alternatives peut ne pas être suffisant. Le contenu organique (DBO) peut être un facteur restrictif devant faire l'objet d'un contrôle.

Coûts

Les indications de coûts varient largement et sont relativement spécifiques à l'installation. Aucune donnée indicative n'est connue.

Installations de référence

Il fut démontré que pour les raffineries, les eaux usées municipales peuvent être réutilisée comme eau d'appoint [066, Phillips and Strittmatter, 1994]. Un exemple d'application avec une purge nulle est décrit dans [tm064, Meier, 1990].

Considérations

Les problèmes généraux qui peuvent être rencontrés lors de l'utilisation de flux de déchets sont :

- Une activité microbiologique supérieure à cause des nutriments dissous
- Une augmentation du risque d'entartrage à cause d'un niveau supérieur en sels dissous
- Des problèmes d'encrassement suite à des niveaux élevés de fer et/ou de solides suspendus
- Des problèmes de corrosion à cause de niveaux élevés de solides dissous totaux (SDT)

Les possibilités de rencontrer les problèmes susmentionnés dépendent de la composition des flux de déchets. Les eaux résiduelles municipales diffèrent considérablement dans leur qualité (en général, elles contiennent des niveaux relativement élevés d'ammoniac et de phosphate en plus de niveaux significatifs de matière organique dissoute). De plus, elles sont généralement caractérisées par une dureté relativement élevée, pouvant être à l'origine de tartre. Des niveaux élevés de fer et/ou de solides suspendus peuvent entraîner des problèmes d'encrassement. L'effluent total d'une raffinerie peut contenir du fioul lourd et de la graisse ainsi que des niveaux de solides en suspension qui peuvent augmenter la demande en biocides oxydants.

XI.2.2 Système à déversement nul

[commentaire, D]

Description

Un système de refroidissement étagé est utilisé pour supprimer tout déversement liquide depuis la purge de la tour de refroidissement.

La purge depuis la tour principale permet de maintenir l'équilibre des sels dans les limites de la pratique opérationnelle correcte. L'eau avec un niveau élevé de sels hautement insolubles (sels de calcium) est convertie en eau avec un niveau élevé de sels hautement solubles (sels de sodium). Ce procédé a lieu dans un adoucisseur réacteur/décanteur.

Ensuite, la purge s'écoule vers un concentrateur à membrane à osmose directe (OD) qui extrait l'eau de la purge à travers les membranes dans une saumure. La saumure est à nouveau concentrée dans une tour de refroidissement secondaire, appelée tour de refroidissement à saumure, à l'aide de la chaleur perdue du condenseur principal comme source d'énergie. Le débit d'eau de la tour de refroidissement à saumure sera nettement inférieur à celui de la tour principale. Un rapport courant entre le flux de saumure et le flux principal est de 1 pour 750.

Le concentré du système à membrane à DO est plus important dans un petit cristalliseur, dans lequel les solides sont extraits et rejetés hors site. Le déversement liquide du cristalliseur est recyclé dans la tour à saumure.

Réduction

La réutilisation de l'eau de la purge principale s'élève à environ 75 %, et la partie principale s'évapore dans la tour de refroidissement secondaire (environ 16 %), ou est contenue comme humidité résiduelle dans le déversement des solides. L'utilisation de chaleur perdue dans la tour de refroidissement à saumure réduit la charge de refroidissement sur la tour principale, avec environ 3,5 MW à une purge de 45m³/heure.

Effets croisés

La charge de refroidissement est moindre sur la tour principale. De l'énergie est nécessaire pour faire fonctionner le système de refroidissement étagé. Les émissions de la purge ne sont pas rejetées dans une eau de surface réceptrice, mais transformées en déchets qui nécessiteront d'être éliminés.

Limites de l'application

Le système sera efficace avec des limites environnementales rigoureuses en matière de rejet des eaux usées. Ce système est une option pour les nouvelles centrales électriques et usines chimiques, mais il peut être une option de retrofit pour les installations existantes.

Coûts

L'investissement pour ce système est supérieur à celui des tours de refroidissement par voie humide autonomes. Les investissements d'une tour de refroidissement par voie humide avec ce système sont apparemment considérablement inférieurs à ceux d'un système refroidi par air de la même puissance. Les coûts d'exploitation concernant les besoins énergétiques peuvent être inférieurs grâce à l'utilisation de la chaleur perdue du condenseur principal. Les coûts d'exploitation du système de refroidissement étagé et les coûts d'élimination des rejets solides doivent être évalués par rapport aux coûts environnementaux de conditionnement et de déversement des eaux usées.

Installations de référence

Aucune installation de ce type n'existe au sein de la Communauté européenne. Cependant, on trouve de telles applications aux États-Unis.

Considérations

Dans les technologies classiques de réutilisation de l'eau (par exemple, les concentrateurs à saumure), la saumure à haute température qui est produite est extrêmement corrosive, entraînant le besoin en matériaux exotiques et des problèmes d'entretien permanents. Dans le système décrit, la basse pression (environ 1,5 bar) et le fonctionnement de l'OD à des températures basses (inférieures à 32 °C) permettent d'utiliser du PVC HDPE et d'autres matériaux non corrosifs dans des zones où la corrosion peut représenter un problème. D'autres

expériences montrent que le cristalliseur est plus petit que dans les systèmes classiques. Ces deux aspects entraînent une diminution de l'entretien.

Le fonctionnement est simple et ne nécessite aucune formation spécialisée. Aucun traitement biologique supplémentaire n'est requis.

Seule une prise de conscience locale est nécessaire si les coûts environnementaux liés à l'absence de déversement dépassent les coûts environnementaux liés au rejet de l'eau.

XI.2.3 Bassins d'aspersion

[tm154, Besselink et al, 1999]

Description

Les bassins d'aspersion étaient auparavant utilisés pour refroidir l'eau de refroidissement, et certains sont sans doute encore utilisés en Europe. À l'heure actuelle, des recherches sont menées sur l'applicabilité des bassins d'aspersion dans le cadre d'une utilisation industrielle pour réduire les rejets de chaleur et pour économiser l'eau. Une étude de faisabilité aborde l'utilisation d'un bassin d'aspersion et les économies d'énergie par rapport à une tour de refroidissement avec une capacité de 18 à 21 MW_{th}. Un modèle a été développé, calculant le rendement du refroidissement d'un bassin d'aspersion en fonction des conditions climatiques, des dimensions des buses de l'atomiseur et des caractéristiques du bassin d'aspersion (surface, qualité de l'eau). Grâce à ce modèle, il devrait donc être possible de concevoir le bassin d'aspersion requis pour toutes les conditions locales spécifiques.

Tout ou partie du flux de l'eau de refroidissement est mené vers un bassin par le biais des buses d'aspersion. L'aspersion permet le refroidissement et théoriquement, l'efficacité du refroidissement d'un bassin d'aspersion est environ 36 fois plus élevée que celle d'un bassin de refroidissement. Les bassins d'aspersion refroidissent par évaporation, conduction et convection. L'évaporation est plus importante à des températures d'air élevées, mais la conduction et la convection sont supérieures sous des conditions climatiques froides. La capacité dépend de la surface, des conditions climatiques (vitesse du vent) ainsi que des caractéristiques des buses d'atomisation et de l'aspersion. La dissipation thermique d'un bassin d'aspersion efficace peut s'élever à 722 J/m²K.

Réduction

Les résultats du système de refroidissement étudié indiquent une économie d'énergie potentielle par rapport à la consommation énergétique d'une tour de refroidissement pouvant s'élever à environ 6,5 kW_e par MW_{th} de refroidissement. Cela équivaut à une diminution des émissions de CO₂ d'environ 38 tonnes par MW_{th} par an.

Effet croisé

Par l'utilisation du spray des aérosols apparaissent. Ils jouent un rôle primordial dans la prolifération de la contamination biologique. C'est pour cette raison (et en particulier pendant l'été) que l'exploitation d'un bassin d'aspersion nécessite un programme de traitement de l'eau adapté.

Application

Un manque d'espace suffisant sur le site limitera les options du bassin d'aspersion en fonction de la capacité requise du système de refroidissement. Pour les grands systèmes, cela peut ne pas être une option pour l'ensemble, mais seulement pour une partie du besoin en eau de refroidissement, et cela peut réduire l'alimentation en eau. Aux États-Unis, plusieurs centrales électriques classiques (d'une capacité maximale de 500 MW_e) utilisent des bassins d'aspersion, et les centrales nucléaires les utilisent pour le refroidissement d'urgence.

Coûts

Les investissements relatifs aux bassins d'aspersion sont légèrement avantageux par rapport aux investissements relatifs aux tours de refroidissement, s'ils comprennent les coûts de l'alimentation électrique, mais aussi si l'on prend en compte les coûts d'achat de terrains. La différence est plus importante si l'achat de terrains n'est pas pris en compte, mais cela dépend bien entendu de leur prix.

Tableau XI.1 : Investissements et coûts énergétiques par MW_{th} pour un bassin d'aspersion et une tour de refroidissement

[tm154, Besselink et al, 1999]

Coûts	Bassin d'aspersion	Tour de refroidissement
Investissement (x1000 euros/MW _{th})	39 (25)	48
Énergie pour l'aspersion et des ventilateurs (kW _e /MW _{th})	4	11
Conception	Fiable	Fiable
Remarques :	Puissance de 18 à 21 MW _{th} Refroidissement compris entre 32 °C et 24 °C	

Installation de référence

Dow Europe, Terneuzen (Pays-Bas).

Considérations

Même si les modifications actuelles sont basées sur une technique existante, des recherches sont toujours en cours. Dans ces circonstances, l'application pourrait être particulièrement intéressante lorsque les restrictions en rejet de chaleur peuvent entraîner des restrictions dans la puissance de production, ce qui se produit avec les centrales électriques pendant les mois d'été. De plus, un bassin d'aspersion peut être envisagé en cas de restrictions croissantes sur l'utilisation de l'eau souterraine.

XI.2.4 Stockage froid

[Commentaire-1, Belgique]

Description

Le stockage de l'eau souterraine est une application spéciale pour l'utilisation industrielle de moindre envergure afin de réaliser le refroidissement. À ce niveau, l'eau souterraine, qui est réchauffée après son utilisation, est stockée dans un emplacement souterrain adjacent où elle est refroidie sur une longue période de temps. Il est également possible de refroidir l'eau hors sol (à l'aide de refroidisseurs par air en hiver par exemple). Après cette opération, l'eau est stockée sous terre avant d'être utilisée (en été). Cette application est principalement utilisée lorsque le refroidissement est nécessaire à un niveau d'environ 6-9 °C.

Réduction

La réduction des coûts d'exploitation et d'énergie s'élève à 40 à 80 % de moins par rapport à l'utilisation de petites tours de refroidissement.

Effet croisé

Inconnu.

Limites de l'application

L'application devient intéressante au-dessus d'un minimum de 150 kW et en plus du refroidissement avec des tours de refroidissement pour une application industrielle. Le refroidissement de plusieurs MW a déjà été atteint. Mais son utilisation est actuellement limitée. Exemples d'application : construction de logements publics et horticulture sous serre.

Coûts

Aucune indication.

Installation de référence

Non disponible.

Considérations

Cette technique est toujours en cours de développement. Une application industrielle complète n'a pas été mentionnée.

XI.3 Réduction des émissions par l'optimisation du traitement de l'eau de refroidissement

Dans l'introduction au paragraphe sur les économies réalisées en eau de refroidissement, plusieurs traitements ont été listés pour la préparation des effluents à une réutilisation dans les systèmes de refroidissement à recirculation. Les mêmes techniques pourraient être appliquées à l'eau d'une source naturelle afin d'optimiser la chimie hydrique tout en réduisant le besoin d'un important programme de traitement de l'eau. Comme nous l'avons déjà expliqué, l'application est fortement liée à la chimie de l'eau et à la demande du système de refroidissement.

XI.3.1 Biofiltration d'un courant latéral externe dans un système de refroidissement ouvert à recirculation

[tm 146, Savelkoul, 1999]

Description

Pour de nombreuses raisons, il est intéressant d'un point de vue économique de faire fonctionner un système de refroidissement ouvert à recirculation à un niveau de purge minimum. Cependant, cela entraîne une augmentation de l'activité biologique dans l'eau de refroidissement, souvent traitée par l'application de biocides. Parmi d'autres facteurs, l'activité et la prolifération biologiques dépendent principalement de la disponibilité en nutriments. Quel que soit le système de refroidissement, la circulation de l'eau ou le climat, l'activité biologique ne survivra pas en cas de pénurie de nutriments. Par conséquent, chaque traitement vise à réduire la prolifération biologique en supprimant les nutriments dissous du circuit d'eau de refroidissement. Pour un traitement efficace, le volume mort (ou le volume du circuit) du système de refroidissement est essentiel. En effet, c'est le volume mort qui est traité dans un filtre et qui est donc chloré à une fréquence et des niveaux bas.

Cette opération peut être effectuée en appliquant un filtre à sable continu sur un courant latéral externe décomposant les nutriments dissous tout en filtrant les micro-organismes en suspension et les autres solides dissous. Par conséquent, une quantité inférieure de chlore est nécessaire et des cycles de concentration supérieurs sont possibles. Cette technique peut être améliorée en créant une biologie active dans le filtre à sable avec une concentration élevée en micro-organismes, qui est appelée biofiltration du courant latéral. Pour maintenir une biologie active, il faut éviter d'utiliser les filtres à sable lors des périodes enregistrant des niveaux de concentration de biocides (chlore) élevés dans le circuit de refroidissement, car ces niveaux élevés pourraient détruire la biologie dans le filtre à sable ainsi que ses effets dans l'eau de refroidissement. Dès que le niveau de chlore est réduit, l'eau de refroidissement passe à nouveau dans le filtre à sable. Dans le fond, cela signifie que l'eau de refroidissement nécessite uniquement de passer par le filtre un nombre de fois limité, jusqu'à une ou deux fois par jour seulement.

L'application a été effectuée sur un système ouvert à recirculation avec une capacité de 152 MW_{th}, une circulation d'eau égale à 11 000 m³/heure et un volume de circuit de 3 500 m³. Le système est composé de deux filtres de 5 m² et d'environ 10 kg de VSS/m³ de filtre, de 4 m de hauteur de lit filtrant et dotés d'un sable de filtration de 1,4-2 mm et de 0,8-1,25 mm. Le modèle était basé sur le mécanisme de réaction de la suppression des nutriments de premier ordre avec un taux de réaction constant de 6/heure (= pour le sable de 0,8-1,25 mm, donc 3 800 m²/m³) et de 4,5/heure (= pour le sable de 1,4-2 mm, donc 2,250 m²/m³) dans le filtre à sable. Cela a permis de réduire considérablement le taux de prolifération des organismes du côté de l'effluent du filtre par rapport à l'eau circulante.

Réduction

Les réductions ainsi obtenues dépendaient de l'optimisation de la combinaison de la purge, de l'utilisation des biocides et de l'application de la biofiltration du courant latéral. Par exemple, le fonctionnement du filtre à sable dépend de l'écoulement latéral, de l'écoulement de l'eau de lavage, de la circulation du sable, de la résistance du filtre et de la température de l'eau. L'efficacité du filtre est réduite par un écoulement plus grand (pression hydraulique plus élevée), qui est semblable à un temps de contact plus faible, et par l'utilisation de particules sableuses plus grandes, signifiant une surface spécifique plus petite.

Les résultats montrent une augmentation du facteur de concentration (5 à 5,5) avec une réduction simultanée de la fréquence de dosage du Cl de moins d'une fois tous les deux jours (0,42/jour). Cela signifie une diminution de la purge de 12 %, une réduction de l'alimentation en eau de 2,4 % et une diminution de l'utilisation d'additifs de 12 % ou de sept fois moins de chlore pour le même effet. Grâce au dosage plus faible en chlore, le niveau des éléments corrosifs (exprimé comme la somme du chlore et du sulfate) reste dans la fourchette requise pour ce système (max. Cl⁻ de 86 ppm et HSO₄ de 77 ppm respectivement). Cela explique la réduction de 12 % ainsi obtenue par la purge grâce au biofiltre, reposant sur la même corrosivité de l'eau.

Effet croisé

Si le point de départ de l'application de la biofiltration du courant latéral consiste à réduire la quantité de chloration, tous les autres résultats mentionnés sont considérés comme des effets croisés positifs. Les données sur les besoins énergétiques supplémentaires des pompes n'ont pas été mentionnées.

Un équipement de pompage distinct est évité, et les performances du biofiltre sont optimisées en envoyant directement l'eau de refroidissement de l'effluent vers le filtre du courant latéral, et cet effluent est directement envoyé du filtre vers le bassin de la tour de refroidissement. Une partie de l'effluent chaud contourne de facto le garnissage de la tour de refroidissement et réchauffera le bassin de la tour de refroidissement avec en moyenne 0,15 K, soit l'équivalent d'une augmentation de l'utilisation énergétique indirecte de $0,5 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$. Une pompe distincte, permettant de transporter l'effluent du biofiltre vers la colonne de la tour de refroidissement dans laquelle la pression statique s'élève à 14 mwg, peut éviter cet inconvénient. En moyenne, $1\frac{1}{2} \text{ m}^3/\text{heure}$ par $\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$ doit être pompé, ce qui représente l'équivalent d'une consommation énergétique directe de $0,1 \text{ kW}_e/\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$ ou $0,25 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$ (avec un rendement de 40 % de la centrale électrique). Cela est également assez limité par rapport à l'utilisation énergétique (in)directe standard des procédés de la tour de refroidissement.

L'économie d'énergie basée sur la diminution de la consommation d'hypochlorite de sodium est également très limitée (1 litre de solution à 15 % par jour par $\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$ est l'équivalent de la « production » oxydante de 1 kW_{th} pour une heure par jour par $\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$ ou $0,04 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$). L'économie d'énergie, basée sur la réduction de l'appoint grâce à une purge réduite de 12 % de $0,04 \text{ m}^3/\text{heure}$ par MW_{th} , est également négligeable, même si la réduction de la consommation d'énergie pour le transport de l'eau d'appoint est comprise.

En règle générale, le bilan énergétique net de toutes ces différences énergétiques dues au biofiltre sont négligeables. Il est de l'ordre de 1 % de la consommation énergétique directe standard des procédés d'une tour de refroidissement de $20 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th de refroidissement}}$ (Cf. le Tableau 3.2). Ces chiffres relativement bas sont logiques car seulement 1 à 2 % du flux de circulation de l'eau de refroidissement est généralement nécessaire pour que le biofiltre évite tout micro-encrassement dans les échangeurs de chaleur.

Limites de l'application

Avec une mise à jour technologique correspondante pour la capacité du filtre, aucune limite ne semble exister pour l'application. Elle peut être appliquée aux systèmes de refroidissement existants.

Coûts

Les coûts dépendent de taille de l'application ainsi que des résultats obtenus en réduction des coûts d'exploitation. Les coûts d'exploitation de la chloration ont été réduits de 85 %. Pour l'exemple cité, la période de retour sur investissement prévue a été estimée de trois à quatre ans.

Installation de référence

DSM, Geleen (Pays-Bas) et Dow Benelux, Terneuzen (Pays-Bas).

Considérations

La filtration d'un courant latéral externe a été intentionnellement conçu pour une élimination des nutriments à rendement faible, en sélectionnant une vitesse linéaire élevée de 25 m/heure, au lieu de la norme comprise entre 10 et 14 m/heure normalement appliquée uniquement pour l'extraction des matières en suspension. Des taux d'extraction des nutriments élevés seront obtenus avec un filtre à lit de sable à contre-courant si l'influent est au moins supérieur à 200 RLU comme ATP (= unités de comptage de colonies exprimés comme la diminution de l'adénosine triphosphate), et de préférence 600 RLU comme critère de démarrage du dosage de l'hypochlorite de sodium. Cela se produit en même temps que des vitesses linéaires élevées afin d'empêcher l'apparition de conditions anaérobiques.

Les critères de chloration de la tour de refroidissement, sans biofiltration d'un courant latéral, consistaient à diminuer de moitié les micro-organismes de 500 à 250 RLU comme ATP par le biais d'une réaction de premier ordre (= $0,5 [1/\text{heure}]$), ce qui a été obtenu avec 1 litre de solution d'hypochlorite de sodium de 15 % par MW_{th} pour chaque dosage choc.

La charge organique sur le lit filtrant s'élève à 10 kg de substances organiques par m^3 de lit filtrant. Avec une durée de contact souhaitée de 10 minutes, il devient nécessaire de concevoir une hauteur de sable de 4 m, qui influence moins le coût d'investissement que l'agrandissement du diamètre du filtre. La surface du filtre s'élevait à 1 m^2 par $15 \text{ MW}_{\text{th}}$, ce qui entraîne un flux de filtration de $1,7 \text{ m}^3/\text{heure}$ par MW_{th} , et cela est presque égal au taux d'évaporation de $1,3 \text{ m}^3/\text{heure}$ par MW_{th} , avec une légère diminution de la purge de $0,3 \text{ m}^3/\text{heure}$ à cause du filtre installé. En fait, chaque goutte d'eau de refroidissement en circulation passe dans le filtre du courant latéral 1,7 fois par jour. Ce faisant, la demi-vie de l'eau de l'intégralité du système du refroidissement diminue de 40 à 7 heures. En parallèle, le taux de purge diminue de 12 %, tout comme les produits chimiques de conditionnement et la fréquence de la chloration qui diminuent considérablement, passant de 3 fois par jour à seulement une fois tous les 2,4 jours. La

corrosivité de l'eau de refroidissement en circulation, exprimée comme la somme du chlore et du sulfate, reste la même.

En se basant sur ce modèle, et pour la plupart des tours de refroidissement existantes en Europe, le résultat sera le passage du volume mort d'eau connu 1 à 2 fois par jour par le filtre sous forme d'eau chaude. Cela se produira en parallèle d'un dosage choc limité d'1h d'un biocide oxydant, seulement deux fois par semaine. Une surface de filtre de 1 m² seulement par 15 MW_{th} devrait suffire dans la plupart des cas, avec un filtre de 4 m pour créer un temps de séjour de plusieurs minutes. Dans une situation courante, la réduction de l'utilisation d'eau et de produits chimiques permet d'obtenir un délai de rentabilité de 3-4 ans pour l'investissement du filtre du courant latéral. Les autres couches filtrantes comme le basalte devraient permettre d'utiliser des filtres encore plus petits par MW_{th}.

XI.3.2 Méthodes physiques

Les dispositifs de nettoyage des systèmes refroidis par de l'eau peuvent effectuer un nettoyage en marche (ou continu), comme l'utilisation de balles en caoutchouc-éponge ou de brosses, ou un nettoyage manuel en utilisant par exemple des jets à haute pression ou des racleurs par les tubes du condenseur. Plus le nettoyage est efficace et plus l'application de produits chimiques dans l'eau de refroidissement devient inutile, non seulement parce que l'encrassement de la surface des tubes est supprimée de façon mécanique, mais également parce que les additifs appliqués seront plus efficaces car ils pourront atteindre plus facilement la surface. Il a été rapporté que le nettoyage mécanique pouvait être considéré comme une condition nécessaire à l'utilisation d'un programme de contrôle du macro-encrassement.

Le nettoyage des systèmes de refroidissement par voie sèche est limité aux surfaces ailetées de la surface d'échange. Le nettoyage doit être effectué pour garantir le maintien du transfert de chaleur (évitant également les émissions indirectes) et la longévité des serpentins.

Le Tableau XI.2 contient de nombreuses méthodes physiques permettant de lutter contre le macro-encrassement ainsi que des expériences du secteur. [005, Van Donk and Jenner, 1996]

- Réduction de l'entraînement du (bio)encrassement dans le système. Les structures d'admission doivent être conçues de telle façon que l'entraînement de poissons, débris, matières organiques et inorganiques (notamment les matières en suspension) soit maintenu au minimum. De plus, la filtration du courant latéral peut se révéler être une option dans les systèmes ouverts à recirculation.
- Maintien des vitesses à un niveau suffisamment élevé pour éviter la fixation des organismes organiques (vitesse supérieure à 2 m/sec). Cependant, des vitesses trop élevées peuvent présenter un risque de corrosion. Les vitesses critiques de l'eau dépendent fortement du type de matériau utilisé.
- Une hausse soudaine de la température en augmentant la température de l'eau de refroidissement au-delà de 40 °C pendant quelques dizaines de minutes. Cette technique permet d'éliminer les organismes qui sont fixés (moules), mais elle nécessite une conception appropriée du système de refroidissement (recirculation de l'eau de refroidissement). De plus, elle limite la capacité de refroidissement du système, et peut uniquement être appliquée lors d'une interruption du process si ce dernier ne peut pas résister à cette hausse de la température.
- Le revêtement et les peintures non toxiques qui réduisent la fixation des organismes, renforcent l'effet de vitesse et simplifient le nettoyage.
- L'utilisation de la technologie sonore. Le principe sous-jacent à l'application du son est que la vibration créée par l'énergie associée à la transmission sonore permettra de supprimer les dépôts sur les surfaces en « secouant » le dépôt.
- Choc osmotique. Cette méthode physico-chimique applique le choc osmotique sur des systèmes à eau de mer ou à eau douce, en les soumettant respectivement à l'eau douce et à l'eau de mer. Ainsi, les cellules des organismes peuvent subir les effets de la pression interne, pouvant entraîner la mort.

Tableau XI.2 : Techniques physiques pour réduire l'utilisation de biocides (dérivées de [tm005, Van Donk and Jenner, 1996])

Technique	Équipement	Expérience pratique	Possibilités/Restrictions
Filtration/ Prétraitement de l'eau	Macro-encrassement : tamis rotatifs, tamis bandes, grilles, tamis à moules	Oui, dans une centrale électrique	Pour les systèmes de refroidissement à passage unique et à recirculation
	Micro-encrassement : tambour rotatif et filtres à sable	Oui, dans l'industrie chimique	Pas pour les grands systèmes à passage unique
	Micro-encrassement : microfiltres à contre-courant continu (50-100µm)	Oui, dans une usine de désalination	Pour les débits d'eau jusqu'à 4 m ³ /sec
Filtration d'un courant latéral	Filtres à sable rapides	Oui, dans l'industrie chimique	Seuls les systèmes à recirculation
	Filtres à contre-courant continu	Oui, dans l'industrie du verre	Tous les biocides Le filtre peut devenir une source de bactéries supplémentaire
Nettoyage en marche	Balles caoutchouc-éponge	Oui, dans les centrales électriques	Grands systèmes à passage unique Pas pour les systèmes ouverts à recirculation
	Brosse et système de cage	Limitée, dans l'industrie chimique et dans les centrales électriques	Systèmes de refroidissement à passage unique et à recirculation
Nettoyage manuel		Oui, dans les centrales électriques et dans l'industrie	Nécessite une double disposition ou des arrêts réguliers du fonctionnement
Traitement thermique	Macro-encrassement : 38-40 °C	Oui, dans les systèmes à eau de mer et à eau douce	Option limitée aux nouveaux systèmes, nécessitant une conception spéciale.
	Micro-encrassement : 70-80 °C	?	Remplacement des biocides
Revêtements et peintures	Revêtements toxiques	Variable	Basée sur le zinc et le cuivre, l'utilisation peut être restreinte par rapport au micro-encrassement et au macro-encrassement
	Revêtements non toxiques	Centrales électriques aux USA	Pour les nouveaux systèmes. réduction de l'encrassement.
Lampe à UV		Tests à petite échelle	Technique de prévention supplémentaire du contrôle du bioencrassement chimique dans les systèmes de refroidissement à recirculation
Technologie sonore		Non, seulement des résultats de tests	Coûts énergétiques élevés
Traitement électrique de l'eau	Transformateur de fréquence élevée	Non, seulement des résultats de tests	Résultats des tests dans un petit système industriel
Choc osmotique		Oui, dans un système à passage unique à l'aide d'eau de mer	Les matériaux doivent être résistants à la corrosion Le système à eau douce peut se corroder s'il est traité avec de l'eau de mer

XI.3.3 Optimisation de l'usage des biocides

XI.3.3.1 Monitoring

[tm005, Van Donk and Jenner, 1996]

Pour le contrôle du micro-encrassement, on utilise la technique de la numération sur plaque et de la mesure de l'ATP. Pour le contrôle du macro-encrassement, on utilise des panneaux d'exposition ou des vitrages. Le tartre et la corrosion influencent indirectement l'utilisation des biocides. Par conséquent, le contrôle de l'apparition de ces effets peut également être essentiel pour mesurer l'apparition du bioencrassement. Les exemples de techniques de contrôle cités en référence sont les dispositifs KEMA Biofouling® Monitor ainsi que les dispositifs robotiques immergés équipés de vidéo qui permettent de détecter le macro-encrassement ainsi que les effets liés au traitement des biocides. Pour des mesures plus précises, en particulier pour le micro-encrassement et le traitement par biocides, on applique des techniques à l'aide de fonctionnalités telles que le mouvement de clapet et l'émission de micro-organismes spécifiques pour leur mécanisme métabolique. Un exemple des deux techniques est fourni afin d'illustrer ce principe, mais de nombreuses autres techniques sont présentes sur le marché.

XI.3.3.1.1 Contrôle du macro-encrassement

[tm157, Jenner e.a., 1998]

Pour pouvoir cibler le dosage des biocides afin de lutter contre le macro-encrassement dans les systèmes à passage unique, un système de contrôle du bioencrassement a été développé. Le dispositif KEMA Biofouling® Monitor se compose d'un conteneur cylindrique fermé en PVC, doté d'un flux d'eau vertical du haut vers le bas. Il peut être utilisé pour contrôler tous les organismes de macro-encrassement dans les systèmes à eau douce, eau saumâtre et à eau de mer. Il permet d'effectuer une observation directe et des comptages hebdomadaires et mensuels des colonies de naissains de bivalves. Les naissains sont les larves métamorphosées des dernières phases larvaires des bivalves (appelées « pédivéligères »). Pour obtenir des informations appropriées sur le développement du macro-encrassement dans le système de refroidissement, il est recommandé de placer un contrôleur de bioencrassement au niveau de l'alimentation, avant le point de dosage, ainsi qu'un autre à un point critique du système de refroidissement, après le point de dosage.

Lorsque le contrôleur est installé parallèlement à une conduite d'eau de refroidissement en by-pass, c'est un outil efficace pour détecter le macro-encrassement possible dans le système de refroidissement. La vitesse de l'eau dans le contrôleur est nettement inférieure à celle dans le système de refroidissement. Cela permet de bénéficier d'un environnement de colonies optimal pour les naissains de bivalves, tout en simplifiant l'inspection de la colonisation, de la prolifération et de l'efficacité des mesures de contrôle. En fonction des informations du moniteur, l'application de biocides peut être limitée aux périodes où elle est réellement nécessaire. D'autres recherches sur le comportement des organismes peuvent permettre également de cibler la concentration du dosage des biocides.

D'autres techniques sont appliquées, comme les plaques immergées, à proximité des canaux d'entrée. Elles fournissent à l'opérateur de l'installation une indication des périodes où la chloration peut être évitée.

XI.3.3.1.2 Traçage des biocides pour l'activité des biocides et des microbes

[tm096, McCoy e.a., 1995]

Le système de diagnostic par traçage se compose d'un analyseur, d'un système de collecte des données, d'un logiciel d'analyse ainsi que d'un réactif luminescent. L'analyseur mesure le flux lumineux des micro-organismes. En quelques minutes, le test peut déterminer la concentration en biocide et l'activité biologique dans l'eau de refroidissement. Cette méthode repose sur le test biologique de la bioluminescence d'un ingrédient actif du biocide. Il vise à optimiser l'utilisation des biocides non oxydants dans les systèmes de refroidissement à recirculation en mesurant la consommation du système.

XI.3.3.2 Dosage du biocide

XI.3.3.2.1 Différents régimes de conditionnement pour obtenir une utilisation totale annuelle en oxydants optimale dans les systèmes à passage unique contre le macro-encrassement et le micro-encrassement

Pour éviter le macro-encrassement comme le micro-encrassement, des régimes de conditionnement différents peuvent être appliqués dans les systèmes de refroidissement à passage unique. Cela peut être une chloration de bas niveau réalisée en continu, en semi continu ou en discontinu, aussi appelée chloration choc, de deux fois une demi-heure par jour, une chloration ciblée dans une seule partie de l'échangeur de chaleur ou dans une

partie du système de refroidissement, une chloration par impulsion et une chloration par impulsion alternée. Les objectifs des différents régimes consistent à atteindre et à conserver un rendement énergétique élevé en utilisant des échangeurs de chaleur propres tout au long de l'année, et en réduisant en même temps les effets négatifs sur l'environnement.

L'évaluation environnementale de la chloration peut être divisée en deux catégories principales : les oxydants et les non-oxydants. Elles diffèrent dans leur risque écotoxicologique exprimé comme la durée de vie des composants, la bioconcentration et la toxicité envers les organismes aquatiques. Les non-oxydants comme les hydrocarbures chlorés sont persistants, et certains composants s'accumuleront dans les graisses des organismes aquatiques et présenteront une toxicité mutagène et cancérigène chroniques. Les oxydants réagissent rapidement avec les réducteurs, et seront uniquement disponibles pour l'anti-encrassement après le dosage sur-stœchiométrique. C'est seulement dans ces circonstances que le résultat du dosage est la toxicité aiguë, même à des concentrations basses, mais sans bioconcentration des oxydants libres.

La toxicité aiguë est ce qui est nécessaire dans le système de refroidissement, notamment dans les échangeurs de chaleur, pour éviter les colonies et pour garder les échangeurs de chaleur propres, mais cette toxicité est indésirable dans le rejet de l'eau de refroidissement.

Puisque même un régime continu de chloration de bas niveau possède un rapport CPE/CSEP très faible, le principal problème environnemental consiste à réduire la formation d'hydrocarbures halogénés, également appelés sous-produits chlorés, qui proviennent de l'utilisation inefficace de la masse oxydante. Toutefois, ces composants ne sont pas mesurés facilement sur une base régulière, voire continue, et ils ne possèdent aucune toxicité aiguë potentielle. C'est pourquoi les performances d'un régime de conditionnement sont contrôlées en termes d'oxydants libres, qui est également plus applicable sur une base de contrôle continue.

Tous les régimes de conditionnement oxydant ont comme point commun l'aspect suivant : la mesure en continue des oxydants libres est favorisée par le monitoring nécessaire des process. En parallèle, les eaux naturelles possèdent une limite et un seuil de détection minimums d'environ 0,1 mg/l ($\pm 0,05$ mg/l) en fonction de la technique d'analyse appliquée et des composants présents dans l'eau de refroidissement naturelle, n'ayant aucune contribution directe à l'effet du régime de conditionnement lui-même. Comme le chlore, tout comme les autres oxydants, est non sélectif et non spécifique et qu'il réagit avec presque tous les composants réductibles présents dans les eaux (naturelles) et avec le seuil d'analyse, cela peut expliquer pourquoi les régimes de conditionnement réussis utilisent au moins 0,2 mg/l d'oxydants libres avant les condenseurs.

La production d'hydrocarbures halogénés est une fonction presque linéaire de la masse oxydante dosée, quel que soit le régime de conditionnement.

Avec la comparaison des régimes de conditionnement à bas niveau discontinus et continus, il semble qu'un régime de conditionnement discontinu (avec une masse oxydante supérieure) provoque une concentration mesurable plus élevée des sous-produits halogénés. Si l'équilibre de masse est corrigé pour ces périodes où le dosage a été arrêté, la masse d'un régime discontinu émise chaque année peut-être encore plus faible que celle d'un régime à bas niveau continu. En effet, ce n'est pas le régime de conditionnement appliqué, mais c'est la qualité de l'eau qui influence la quantité minimale d'oxydant qui est nécessaire. Plus la concentration initiale en oxydants libres est élevée (nécessaire en cas de chloration discontinue), plus il convient de compenser pour une durée de contact inférieure afin d'atteindre les mêmes résultats de traitement. Cela ne signifie pas que la quantité d'oxydants nécessaire chaque année est supérieure, avec une quantité de sous-produits halogénés associée supérieure au niveau de la sortie. À cause du mélange dans l'eau réceptrice, une dégradation rapide se produit dans tout régime de conditionnement d'oxydants, de la toxicité aiguë ainsi que de la formation des sous-produits halogénés.

L'efficacité d'un régime de conditionnement est une association du niveau de toxicité aiguë temporaire, de la disponibilité et quantité des nutriments contenus dans l'eau ainsi que de l'absence du débit de filtre alimentant les organismes comme les huîtres et moules (ou les bivalves).

Il est nécessaire que la zone qui s'étend de la chambre des pompes aux échangeurs ainsi qu'aux zones stagnantes fasse temporairement l'objet d'une toxicité aiguë afin d'empêcher l'apparition de colonies dans les canalisations et les conduits de distribution d'eau et afin de garder les échangeurs de chaleur propres. Plus les périodes choisies sont courtes, plus la toxicité aiguë temporaire doit être élevée pour obtenir le même effet. Ou plus la durée de contact est longue, plus la toxicité aiguë nécessaire est basse pour atteindre le même résultat.

Tous les régimes de conditionnement oxydant ont en commun l'aspect suivant : ils bénéficient de la réduction de l'approvisionnement en nourriture du filtre alimentant les organismes comme les moules et les huîtres dans des conditions difficiles. Tous les régimes de conditionnement oxydant ont également en commun de l'aspect suivant : la colonie et la prolifération de naissains sont atténuées en les empêchant d'ouvrir leur coquille pendant des périodes de temps prolongées. Si elles doivent fermer leur coquille (ce qui est une capacité de fuite naturelle), les organismes passent en métabolisme anaérobie et vivent sur leurs réserves de nourriture. En fonction de leurs conditions et de la température de l'eau locale, elles peuvent survivre à de telles périodes de stress pendant plusieurs mois. Toutefois, les naissains ainsi que les jeunes de l'espèce évitent ces circonstances

par un deuxième comportement de fuite qui consiste à ne pas coloniser ou à détacher leurs fils de byssus, ce qui explique les éventuels échecs des régimes intermittents dans des zones spécifiques.

Les conditions favorables aux colonies et à la prolifération des naissains sont présentes dans les eaux eutrophiques que l'on trouve dans des régions côtières spécifiques et dont certains ports, et elles sont d'autant plus favorables que les températures de l'eau augmentent dans certaines limites. C'est pour cette raison que tous les régimes de conditionnement ont en commun l'aspect suivant : la chloration est inutile lorsque les nutriments sont rares à des températures d'eau basse (12 °C). Cependant, dans des zones spécifiques, le seuil s'élève à 10 °C grâce à la disponibilité en nutriments riches même à des températures relativement basses.

Toutes ces circonstances déterminent la concentration nécessaire en oxydants libres, mesurée avant ou directement après les échangeurs de chaleur, avec les intervalles de temps choisis entre les dosages intermittents.

Les régimes de conditionnement continu et discontinu montrent différents niveaux de chloration. Dans la plupart des eaux, si la prévention contre les colonies est réalisée avec une chloration de bas niveau continue à proximité de la chambre des pompes, le niveau d'oxydants libres avant les échangeurs de chaleur de 0,3 mg/l doit être maintenu. Il s'ensuit un niveau de 0,2 mg/l à la sortie, pouvant être généralement attendu dans les circuits d'eau de refroidissement avec un intervalle de 15 minutes. Cependant, dans les eaux riches en nutriments, le bioencrassement est si important qu'il est nécessaire d'avoir des concentrations en entrée plus élevées, et donc des concentrations en sortie plus élevées. Sporadiquement, ces concentrations peuvent atteindre des niveaux d'oxydants libres de 0,7 mg/l LO à la sortie pour préserver leur efficacité.

Avec un système d'eau de refroidissement à courant continu idéal, la chloration à bas niveau discontinu nécessitera des niveaux d'oxydants libres supérieurs pouvant atteindre 0,5 mg/l avant les échangeurs pour obtenir le même résultat, et elle entraînera automatiquement des concentrations temporaires en oxydants libres à la sortie supérieures. Insoluble, la production d'hydrocarbures halogénés sera également supérieure lors de ces dosages temporaires d'oxydants élevés. Les dosages choc à faible fréquence sont rarement effectués, reposant sur leur efficacité de conditionnement faible envers les bivalves. Pour récupérer, ces organismes utiliseront complètement les longues périodes de respiration. En général, les régimes intermittents appliqués aux eaux riches en nutriments sont uniquement efficaces s'ils sont appliqués aussi souvent que les dosages répétés de chlore afin de réduire la capacité de récupération des bivalves. Si ces périodes de non-dosage sont réduites à un quart d'heure, elles sont appelées chloration par impulsion. Les organismes l'interpréteront comme un régime de chloration continu car la fréquence ne fournit pas assez de temps aux moules et aux huîtres pour récupérer après leur exposition aux courtes périodes d'oxydation successives. Les intervalles de temps entre les périodes de dosage des oxydants ont une influence nettement plus importante sur le comportement de ces organismes que la concentration en oxydants libres dès lors que cette concentration est assez élevée pour produire un effet de stress initial sur les bivalves.

Si l'ensemble du système de refroidissement n'est pas un système à courant continu idéal, alors même des régimes de dosage à fréquence supérieure, appelés chloration par impulsion alternée (Section XI.3.3.2.2), peuvent être appliqués avec succès. Il bénéficiera de la disponibilité des réducteurs présents dans une partie de l'eau de refroidissement qui se mélangera juste avant le système de sortie avec l'eau de refroidissement qui est déjà chlorée. Point essentiel : une partie de l'eau de refroidissement oxydée aura un temps de séjour différent dans le système, et atteindra à des heures différentes l'eau de refroidissement non chlorée passée ou future, contenant encore des réducteurs. En réduisant les périodes de dosage de l'ordre de trois quarts du temps de séjour du système d'eau mécanique, un mélange de réducteurs/oxydants sous-stœchiométriques est alors créé dans la zone de sortie. En même temps, une condition de réducteurs/oxydants sur-stœchiométriques est créée entre le point de dosage et l'endroit où les différents débits d'eau de refroidissement se rencontrent. Pour résumer, le régime de conditionnement par impulsion (alternée) permet de réduire l'utilisation annuelle d'additifs, et est particulièrement efficace contre le macro-encrassement. Cependant, il peut produire des pics de concentration en oxydants libres à la sortie du système de refroidissement, qui ne respectent pas les niveaux d'émissions autorisés.

XI.3.3.2.2 Chloration par impulsion alternée dans les systèmes à passage unique

[tm153, Paping et al, 1999], [tm168, De Potter et al, 1996], [tm169, De Potter et al, 1997], [tm170, De Potter and Polman, 1999], [tm171, Polman, 2000]

Description

Pour un système à passage unique existant utilisant de l'eau de mer à des débits pouvant atteindre 11 m³/sec, plusieurs mesures ont été développées et sont appliquées dans le cadre d'un système intégré (« système global »). Le système se compose de 200 échangeurs de chaleur (principalement cuivre/nickel 90/10 et acier au

carbone traités) reliés par 4 km de conduits principaux. Un problème d'érosion-corrosion était principalement à l'origine de la défaillance du système due à un endommagement des canalisations (65 %). Les mesures ont permis de réduire le nombre de problèmes de fuite ainsi que la quantité de biocide appliquée. Dans la situation sous-jacente, l'hypochlorite avait été dosée comme traitement anti-encrassement. L'expérience sur le long terme a permis de conclure que c'est le biocide le plus approprié à ce système et à la qualité de l'eau de refroidissement disponible. Ainsi, aucun autre biocide n'était envisagé comme solution.

L'optimisation a été obtenue en appliquant différents niveaux de traitement par biocide. Les conséquences sur l'environnement des différents régimes ont été évaluées en mesurant et en comparant la quantité de sous-produits de chloration (principalement le bromoforme) et la toxicité potentielle formée. L'efficacité a été évaluée en observant :

- l'incidence des fuites sur les tubes des échangeurs de chaleur provoquées par les moules
- la quantité de prolifération biologique (attachement du macro-encrassement)
- le comportement du mouvement des valves des huîtres

Par conséquent, les régimes de conditionnement ont été améliorés. Il est important de réaliser que dans ce cas, on utilise les connaissances sur le biotope local, ce qui est essentiel pour obtenir la précision requise du traitement et des résultats associés.

Réduction

Les résultats de l'optimisation indiquent qu'une augmentation initiale de l'hypochlorite (dosage A) n'a pas réduit les problèmes de fuite en premier lieu, mais a pu supprimer presque entièrement le macro-encrassement du système, tel que les contrôleurs des moules ont permis de l'observer. Une fois que le système de refroidissement était propre, les niveaux d'hypochlorite réduits (dosage B et C) étaient appliqués au cours des années suivantes en supprimant complètement le macro-encrassement ainsi qu'en réduisant le nombre de fuites pour atteindre un nombre nul. La méthodologie appliquée peut permettre de maintenir le niveau requis en oxydants libres. Elle se base sur les connaissances du cycle de vie des espèces du macro-encrassement, des zones de micro-encrassement dans le système et des temps de séjour variables dans différentes parties du système de refroidissement.

En conservant des concentrations en oxydants basses pendant des périodes plus longues, les colonies et la prolifération des bivalves dans les conduites de distribution peuvent être évitées. Le dosage alterné à court terme à proximité des échangeurs de chaleur entraîne des concentrations temporairement élevées et peut contrôler le micro-encrassement. Le dosage sur-stœchiométrique est appliqué dans les zones de l'influent où la vitesse de l'eau diminue rapidement en formant des zones stagnantes. Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Tableau XI.3 : Effet de l'application d'un régime de dosage optimisé sur le nombre de fuites provoquées par des moules

[tm153, Paping et al, 1999]

Période	Régime	Nombre de fuites provoquées par des moules		Hypochlorite (tonne métrique/an)
		Unité 1	Unité 2	
Année 1	A	28	4	1 222
Année 2	A	28	12	2 095
Année 3	A+B	32	10	2 817
Année 4	B	16	1	2 480
Année 5	C	0	2	1 994
Année 6	C	0	0	2 013
Année 7	C + fréq.	1	0	1 805
Année 8	C + fréq.	0	0	1 330

C + fréq. = régime C avec fréquence supérieure (c'est-à-dire un dosage de 5 minutes par intervalle de 20 minutes)

Un régime de dosage plus ciblé est la chloration alternée par impulsion qui prend en compte la variation des temps de séjour dans différentes parties du processus (Figure X.1.). À différents moments et à différents points, les niveaux de chlore requis sont dosés suivant la configuration d'écoulement du débit de l'eau de refroidissement dans les différentes parties du process. À la fin du process et avant le rejet du débit d'eau de refroidissement, la dilution se produit par mélange des différents flux du process. Lorsqu'un flux seulement est chloré et que l'autre ne l'est pas, les oxydants libres sont réduits, et il est possible d'atteindre des niveaux d'émissions inférieurs à < 0,1 mg/l.

Effet croisé

Une forte chute de la fréquence des défaillances des échangeurs de chaleur a permis de réduire la maintenance et par conséquent, les périodes de non-production. Des échangeurs de chaleur plus propres ont permis d'augmenter le refroidissement et de réduire les émissions provenant du process de fabrication.

Limites de l'application

Le régime de conditionnement ne peut pas être appliqué aux systèmes à passage unique sans varier les temps de séjour de l'eau de refroidissement. Pour optimiser les intervalles de dosage, le système doit contrôler avec soin les niveaux en oxydants libres dans le système de refroidissement et les périodes de stress des bivalves requises.

Coûts

Les coûts de recherche s'élevaient à 1 million d'euros pendant les 5 premières années. La première installation de dosage s'élevait à 0,2 million d'euros et les modifications supplémentaires à 0,2 million d'euros, elles aussi. Le temps de retour de l'installation de dosage était de l'ordre d'un an et reposait sur les coûts suivants :

- réduction du niveau de coût pour l'entretien annuel et l'utilisation d'hypochlorite de sodium
- augmentation des coûts de maintenance préventive et conditionnelle annuelle
- coût d'analyses

Les coûts n'incluaient pas les coûts liés à la recherche car ces derniers étaient dépensés pour obtenir les connaissances fondamentales sur la chloration alternée par impulsion dans les systèmes à passage unique.

Installation de référence

Dow Europe, Terneuzen (Pays-Bas).

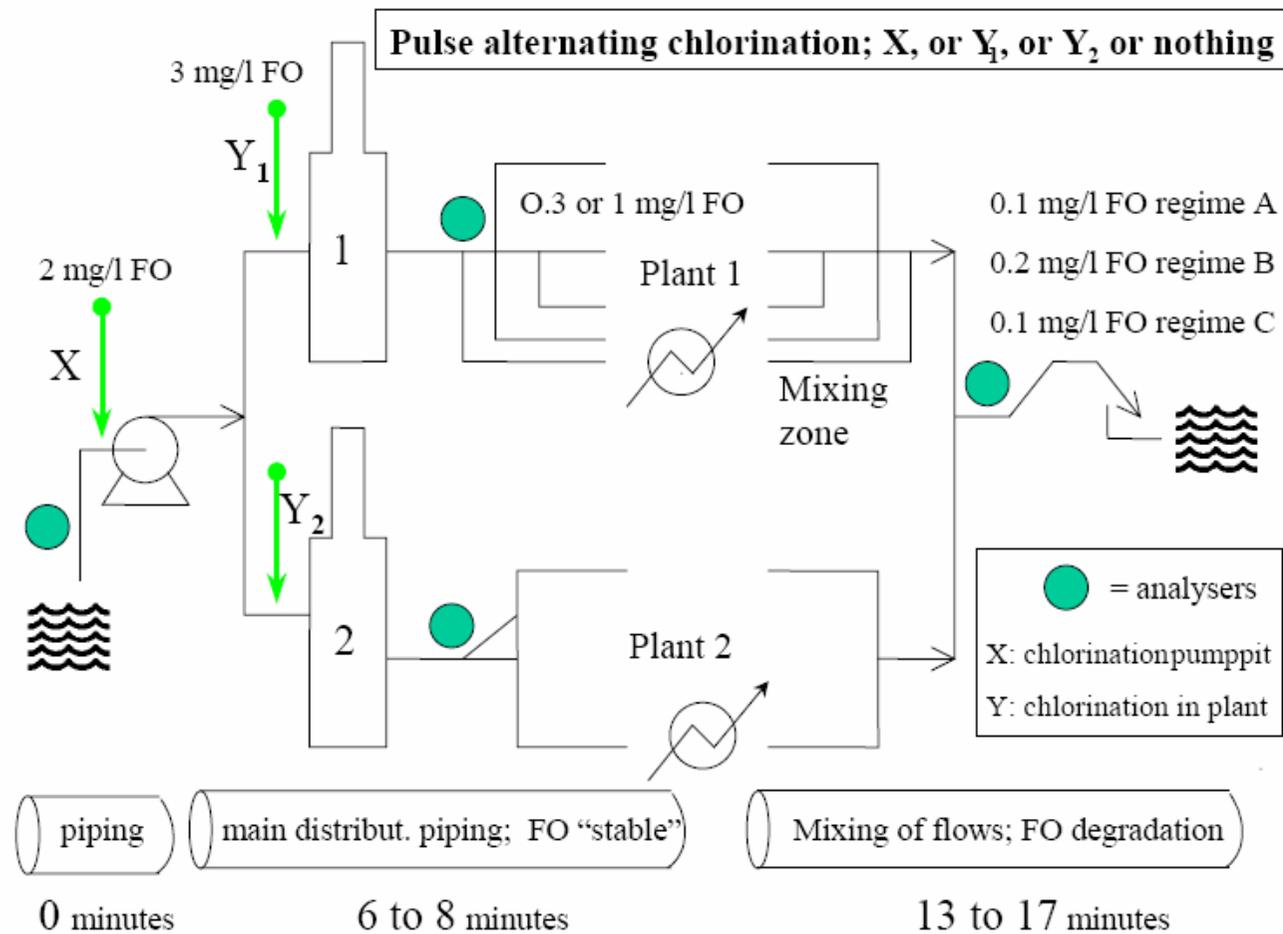


Figure XI.1 : Dosage optimisé d'hypochlorite (chloration alternée par impulsion) prenant en compte les caractéristiques de l'encrassement et du système de refroidissement

Provenant de [153, Paping et al, 1999]

XI.3.4 Traitements alternatifs de l'eau de refroidissement

Dans le présent document, les techniques alternatives de traitement de l'eau de refroidissement consistent en des méthodes non chimiques, des alternatives aux produits chimiques ou des combinaisons de produits chimiques. Nous avons déjà décrit la façon dont un contrôle correct peut entraîner un régime de dosage plus efficace, réduisant la quantité d'additifs requise tout en maintenant simultanément une incidence faible de la défaillance du système.

XI.3.4.1 Ozone

[tm032, Zimmermann and Hamers, 1996], [039, Strittmatter et al., 1996], [tm084Rice and Wilkes, 1992], [tm096, McCoy et al. 1990], [131, Dziobek, 1998] et [tm156, Schmittecker, 1999]

Description

Une expérience approfondie a été acquise avec le traitement de l'eau potable par l'ozone. En Allemagne et aux États-Unis, différentes expériences ont été obtenues avec l'ozone appliqué dans un système de refroidissement à recirculation. L'ozone est un oxydant fort, bien davantage que le dioxyde de chlore qui est à son tour un oxydant plus fort que l'hypochlorite de sodium. Comme l'ozone est très réactif, il réagit avec presque toutes les matières organiques présentes dans l'eau de refroidissement, et l'effet résiduel est faible, voire nul. De plus, l'ozone a un potentiel considérable pour détruire les additifs de l'eau de refroidissement, par exemple certains inhibiteurs de corrosion.

La réactivité de l'ozone dépend du pH de l'eau. Lorsque de l'ozone est ajouté à l'eau de refroidissement avec une valeur de pH supérieure à 8 (ce qui peut souvent se produire dans un système de refroidissement à recirculation), il se décompose pour former des radicaux libres hydrogénés, qui sont des agents oxydants plus forts que le chlore moléculaire, mais d'une demi-vie de l'ordre de la microseconde. Au cas où les ions brome sont présents dans les eaux de surface naturelles, ils réagiront avec l'ozone pour produire de l'acide hypobromeux, représentant l'élément qui est vraiment mesuré comme ozone résiduel plutôt que comme ozone lui-même. Un autre facteur essentiel est la dureté de l'eau. Nous avons recommandé de la conserver entre 100 et 400 ppm de CaCO_3 et de conserver les chlorures sous 200 ppm de Cl^- .

Réduction

La réduction du micro-encrassement, mesurée en activité microbiologique, est variable et peut être comparée à un traitement au chlore/brome. Une réduction jusqu'à 90 % de l'activité initiale a été mesurée, entraînant des concentrations de 20 à 50 colonies par ml. [tm156, Schmittecker, 1999]. La quantité, mais aussi le caractère de la microbiologie ont montré une modification suite au traitement par ozone. Par rapport à l'absence de traitement, il était possible de détecter un nombre réduit de colonies formant des espèces.

La concentration en ozone présente dans un système n'indiquait aucune influence directe sur le taux de corrosion ou de tartre même s'il était également conclu que l'acier doux et les métaux jaunes se corrodent facilement lorsque les concentrations d'ozone sont trop élevées (1 ppm). Avec la concentration appropriée en ozone, ces matériaux se corroderont d'abord, puis formeront une couche de corrosion. Cette couche assurera une protection contre davantage de corrosion, en particulier contre la corrosion par piqûre. Dans l'exemple, la corrosion de l'acier (C 1010) était réduite de 50 % à 0,05 mm/an, et la corrosion du cuivre (CuZn28Sn1) était réduite à moins de 0,004 mm/an.

Une réduction d'environ 50 % des niveaux d'AOX et de DCO dans l'effluent a été signalée à différentes occasions par traitement à l'ozone. Les niveaux respectivement obtenus étaient inférieurs à 0,01 mg/l (AOX) et à 10 mg/l (DCO). Le niveau de DCO a été atteint par dosage d'un stabilisateur de dureté.

Effet croisé

Même si l'énergie de formation de l'ozone est élevée, on dit souvent que l'application de l'ozone est plus acceptable d'un point de vue environnemental que l'hypochlorite car elle provoque moins de formation de trihalométhanes (THM) et d'halogènes organiques extractibles (EOX). L'ozonation peut entraîner la formation de sous-produits comme le bromate et les bromohydrines, mais en comparaison de la formation de sous-produits de chloration, une attention relativement peu importante a été portée à la formation de sous-produits provenant de l'ozonation. Aucune émission d'ozone dans l'air n'a été signalée dans les différents rapports, quel que soit la partie des systèmes de refroidissement.

Applicabilité :

L'ozone est principalement appliqué dans l'industrie chimique et pétrochimique et dans les raffineries, et dans une certaine mesure dans l'industrie de production d'énergie électrique. Cependant, des expériences récentes ont montré qu'une application plus large peut être envisagée dans les industries plus petites. Les avantages sont les suivants :

- Efficacité
- Faible concentration en sous-produits
- Faible stabilité de l'ozone, soit une quantité faible ou nulle d'ozone dans les rejets
- Réduction de la DCO et de l'AOX

Aux États-unis, l'ozone n'est pas retenu comme une solution « totale » de traitement de l'eau de refroidissement couvrant tous les objectifs, mais il représente une alternative pour un nombre limité d'utilisateurs. De plus, il est uniquement utile comme traitement autonome dans les systèmes de refroidissement qui ne nécessitent aucun contrôle de corrosion ou de tartre supplémentaire. Sa réactivité limite l'application d'autres biocides qui seraient immédiatement détruits. Et si un bioencrassement survient au-delà du rayon d'action de l'ozone, il peut ne pas être traité.

L'ozone est utilisé de préférence dans un système de refroidissement à recirculation très propre, et on a remarqué que la réactivité élevée de l'ozone le rend inapproprié pour une application dans un système à passage unique ou dans des systèmes à longues lignes. La vitesse à laquelle l'ozone peut disparaître d'un système est illustrée par l'exemple dans lequel, après la première application d'ozone dans un système contaminé, la concentration en ozone a diminué en deçà de la limite de détection sur une surface de 50 m à partir du point de dosage. Pour le conditionnement d'une tour de refroidissement d'une centrale électrique, une concentration minimale de 50 µg/l dans le bassin de refroidissement est actuellement suggérée, mais des résultats positifs ont également été signalés avec des niveaux inférieurs. L'application continue d'ozone à un niveau bas est une pratique éprouvée.

Coûts

La production d'ozone nécessite une quantité considérable d'énergie, et elle est relativement onéreuse du fait que le rendement des générateurs d'ozone est très bas (100 g à 150 g d'O₃/1 000 g d'O₂, 10 kWh/kg d'O₃). Cependant, les observations sur les coûts peuvent être différentes car ils dépendent des autres traitements qui sont disponibles. Par exemple, on a observé que le traitement par l'ozone peut être comparé au traitement avec le chlore gazeux et que d'autres traitements basés sur le chlore ou le brome pouvaient impliquer des coûts supplémentaires. Il convient d'être attentif lors de l'interprétation des coûts car les investissements en équipement peuvent ne pas être compris, avec seule mention des coûts d'exploitation.

Installations de référence

Hoechst (Allemagne), centrale électrique de Seraing (Belgique), centrale électrique de EZH-Rotterdam Capelle (Hollande). [Cf. les références]

Considérations

Une concentration minimale dans l'environnement aquatique du système de refroidissement est requise pour obtenir l'effet biocide requis de l'ozone. Un travail récent explique que pour maîtriser la contamination déjà présente, la dose initiale devrait être comprise entre 0,1 et 0,3 mg/l, et en fonction de l'environnement des systèmes, plusieurs mois pourront être nécessaires avant que l'ozone résiduel puisse être mesuré dans l'effluent résiduel [tm131, Dziobek, 1998]. On prétend que dans 60 % des applications, le traitement par ozone peut être réduit à 50 % dans les 9 à 12 mois avec des surfaces propres. Ce type de traitement a entraîné une concentration en ozone résiduel de 0,05 mg/l dans le bassin de la tour de refroidissement. D'autre part, un garnissage plus propre de la tour de refroidissement a permis d'augmenter le nombre de cycles et de diminuer la consommation d'eau de 70 %.

Le point de dosage est très important pour maintenir la concentration en ozone requise dans la zone correcte du système de refroidissement. Pour éviter la décomposition de l'ozone, des inhibiteurs sensibles et d'autres produits chimiques de traitement de l'eau de refroidissement, le traitement d'un courant latéral externe de l'eau d'appoint a été conseillé. L'ozone pouvait également être appliqué dans la tour de refroidissement elle-même [tm131, Dziobek, 1998].

L'ozone peut être généré sur site en soumettant l'air sec ou l'oxygène à une décharge électrique. Après cette opération, le produit doit être absorbé dans l'eau de refroidissement. Selon le Congrès Américain des Hygiénistes Industriels, la concentration maximale recommandée pour une exposition continue s'élève à 0,1 mg/l [tm059, Swinnen, 1995]. L'ozone est très volatile par rapport aux autres biocides oxydants. [tm096, Mc Coy et al. 1990] a mené des études sur la volatilité des différents biocides dans les tours de refroidissement. Cette étude a fait apparaître l'ordre de volatilité suivant : ozone > dioxyde de chlore > chloramine > acide hypochloreux > acide hypobromeux, l'ozone étant environ 167 000 fois plus volatile que l'acide hypobromeux à 20 °C.

XI.3.4.2 Traitement par UV

Description

Le traitement de l'eau par UV, qui doit être utilisé dans les systèmes de refroidissement à recirculation, requiert d'abord de l'eau claire pour fournir une transmission correcte de l'irradiation UV, et la préfiltration de l'eau peut s'avérer nécessaire.

Réduction

Pendant l'été en particulier, le traitement a provoqué la formation d'amibes dans la purge, avant le rejet dans la rivière.

Effet croisé

Le coût énergétique n'a pas été rapporté.

Limites de l'application

Il est mentionné que dans les lieux ensoleillés, la prolifération d'algues a été observée si aucun produit anti-algues n'est appliqué, du fait de l'absence d'efficacité résiduelle. Pour résoudre ce problème, un produit anti-algues devra être ajouté ou le bassin de la tour de refroidissement devra être propre et exempt de boue pour éviter la prolifération des micro-organismes dans la boue. Les lampes UV nécessitent également un nettoyage fréquent.

Coûts

Non signalés dans l'application à grande échelle.

Installation de référence

Centrale hydro-électrique, Ontario, Canada ; centrale nucléaire EDF, Poitiers, France (toutes les deux expérimentales, 1999).

Considérations

Avec la tendance qui consiste à augmenter la réutilisation de l'eau, il est incertain que la propreté de l'eau requise soit atteinte à l'avenir sans la mise en place d'un traitement important et onéreux.

XI.3.4.3 Traitement catalytique par peroxyde d'hydrogène [commentaire, D]

Description

Le traitement catalytique par peroxyde d'hydrogène est une technique de décontamination des micro-organismes contenus dans l'eau de refroidissement. Cette technologie vise à atteindre les valeurs limites inférieures des niveaux de bactéries présents dans l'eau. Le système agit pour prévenir la formation de biofilms et d'algues, empêchant ensuite la prolifération des bactéries dans les systèmes, notamment des colonies de légionelles. Le peroxyde d'hydrogène est utilisé comme agent oxydant qui, dans l'exemple du catalyseur métallique, produit une quantité considérable de radicaux $\bullet\text{OH}$. Ces radicaux ont un effet oxydant très fort, plus important que celui de l'ozone ou du chlore, par exemple.

La technologie est reconnue pour avoir un large spectre, c'est-à-dire que les radicaux sont efficaces face à une vaste gamme de micro-organismes, y compris les légionelles. La résistance génétique n'a pas été signalée et le dosage choc n'est donc pas requis. Le maintien d'une concentration de H_2O_2 relativement faible dans l'eau lui permet d'être presque exempt de bactéries.

Réduction

Le traitement catalytique par peroxyde d'hydrogène permettra de réduire les niveaux d'AOX et de DCO. Il ne produit aucun produit chimique résiduel dangereux dans le débit de sortie. Il étend la période d'exploitation car il permet de diminuer la fréquence de maintenance pendant laquelle l'installation dans son ensemble est exempte de biofilms, d'algues et de bactéries.

Effet croisé

Le traitement par catalyseur ne nécessite aucune application énergétique supplémentaire. En général, la concentration de peroxyde d'hydrogène (0,5 à 2 ppm) n'a montré aucune influence sur le taux de corrosion ou de tartre. Le peroxyde d'hydrogène agit aussi comme un inhibiteur de corrosion.

Limites de l'application

Pour chaque application, la meilleure option d'installation du catalyseur (sous la forme de treillis métallique réticulé léger, normalement sur un acier inoxydable ou un montage PE) doit être sélectionnée de façon individuelle. Le catalyseur peut être placé dans la partie inférieure du bassin d'eau ou dans la distribution d'eau si un système ouvert est utilisé. Une concentration de 30 % de la solution de peroxyde d'hydrogène a été définie comme étant très efficace en matière de stockage et d'application. Elle a été appliquée dans les **tours de refroidissement** de type modulaire. Les limites concernant la taille des tours n'ont pas été mentionnées. Les données concernent les applications dans les tours de refroidissement de faible ou moyenne capacité, mais l'application pour les installations de grande capacité est également en cours de développement.

Coûts

Ce traitement nécessite d'investir dans un catalyseur métallique. Avec un délai d'amortissement habituel du catalyseur de 4 à 5 ans, les coûts d'exploitation (notamment l'amortissement du catalyseur et du système de dosage) sont considérablement inférieurs à ceux de l'application d'un biocide (notamment l'hypochlorite) ou du traitement par ozone, lorsqu'ils sont appliqués à une tour de refroidissement de même capacité.

Installation de référence

Ausimont Deutschland GmbH, Bitterfeld (Allemagne).

Considérations

L'expérience acquise montre que deux solutions peuvent être choisies comme point de dosage du peroxyde d'hydrogène : le H_2O_2 peut être appliqué dans la chambre d'alimentation des pompes de la tour de refroidissement, ou directement dans les canalisations de refoulement de chaque cellule.

XI.3.4.4 Dioxyde de chlore

Description

Le dioxyde de chlore (ClO_2) est considéré comme une alternative à l'hypochlorite ($HOCl$) pour les conditions d'eau de mer, et comme biocide pour l'eau douce grâce à son efficacité en tant que désinfectant et à sa capacité à réduire considérablement la formation de sous-produits organohalogénés dans l'effluent. C'est une application efficace et économique dans les systèmes de refroidissement en matière de contrôle des micro-organismes à des dosages relativement faibles. Il peut être utilisé sur une grande fourchette de pH et il est efficace sur le spectre complet des micro-organismes. Il est particulièrement efficace dans les systèmes contenant les contaminants suivants : ammoniac et sels d'ammoniac, alcanes, alcènes et alcynes, alcools, amines primaires, glycols, éthers, aromatiques insaturés, la plupart des acides inorganiques, acides organiques, diols, composés aliphatiques saturés.

Les conditions favorables à l'application du dioxyde de chlore sont :

28. La contamination du process
29. Les systèmes au pH alcalin
30. Les limitations relatives au rejet de chlore dans l'effluent
31. L'élimination du chlore gazeux sur le site

Le dernier avantage peut être remis en question par la difficulté de transporter le dioxyde de chlore, qui doit donc être produit sur site [tm059, Swinnen, 1995].

Le dioxyde de chlore ne réagit pas avec l'eau et il est hautement soluble dans l'eau. Il fut découvert que l'insufflation d'air dans des solutions aqueuses de dioxyde de chlore peut provoquer l'expulsion du dioxyde de chlore de la solution. C'est pour cette raison que les solutions traitées avec du dioxyde de chlore ne doivent pas être alimentées dans des zones fortement aérées, comme les réservoirs de barbotage, avant de rejoindre une tour de refroidissement. Les solutions aqueuses de dioxyde de chlore sont soumises à la photodécomposition après une longue exposition aux ultraviolets. Comme avec la chloration, le traitement avec le dioxyde de chlore peut être planifié pendant les heures d'obscurité pour obtenir une efficacité maximale.

Il fut également observé dans le traitement qu'après les alimentations initiales élevées de ClO_2 , rapidement après le démarrage, la numération totale sur plaque devait normalement diminuer. Après cette période initiale, le ClO_2 commence à nettoyer les accumulations de biomasse de la boue et des débris pris au piège. Dès que les corps dans la boue sont attaqués, les micro-organismes s'échappent dans l'eau de circulation. Par conséquent, les numérations sur plaques totales, les lectures du calcium et de la turbidité augmenteront pendant quelques temps, puis diminueront pour atteindre des niveaux normaux. De plus, de la mousse peut également apparaître pendant cette période.

Réduction

Les expériences menées en Italie ont été confirmées par les observations réalisées en Espagne sur une grande centrale électrique dotée d'un **système à passage unique** [068, Ambrogi, 1997]. Il semblait possible de diminuer le dosage de ClO₂, après une concentration initiale de 0,22 mg/l (8 kg/heure) lors de la saison de prolifération, à environ 0,18 mg/l. (6,5 kg/heure), mais aussi de le diminuer davantage pendant l'hiver. Ces niveaux correspondent parfaitement aux autres niveaux de dosage. Le dosage était continu et efficace contre la limitation de la prolifération des moules. Les concentrations des formations de trihalométhane (THM) obtenues étaient considérablement inférieures par rapport au HOCl qui étaient utilisé indépendamment de la température de réaction ou du temps de réaction. Elles étaient comprises entre 0,31 µg/l pour une dose de 0,50 mg/l de ClO₂ à 10 minutes et 15 °C, et 460,48 µg/l pour une dose de 0,40 mg/l à 60 minutes et 60 °C. En prenant en compte le dosage initial maximum à 0,22 mg/l, nécessaire pour obtenir un traitement efficace, la concentration prévue dans l'eau de mer à l'extrémité du canal serait nettement inférieure à la LC₅₀ (96 h.) de 54,7 µg/l. Il fut prouvé qu'un anti-encrassement efficace de ClO₂ se produit à des concentrations de l'ordre de 0,05–0,25 mg/l.

Dans les systèmes de refroidissement ouverts à recirculation, le dosage habituel s'élève à 1-5 ppm de chlore en fonction de l'estimation du volume plus l'eau d'appoint lors de l'alimentation du système complet. En général, au démarrage, le dioxyde de chlore est introduit dans un système propre à environ 1 ppm pour une heure et cela trois fois par jour. Les systèmes pollués ou sales peuvent nécessiter des doses (3-5 ppm) et des durées d'alimentation plus importantes. Le nettoyage mécanique des systèmes peut être requis pour optimiser davantage le programme. Pour les systèmes dans lesquels la contamination du process est suspectée, il est recommandé d'effectuer une demande en dioxyde de chlore sur le système. Le dosage initial peut être obtenu à partir de la valeur de la demande déterminée, qui par expérience s'élève à 30 à 50 % de la valeur de la demande utilisée pour le dosage initial.

Tableau XI.4 : Dosage caractéristique du dioxyde de chlore pour les systèmes à passage unique et à recirculation en Europe

[CEFIC Sodium hypochlorite group, commentaire]

Système de refroidissement	Mode d'application	Durée de l'application	Dose caractéristique (mg/l)
Système à passage unique	Continu	8 heures par jour/ pendant 8 mois par an	0,4
	Discontinu	6 fois pour 1 heure/jour	0,3
Système à recirculation	Continu	Toute l'année	0,2 en hiver et 0,5 en été

Tableau XI.5 : Effet du dioxyde de chlore appliqué dans un système à passage unique sur une colonie de larves

[Données américaines, Van Hoorn, commentaire]

Dose	Fréquence	Réduction des colonies
0,25 mg/l	4 x 15 min/jour	95 %
0,25 mg/l	2 x 30 min/jour	35 %

Effet croisé

Même si aucun THM ni aucun chlorophénol n'est formé, il faut s'attendre à trouver des produits de réaction tels que des aldéhydes, cétones et quinones, voire des époxydes dans certaines circonstances. Ces derniers sont connus pour être cancérigènes ou mutagènes.

Application

Le traitement avec le dioxyde de chlore nécessite une installation pour une production in situ. De par sa sensibilité à la pression et à la température, le gaz ne peut pas être comprimé et transporté dans des cylindres. Trois moyens de production in situ sont mentionnés par [tm059, Swinnen, 1995] :

1. A partir du chlorite de sodium/gaz chloreux
2. A partir du chlorite de sodium/hypochlorite de sodium/(acide chloreux)
3. A partir de l'activation acide ou du chlorite de sodium/ par le biais de l'acide chloreux

Point d'alimentation

Pour obtenir les meilleurs résultats possibles, le dioxyde de chlore doit être directement introduit dans l'eau de recirculation d'une **tour de refroidissement**, à un point de mélange correct, par exemple sous la ligne d'eau dans le puits froid ou juste au-dessus de l'équipement qui est le plus critique. Un courant latéral de dioxyde de chlore peut-être alimenté vers le bassin situé à l'extrémité (à l'opposé du puits froid) afin de créer un effet de « balayage » dans le bassin ou dans la colonne montante de retour permettant de garantir un contrôle supplémentaire dans la tour.

Contrôle

Lorsque le dioxyde de chlore est utilisé comme microbiocide dans l'eau de refroidissement, il est important de contrôler la quantité qui est utilisée ainsi que son efficacité. Un contrôle approfondi des résidus du dioxyde de chlore, en veillant en particulier aux numérations par plaques, fournit les meilleurs résultats possibles au coût le plus économique.

Un résidu de dioxyde de chlore libre peut parfois être détecté dans l'eau de retour d'une boucle de recirculation ou dans l'effluent d'un système à passage unique. Dans la plupart des cas, le résidu libre est inférieur à 0,5 ppm, tel que testé par la méthode du chlorophénol rouge. Dans les systèmes exempts de tout résidu de dioxyde de chlore libre, une observation visuelle de la biomasse, par le biais du comptage des organismes biologiques ou d'une mesure de la pression différentielle, peut permettre de juger des résultats.

Aux États-Unis, le contrôle Redox est le plus souvent utilisé comme technique de contrôle on-line. Les valeurs ORP habituelles d'un contrôle sont de l'ordre de 350 à 500 mV.

Coûts

Les coûts n'ont pas été mentionnés, mais il fut conclu que des recherches complémentaires sur la stratégie d'application étaient nécessaires pour réduire la quantité nécessaire dans les **systèmes de refroidissement à passage unique**, et donc pour réduire le prix. Au moment des études, il était considéré comme étant trop élevé pour un fonctionnement à grande échelle (1996).

Installation de référence

Centrale électrique de Brindisi Nord, Italie (expérience).

Considérations

Concernant l'application dans les **systèmes à passage unique**, une comparaison avec la chloration nécessiterait de normaliser les régimes de dosage pour pouvoir tenir compte des caractéristiques du dioxyde de chlore et de la chloration en tant que biocide et dans le rejet. D'autres recherches semblent nécessaires en fonction des résultats prometteurs mentionnés ci-dessus.

XI.3.4.5 Purification ionique de l'eau dans le cadre du traitement de l'eau des tours de refroidissement

[tm036, Wilsey, 1997]

Description

Basé un concept déjà existant, la purification ionique est une méthode de traitement alternative de l'eau des tours de refroidissement, à l'aide des ions cuivre. Un système de traitement de l'eau uniquement chimique peut être remplacé par cette technique, entraînant une réduction du nombre de substances nocives pour l'environnement, mais aussi une économie.

Réduction

Certains microbiologistes ont déterminé que des petites quantités de cuivre agissant comme complément au chlore à 0,4 ppm ont la même efficacité que le chlore libre à 2 ppm.

Effet croisé

Les coûts n'ont pas été mentionnés, mais pourraient correspondre à la consommation énergétique du générateur d'ions cuivre.

Limites de l'application

Pour appliquer ce traitement, un générateur d'ions cuivre est nécessaire en même temps qu'un dispositif permettant de contrôler les solides dissous totaux, un système de conditionnement magnétique de l'eau ainsi qu'un système d'analyse de la composition de l'eau. Ces systèmes permettent d'optimiser le traitement.

Plusieurs facteurs doivent être pris en compte. La composition de l'eau d'appoint doit être telle que le niveau d'alcalinité du réservoir de la tour soit compris entre 40 ppm et 130 ppm, et son pH entre 7 et 8. Les effets du cuivre résident dans le fait qu'il fonctionne comme un coagulant pour réduire le tartre, formant de plus grands complexes qui seront séparés et filtrés plus facilement. Il agit également en tant que désinfectant bactérien, en formant des composés du cuivre qui sont létaux pour les bactéries et les algues. Enfin, il agit en tant qu'algicide sur les algues bleues en particulier.

Toutefois, il convient de veiller à la quantité de cuivre en cyclage qui dictera également la concentration dans la purge. De plus, la concentration résiduelle en composés de cuivre létaux nécessite un contrôle complémentaire car le rejet dans les eaux de réception pourrait provoquer des effets négatifs.

Coûts

Non mentionnés.

Installation de référence

Non mentionnée.

Considérations

Les résultats doivent encore être prouvés dans une application à grande échelle.

XI.3.4.6 Stabilisation des biocides halogénés dans l'eau des tours de refroidissement

[tm62, Dallmier et.al, 1997]

Description

Les produits à base de chlore et de brome sont souvent appliqués. Comme l'effet biocide d'un biocide halogéné dépend du résidu halogéné total, il est essentiel d'éviter toute réaction pouvant diminuer la quantité de résidus dans l'eau de refroidissement. Les réactions avec d'autres inhibiteurs de corrosion et de tartre peuvent survenir (par exemple, Br avec tolyltriazole). Les halogènes peuvent être stabilisés afin de réduire leur volatilité, d'augmenter leur compatibilité avec les inhibiteurs et de maintenir suffisamment d'halogène efficace. La stabilisation du brome a été atteinte par l'application d'hydantoïnes. Aucune autre information n'est fournie sur le processus de stabilisation.

Réduction

L'application de brome stabilisé dans les tours de refroidissement a mis au jour les effets suivants :

1. La perte de Br à cause de la volatilisation est inférieure lorsque le Br est stabilisé, laissant donc davantage de Br libre dans l'eau de refroidissement
2. Le Br stabilisé semblait un tiers plus rapide pour éliminer les bactéries formant le limon que le Br non stabilisé
3. Le Br stabilisé apparaissait être très efficace dans la suppression du biofilm multi-espèces, la suppression de 45 % du biofilm créant une réduction de 47 % de la pression dans le canal
4. L'application dans un système de climatisation de bureau s'est révélée efficace contre la Legionella pneumophila
6. Plus de 95 % du tolyltriazole (inhibiteur de corrosion des métaux jaunes) a été maintenu dans le système de refroidissement lorsque du Br stabilisé a été ajouté

Effet croisé

Aucune information sur les effets de l'application d'un produit chimique supplémentaire n'était disponible dans le cadre de la stabilisation de l'halogène.

Limites de l'application

Cette méthode a été appliquée dans les systèmes à recirculation (tours de refroidissement par voie humide). Les commentaires sur l'applicabilité de cette technique concernaient l'application d'hydantoïnes. La gestion des hydantoïnes (sous forme de pastilles) est difficile et nécessite des équipements de dissolution. Cela limitait l'application aux systèmes de refroidissement de petite taille. À l'heure actuelle, un produit à base de brome stabilisé liquide est commercialisé et peut également être appliqué dans les systèmes de grande taille.

Coûts

Les coûts de la stabilisation n'ont pas été mentionnés.

Installation de référence

Deux raffineries (en Allemagne et en Autriche) et une centrale électrique en Allemagne utilisent le produit liquide stabilisé.

Considérations

Les effets mentionnés ci-dessus ont été confirmés par les résultats des expériences sur le terrain. Deux remarques doivent être faites. Aucune observation n'a été faite sur l'ajout du stabilisateur et son comportement dans le système de refroidissement. Le caractère dangereux ou l'acceptabilité environnementale n'ont pas pu être définis. Son action sur la légionelle a été testée dans un refroidisseur, mais l'extrapolation dans les conditions des tours de refroidissement n'a pas été effectuée.

XI.3.4.7 Agent Anti-Salissure contre l'encrassement, la corrosion et le tartre

Description

Les agents anti-salissure sont appliqués à la surface des conduites côté eau, pour éviter ou réduire l'encrassement, la corrosion ou le tartre, mais ils ne traitent pas le débit d'eau de refroidissement. Un composé qui est disponible sur le marché, le Mexel[®] 432/0, est principalement appliqué, constituant une longue chaîne d'amines aliphatiques. Dans les émulsions aqueuses, ce produit forme un film sur les membranes cellulaires, provoquant la destruction des tissus dans une proportion variable en fonction du dosage. L'efficacité de cette alternative technologique n'est pas liée à la modification des propriétés chimiques de l'eau, ni à la biologie hydrique du circuit de refroidissement, mais plutôt à l'adsorption ou à l'intégration de Mexel[®] sur toutes les surfaces présentes dans le circuit. L'effet anti-encrassement peut être expliqué par l'intégration des composants du Mexel dans les membranes biologiques et dans le biofilm. Cette intégration gêne la cohésion de la structure biologique et entraîne la destruction des membranes à des concentrations élevées. À des concentrations sublétales, les composants du Mexel s'intègrent dans les membranes et perturbent le transfert ionique ou gazeux des membranes. Dans ce cas, le traitement produit un état de stress chez l'animal (moules, etc.) qui suffit à éviter leur installation définitive dans le circuit traité.

Ce produit possède un large spectre d'action dans le micro-encrassement et dans le macro-encrassement de l'eau de mer et de l'eau douce. Il possède également des propriétés anticorrosion et antitartre, et la procédure de traitement est généralement intermittente, conçue pour renouveler le film sur les surfaces à protéger. Les traitements périodiques peuvent être plus efficaces sur le macro-encrassement. Le film dure de 10 à 20 jours.

Le dosage est automatiquement réalisé et démarre par un dosage initial afin d'établir le film. La concentration dans le rejet est mesurée, et les niveaux de dosage sont réduits dès que le Mexel 432 peut être détecté dans le rejet. La période initiale pour un système à passage unique à eau de mer de grande taille est d'environ 10 jours.

Dans les systèmes à passage unique, l'analyse du produit est effectuée par une méthode spectrophotométrique en laboratoire ou par une méthode d'analyse du champ colorimétrique. La seconde méthode d'analyse permet de contrôler rapidement la concentration du produit à différents points du circuit.

Résultats

Les conditions du traitement, définies par la concentration à injecter ainsi que par la durée des injections, dépendent des résultats recherchés (bioencrassement, corrosion, encrassement ou tartre), des propriétés physico-chimiques de l'eau ainsi que des caractéristiques du circuit (type, températures, état de la surface, matériaux, débits, etc.). Il peut s'avérer efficace contre les bivalves sur la base d'un traitement périodique et à une concentration résiduelle de 3,5 mg/l. L'efficacité des traitements intermittents sur le long terme sur les moules zébrées a également été montrée dans des expériences : un dosage de 3 heures par jour, à 6 mg/l, permet d'éliminer 100 % des moules zébrées.

Dans l'installation citée en exemple, un dosage de 5 ppm 30 minutes par jour suffisait pour protéger le laiton d'aluminium contre la corrosion. Pour le macro-encrassement, une dose de 0,5 ppm était appliquée 5 heures par jour. Grâce au monitoring, des recherches ont été menées sur les réactions des moules au dosage afin d'identifier un régime de traitement optimisé.

Effet croisé

Le site visité présentait un avantage dans le sens où l'électrolyse de l'eau de mer n'était plus utile. Cela a mis un point final à l'entretien de l'électrolyseur qui coûte cher en termes environnemental (santé humaine) et financier.

Trois processus sont impliqués dans la disparition du Mexel en solution : la demande immédiate, la turbulence de l'eau et la dégradation bactérienne dans des conditions aérobiques. Les bactéries ont présenté une dégradation jusqu'à 98 % du produit en 10 jours.

Concernant les effets toxiques du produit sur les organismes en eau douce, une disparition rapide du produit sous sa forme toxique fut montrée dans les eaux naturelles, ainsi qu'une absence de toxicité détectable lors de sa dégradation.

Limites de l'application

L'application est indépendante du métal qui est testé (bronze, alliages de cuivre-nickel, fer et acier inoxydable 304L et 316L) ou de l'eau (douce ou de mer). Le Mexel peut être un produit chimique efficace ou un inhibiteur de corrosion biologique. Il permet de traiter des systèmes hydrauliques ouverts ou semi fermés à recirculation, dont les débits vont de quelques m³/heure (systèmes de conditionnement d'air) à 100 000 m³ heure⁻¹ avec de l'eau douce, de l'eau saumâtre ou de mer. À l'échelle mondiale, le produit est utilisé pour traiter les systèmes hydrauliques (refroidissement, lutte contre l'incendie, etc.) des centrales électriques, des installations géothermiques, du transport maritime, de l'industrie chimique, des aciéries, raffineries, plateformes offshore et appareils de conditionnement d'air utilisant l'eau comme fluide thermique.

Coûts

Les données relatives aux coûts ont uniquement été fournies par rapport à l'application de la chloration, et en particulier par rapport à l'électrolyse. Aucune confirmation n'a pu être obtenue sur le bilan économique du Mexel par rapport à la chloration. Les coûts dépendent de la surface à traiter, et non du volume d'eau de refroidissement.

Installation de référence

Centrale électrique EDF, Le Havre (France).

Considérations

Du point de vue environnemental, sa toxicité faible et l'absence de tout produit de dégradation toxique détectable en font une alternative acceptable au traitement de l'eau de refroidissement. Comme le produit est facilement biodégradable, cet avantage peut être un inconvénient lorsque la quantité nécessaire au traitement initial de la surface est concernée. Sa réactivité peut entraîner une augmentation de la quantité nécessaire et des coûts relatifs. Comme l'eau douce a généralement une teneur en solides dissous plus élevée que l'eau de mer, cela pourrait indiquer une préférence d'application dans des conditions d'eau de mer.

XI.3.4.8 Inhibiteurs de corrosion organiques stables dans des tours de refroidissement ouvertes par voie humide

[tm091, CTI, Little et. al]

Description

Le traitement organique utilisé dans une tour de refroidissement ouverte par voie humide peut être neutralisé à cause de sa susceptibilité aux agents oxydants puissants, de sa sensibilité aux conditions de flux thermiques élevées, de sa tendance à se précipiter en sels de calcium à des niveaux de dureté supérieurs, ainsi que de son besoin en débit d'eau constant. Pour résoudre ces problèmes, l'oxyde EBO (oxyde N, éthanolamine bisphosphono-méthyl) a été développé. C'est un phosphonate organique qui peut être utilisé dans le traitement de l'eau de refroidissement comme un inhibiteur de corrosion anodique. L'EBO fait preuve d'une bonne stabilité aux halogènes. Sa stabilité à des niveaux de calcium de 500 mg/l de calcium comme CaCO₃, tamponnée à un pH de 8,3 et à une température de 60 °C, a été comparée à celle de l'HEDP.

Réduction

Plus de 100 mg/l d'EBO pouvait être ajouté sans aucune précipitation alors que cette quantité s'élevait à seulement 7 mg/l d'HEDP dans les mêmes conditions. Aucun effet négatif sur la corrosion des métaux jaunes n'a pu être indiqué. La corrosion a été considérablement réduite par rapport à un traitement organique sans EBO.

Effet croisé

Les besoins inférieurs en eau sont dus à une option potentielle en cycles de concentration supérieurs car l'EBO est moins sensible aux niveaux de dureté élevés du calcium.

Limites de l'application

Uniquement appliqué dans un système ouvert à recirculation.

Coûts

Non mentionnés.

Installation de référence

Tour de refroidissement pilote, aucune application à grande échelle n'a été mentionnée.

Considérations

L'application de l'EBO et de produits chimiques de traitement de l'eau de refroidissement semblables avec un fonctionnement optimisé nécessite des recherches complémentaires en matière de niveaux de toxicité dans le rejet et dans la purge des systèmes auxquels ils ont été appliqués.

XI.3.5 Traitement de l'eau de refroidissement rejetée

La réduction des émissions à partir d'une approche intégrée débute par la réduction des ressources qui sont utilisées. Ainsi, le Chapitre 1 présente l'approche initiale qui doit être mise en oeuvre. Dans les limitations du système de refroidissement et des spécifications du site, une certaine quantité de produits chimiques pourrait encore être appliquée avec, comme conséquence, un certain rejet. Le contrôle et le traitement optimisé peuvent permettre de réduire davantage le rejet. Dans certains cas avant le rejet, les débits d'eau de refroidissement sont traités dans les installations de traitement des eaux usées. Pour plus d'informations sur le traitement des eaux usées, consultez le BREF correspondant. Des exemples particuliers de traitement de l'eau de refroidissement n'ont pas été mentionnés. Concernant le traitement, il convient de faire quelques remarques :

- Le traitement de la purge contenant des concentrations maximales après le dosage peut être recueilli dans une cuve tampon afin d'empêcher toute conséquence sur l'environnement aquatique ou sur les installations de traitement de l'eau. Il est possible de réaliser une autre hydrolyse des biocides dans le bassin, jusqu'à une quantité inférieure de substances toxiques avant que l'eau ne soit rejetée ou réutilisée.
- À cause de la concentration en substances du process, la purge des systèmes fermés à recirculation des raffineries peut faire l'objet d'un traitement avant d'être envoyée dans une installation de traitement des eaux usées, afin d'éviter toute conséquence sur l'équilibre de l'installation de traitement. Le niveau de pétrole de cette purge est généralement largement inférieure au niveau de pétrole résiduel dans l'eau de process prétraitée des autres installations, et peut donc être transférée à l'installation de traitement des eaux usées sans aucun prétraitement.

XI.4 Variateurs de fréquence pour réduire la consommation énergétique

[tm097, Immell, 1996]

Dans un système de refroidissement, la consommation énergétique directe peut être diminuée en réduisant le besoin en puissance de pompage et en optimisant l'utilisation des ventilateurs. Dans une installation entièrement nouvelle, de nombreuses choses peuvent être effectuées sur la conception (par exemple, sur la construction de la tour de refroidissement, sur le type de garnissage, sur la configuration des pompes), mais dans une installation existante, les options sont plus limitées et comprennent des changements d'équipement.

Description

L'application de la variation de vitesse des ventilateurs représente une option dans le cadre de l'adaptation spécifique des vitesses des ventilateurs à l'activité de refroidissement requise. L'une des techniques est l'utilisation des commandes à fréquence variable (VFD). Une VFD est une association entre un convertisseur de tension et un inverseur de courant (CC en CA). Les tours de refroidissement sont généralement conçues pour fournir une eau froide particulière qui quitte la tour pour une charge thermique spécifiée à une certaine température de bulbe humide, qui est uniquement dépassée selon un pourcentage annuel minimum (1-2,5 %). La plupart du temps, elles fonctionneront à une température de bulbe humide inférieure, mais à un niveau variable basé sur la variation saisonnière des températures du bulbe humide. Avec le système VFD, cette variation est traduite en différentes vitesses de ventilateurs pour obtenir la température de l'eau requise. Les VFD sont commercialisées chez différents fournisseurs.

Réduction

La réduction de consommation énergétique ainsi que la réduction des niveaux de bruit et des vibrations provenant des vitesses d'exploitation plus lentes sont atteintes. De plus, l'équipement rotatif enregistre une longévité plus grande grâce à un changement en douceur des vitesses du moteur.

Effet croisé

Consulter le chapitre sur la réduction.

Limites de l'application

Pour appliquer une VFD, plusieurs caractéristiques particulières qui doivent faire l'objet d'une vérification ont été mentionnées, telles que : le contrôle automatique des températures, la mise en place correcte de la VFD pour répondre aux demandes du moteur des ventilateurs de la tour de refroidissement ainsi qu'une analyse de la résonance de l'équipement.

Coûts

Aucune indication de coûts n'a été fournie.

Installations de référence

Non mentionné en ce qui concerne des expériences avec cette application.

ANNEXE XII APPLICATION PARTICULIERE : INDUSTRIE DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE

[tm132, Eurelectric, 1998]

Synthèse

Afin de faire une synthèse des connaissances spécifiques et de permettre à d'autres industries d'en bénéficier, cette annexe a été rédigée avec EURELECTRIC. Elle est le fruit de la collaboration entre ELECTRICITÉ DE FRANCE, ELECTRABEL, LABORELEC et VDEW resp. VGB représentant les professionnels allemands de l'électricité. Les résultats des différents groupes de travail permanents de UNIPEDE¹⁹ et CORECH²⁰ ont également été intégrés.

L'annexe a pour objectif de donner des informations de fond permettant une meilleure compréhension des informations présentées dans le document principal. Elle explique de façon simplifiée le fonctionnement des centrales thermiques. Elle détaille les principales fonctions des systèmes de refroidissement, du condenseur et des auxiliaires. Les impacts environnementaux potentiels des systèmes de refroidissement seront ensuite examinés plus en détail. Cette partie de l'annexe concerne plus particulièrement les rejets de chaleur, l'entraînement des organismes vivants dans les prises d'eau, les rejets de réactifs de traitement et les autres potentiels effets néfastes tels que le bruit.

De plus, elle contient une analyse des différentes techniques de refroidissement envisageables. Elle se réfère principalement à la conception d'un nouveau système et pourra être utilisée comme un complément d'information pour le choix de la M.T.D. Elle aborde non seulement les aspects techniques et économiques, mais aussi l'impact écologique et environnemental des différentes solutions. Ses conclusions, même si elles concernent plus spécifiquement l'industrie électrique, s'inscrivent dans le cadre des conclusions générales relatives aux M.T.D du Chapitre 4 du document principal.

Les principales conclusions qui ont été tirées suite à l'analyse sont :

- L'impact d'un système de refroidissement sur l'environnement de réception doit être étudié avant la phase de conception de la centrale électrique; pour ce faire, la modélisation numérique et des tests sur site dans des boucles pilotes sont conseillés ;
- La conception des systèmes de refroidissement doit être étudiée tout en prenant en compte l'impact écologique et énergétique à son maximum ;
- La mise en place de procédés physiques destinés à limiter l'encrassement doit être recherchée systématiquement (nettoyage mécanique en continu, hausse de la température, filtration, etc.) ;
- Les solutions chimiques doivent être étudiées au cas par cas pour limiter le plus possible leur utilisation;
- La meilleure solution peut ne pas être choisie car trop de facteurs locaux influencent le choix d'un système de refroidissement d'une centrale électrique. Ils incluent non seulement les débits disponibles, mais aussi les aspects visuels.

XII.1 Introduction

Le cycle thermodynamique des centrales électriques classiques obéit au principe de CARNOT. Les niveaux de rendement atteignent environ 40 % pour les nouvelles conceptions classiques, mais ils peuvent s'établir à 47 % pour les conceptions avancées et dans des conditions climatiques très favorables, notamment lorsque les conditions de refroidissement (système de refroidissement à passage unique), y compris avec une combustion au charbon, sont favorables. Le résultat est que presque 45 % de l'énergie fournie par la combustion doit être dissipée au niveau du condenseur.

Le condenseur est le point névralgique de l'installation. Quel que soit le mode de refroidissement adopté, il s'agit de l'une des interfaces principales entre la centrale électrique et son environnement. L'efficacité et la disponibilité d'une usine électrique dépendent en grande partie de l'intégrité et de la propreté du condenseur. Il y a plusieurs explications au fait que des solutions spécifiques aient été adoptées depuis longtemps maintenant : le nettoyage mécanique continu par des balles en mousse, les alliages résistants à la corrosion tels que le titane et l'acier inoxydable, etc. De plus, les systèmes de traitement de l'eau de refroidissement ont été développés et sont utilisés, notamment dans les systèmes de refroidissement à recirculation.

¹⁹L'Union Internationale des Producteurs et des Distributeurs d'Électricité.

²⁰Comités de Recherche.

De même, étant donné que les débits d'eau de refroidissement peuvent atteindre plusieurs douzaines de m³/s, les modes de traitement adoptés et les solutions choisies peuvent être difficilement applicables à d'autres industries.

XII.2 Systèmes de refroidissement des centrales électriques - principes et aide-mémoire

Le fonctionnement des centrales électriques obéit au principe de Carnot. La source de chaleur, la chaudière, fournit l'énergie nécessaire à la vaporisation d'eau. La source froide, le condenseur, condense la vapeur provenant de la turbine à basse pression.

L'une des principales caractéristiques d'une centrale électrique, du point de vue technique et économique, est sa **consommation spécifique**. En d'autres termes, la quantité de chaleur nécessaire à la production d'un kWh d'énergie électrique. Cette consommation spécifique se détermine par le bilan thermique du cycle (tableau 1).

Tableau XII.1 : Exemple de bilan simplifié d'un cycle thermodynamique pour une nouvelle conception classique

Transformation énergétique	Énergie (kJ)	(%)	Rendement (%)
Énergie provenant de la combustion	9 000	100	100
Perte du générateur de vapeur	1 050	- 11,7	88,3
« Perte » du condenseur	4 200	- 46,5	41,8
Chauffage de l'eau d'alimentation	(2 000)	(22,2)	(Mise en boucle)
Pertes du turbogénérateur	65	- 0,75	41,05
Alimentation électrique des auxiliaires	65	- 0,75	40,3
Perte dans le transformateur principal	25	- 0,2	40,1
Efficacité globale de l'installation			40,1

La présence d'une source froide est le principal aspect à prendre en compte. Les systèmes de refroidissement ne peuvent pas toujours utiliser de l'eau provenant directement d'une rivière, de la mer ou d'un lac. Il peut s'avérer nécessaire d'utiliser un système à recirculation avec une tour de refroidissement. En regardant le bilan du cycle thermique, on constate qu'il faut 4 200 kJ pour chaque kWh généré. De plus, cette énergie ne peut pas être récupérée car son exergie est basse.

Les systèmes de nouvelle génération, notamment les cycles combinés (ou les turbines à gaz), permettent d'avoir de meilleurs rendements, supérieurs même à 55 %.

Le système de refroidissement qui sert à évacuer cette énergie est généralement appelé système à recirculation. Le faisceau de tubes du condenseur contient de l'eau froide provenant d'une rivière, de la mer ou d'un lac. Le chauffage et le débit de cette eau dépendent de la puissance installée (tableau 2).

Tableau XII.2 : Lien entre la puissance installée et les paramètres de refroidissement

(Les valeurs données en exemple dépendent du type de système à recirculation, de la température de l'air ambiant et de la température de la ressource en eau de refroidissement).

Puissance estimée de l'unité (MW)	Débit d'eau en circulation (m ³ /s)	Chauffage de l'eau dans le condenseur (K)
125	3 – 5	7 – 12
250	6 – 10	7 – 12
600	14 – 24	7 – 12

Chaque unité est également équipée d'un système auxiliaire de refroidissement d'eau :

- refroidisseurs d'huile de la génératrice,
- refroidisseurs du compresseur ;
- etc.

Les systèmes de refroidissement en boucle fermée approvisionnés en eau déminéralisée sont destinés aux :

- refroidisseurs à eau du stator de la génératrice ;

- refroidisseurs à hydrogène de la génératrice ;
- etc.

Selon les unités, le débit d'eau de refroidissement de ce système de refroidissement des auxiliaires représente en principe entre 4 et 8 % du débit d'eau en circulation. Le chauffage est limité, il s'élève à 10 K, selon les auxiliaires en fonctionnement. Toutefois, même avec une faible charge thermique, il peut rester en service plusieurs jours après la fermeture de l'unité pour évacuer la chaleur résiduelle.

XII.3 Impacts possibles des systèmes de refroidissement sur l'environnement

Les rejets de chaleur au niveau de la source froide concernent essentiellement deux environnements de réception : l'air et l'eau. Mais, en réalité, même si le rejet se fait dans un environnement aquatique, le dernier puits thermique reste l'atmosphère. En réalité, l'eau transfère graduellement la chaleur reçue par différents procédés naturels : l'évaporation, la conduction et le rayonnement. Pour des raisons économiques, l'eau est le premier endroit que l'on regarde.

Avant de se demander quelles techniques pourraient être reconnues comme M.T.D pour les systèmes de refroidissement, il paraît souhaitable de faire une analyse des effets néfastes sur l'environnement naturel, d'estimer leur nature et leur amplitude et de les juger, en d'autres termes, de décider s'ils sont tolérables ou non.

XII.3.1 Rejets de chaleur dans l'atmosphère

Quel que soit le type de système de refroidissement, toute la chaleur véhiculée vers la source froide est rejetée dans l'atmosphère. Ce rejet est effectué sur une base spécifique dans le cas des tours de refroidissement, des aérocondenseurs et des tours de refroidissement par voie sèche. Dans le cas des systèmes à passage unique sur une rivière, un lac ou près de la mer, la chaleur est transférée via la surface de la masse d'eau de réception, sur une zone large et pendant une certaine durée, selon la situation locale.

Dans les centrales électriques refroidies par un **système à passage unique** (Figure XIII.1, Section XII.11), l'eau pompée est généralement chauffée de 7 à 12 K lorsque les unités fonctionnent à leur puissance nominale. L'eau de refroidissement rejetée est progressivement refroidie en se mélangeant avec l'eau de réception. La chaleur est ensuite transférée dans l'atmosphère par trois procédés: l'évaporation (35 à 45 % de l'énergie libérée), par radiation à la surface de l'eau (25 à 35 %) et par conduction avec l'air (20 à 30 %). En fonction de la situation locale, la température de sortie pourrait être limitée par les autorités locales.

Le transfert énergétique par évaporation représente un débit de vapeur de 20 kg/s pour 100 MW_{th}. Si l'on considère la baisse rapide du procédé de chauffage de l'eau en aval du rejet, les seuls phénomènes atmosphériques susceptibles d'être modifiés sont les fréquences d'occurrence et la persistance de la brume d'évaporation dans la zone à proximité des émissions où les écarts de température sont toujours considérables, mais dont l'ampleur est limitée.

Il faut noter que, toutes choses égales par ailleurs, la température de formation ou disparition de la brume d'évaporation est supérieure avec de l'eau de mer qu'avec de l'eau douce. Ce contexte est par conséquent favorable aux centrales électriques situées à proximité d'estuaires ou le long des côtes.

Pour les centrales électriques avec des **tours de refroidissement par voie humide** (Figure XII.2, Section XII.11), tout se passe comme si la chaleur était rejetée directement dans l'atmosphère. Deux méthodes opérationnelles sont utilisées :

- le refroidissement à passage unique avec une tour de refroidissement (Figure XII.3, Section XII.11),
- le refroidissement à recirculation (Figure XII.4, Section XII.11).

Le rejet se concentre sur une petite zone. Les tours de refroidissement par voie humide rejettent dans l'atmosphère environ 70% de la chaleur résiduelle sous forme de chaleur latente (vapeur humide) et environ 30% par chaleur sensible [tm132, Eurelectric, 1998]. Ainsi, le débit de vapeur rejetée dans l'atmosphère est environ deux fois plus important qu'avec le refroidissement à passage unique sans tour de refroidissement. L'air saturé d'humidité est rejeté dans l'atmosphère à une température d'environ 10 à 20 K au-dessus de la température ambiante, et à une vitesse d'environ 3 à 5 m/s dans le cas de tours de refroidissement à tirage naturel. Cette vitesse est doublée avec les tours de refroidissement à tirage mécanique. L'air saturé d'humidité, refroidi grâce à un mélange turbulent avec l'air ambiant, peut entraîner la formation de nuages ou de panaches artificiels.

Les risques de formation de brouillard sur le sol provenant de l'abaissement du panache de condensation sont relativement fréquents, surtout avec les tours de refroidissement à tirage mécanique (Figure XII.5, XII.6 et XII.7, Section XII.11) en raison de leur faible hauteur et dans des conditions météorologiques fraîches et humides en l'absence de vent. La zone correspondante se situe dans un périmètre d'environ 500 m autour de la source d'émission. La fréquence est considérablement réduite lorsque les tours de refroidissement sont plus élevées. Dans les plaines, on peut estimer que l'abaissement des panaches atteignant le sol est exceptionnel ; ils ont une hauteur de 50 à 75 m selon la situation locale.

La formation de givre peut provenir du contact avec le sol gelé, soit à cause du brouillard consécutif à l'abaissement du panache, soit par la précipitation liée au primage, soit par des pulvérisations provenant de la base des tours de refroidissement. Toutefois, l'impact de ces pulvérisations reste confiné à une zone située à proximité de la tour de refroidissement et concerne tout au plus une douzaine de mètres autour de la base de la tour de refroidissement.

La principale modification climatique liée au fonctionnement des tours de refroidissement par voie humide concerne une hausse locale de la nébulosité par le développement du panache de condensation qui entraîne la réduction de la luminosité à proximité de la centrale électrique.

Pour les centrales électriques équipées de **tours de refroidissement par voie sèche** (Figure XII.11, Section XII.11) ou d'**aérocondenseurs** (Figure XIII.9 et 10, Section XII.11), l'humidité absolue de l'air n'est pas modifiée, mais la température est plus élevée d'environ 15 à 20 K au-dessus de la température ambiante. Toute la chaleur est rejetée sous forme sensible, et l'air chaud non saturé qui monte dans l'atmosphère entraîne rarement la formation de nuages.

Les tours de refroidissement hybrides (humide/sèche) (Figure XII.8, Section XII.11) permettent la plupart du temps d'éviter la formation de panaches. La consommation d'eau (sous forme d'eau d'appoint) est environ 20 % inférieure à celle d'une tour de refroidissement par voie humide. Toutefois, à l'heure actuelle, les seules tours de refroidissement hybrides disponibles sont à tirage mécanique. Le bilan annuel d'une centrale électrique avec une tour de refroidissement hybride à tirage mécanique peut se situer dans la même plage que celui d'une tour de refroidissement par voie humide à tirage mécanique. Ce bilan tient compte du mode opérationnel.

Depuis quelques années, le rejet des fumées désulfurées dans les centrales électriques à énergie fossile via une tour de refroidissement est à la pointe de la technologie, au moins en Allemagne. Il s'agit d'une alternative au rejet classique par la cheminée, et présente de nombreux avantages écologiques et économiques.

XII.3.2 Chauffage de l'environnement aquatique de réception

Même si le puits thermique final est l'atmosphère, dans la plupart des cas, une grande partie des rejets d'une centrale électrique se fait dans l'environnement aquatique. Plusieurs phénomènes physiques entrent en jeu à ce niveau :

- la diffusion turbulente,
- la convection dans l'eau,
- le flux de fluides de densité variable,
- l'évaporation, le rayonnement, la convection dans l'air.

En fonction de l'ampleur du rejet et de l'environnement de réception, un des phénomènes est prépondérant et affecte la façon dont la chaleur est distribuée dans l'environnement de réception.

Le **champ proche** du rejet de l'eau de refroidissement devrait être distingué du champ lointain.

Le champ proche est défini dans un fleuve comme étant la zone dans laquelle le mélange entre le panache d'eau chaude avec l'eau du fleuve est incomplet.

La température de l'eau dans le champ proche dépend du mélange de l'eau émise par la centrale électrique avec l'eau de l'environnement de réception. Le chauffage peut être réduit dans cette zone en mélangeant rapidement l'effluent avec l'eau de l'environnement de réception grâce à des dispositifs spécifiques.

Le **champ lointain** est la géométrie d'eau chaude qui est complètement mélangée dans la colonne d'eau; il s'agit donc d'un champ thermique d'arrière-plan. La température excessive dans le champ lointain baisse progressivement du fait de la dilution avec les eaux ambiantes et l'échange thermique avec l'atmosphère.

En ce qui concerne les rejets dans les **eaux marines à marées ou les milieux marins avec des courants forts**, le panache d'eau chaude formé par le rejet de la centrale électrique dépend surtout des vitesses plus importantes dans l'environnement de réception. Elles entraînent un mélange rapide de l'eau et empêchent toute stratification causée par la différence de densité entre l'eau chaude et l'eau froide. La baisse de température dans le panache d'eau chaude vient principalement du mélange et non des pertes de chaleur à la surface de la zone de l'eau. L'importance du panache d'eau chaude dans une mer à marées, définie comme étant la zone se situant dans l'isotherme 1K, couvre une zone allant de 2 à 10 Km pour un rejet correspondant à une centrale nucléaire de 5 000 MW_e.

Le comportement du panache d'eau chaude dans une mer sans marées est tout d'abord celui d'un flux stratifié. La température baisse très rapidement du fait de la dilution liée à la friction et aux turbulences. Dans une mer sans marées (ou un lac), la dispersion ou le transport des eaux de refroidissement sont largement influencés par les courants générés par les vents et les conditions des thermoclines ; ils sont estimés à environ 1 ha/MW_e.

En principe, pour les centrales électriques côtières, l'eau de refroidissement est rejetée dans l'eau de surface via un canal de décharge ouvert.

Le comportement du panache d'eau chaude dans un **estuaire** est similaire à celui d'une mer à marées avec des courants forts. Le mouvement alternatif de l'eau joue un rôle essentiel. Le débit de la rivière aura tendance à transporter la chaleur vers la mer. La marée entrante ralentira ou changera la direction du flux, ce qui affectera la dispersion du panache d'eau chaude dans l'estuaire.

L'évaluation du chauffage d'une rivière consécutif à un rejet d'eau chaude est relativement complexe. En réalité, le mécanisme de refroidissement de la rivière en aval résulte principalement de l'échange énergétique entre la rivière et l'atmosphère. Le flux d'énergie entre l'étendue d'eau et l'atmosphère fluctue considérablement en fonction des conditions météorologiques et de l'heure du jour.

Dans une rivière, les diffuseurs présents sur toute la largeur d'un cours d'eau servent à répartir le mélange sur une distance allant de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres. Si le rejet se fait le long de la rive, en revanche, le mélange complet par le flux naturel se fera sur plusieurs kilomètres.

Dans tous les cas, la **recirculation dans les rivières doit être évitée**, ou les taux de recirculation pour les rejets dans la mer et notamment dans les estuaires sont réduits à un minimum pour assurer l'efficacité et la sécurité du fonctionnement des centrales électriques. La position et la conception de la prise d'eau et des structures de sortie sont déterminées pour éliminer le risque de recirculation.

Des études préliminaires permettent de concevoir les structures de prise d'eau et de rejet et les dispositifs les plus adaptés pour éviter la recirculation et favoriser le mélange initial des rejets d'eau chauffée. Ils dépendent des modèles physiques (modèles hydrauliques) et des modèles numériques. Dans la mesure du possible, la modélisation numérique devrait être basée sur des données d'enquête hydrographiques sur site.

L'utilisation de ces outils dans le cadre de l'étude d'impact des installations futures sert à s'assurer que les limites de régulation thermiques seront respectées dans la zone de mélange ou après le mélange.

XII.3.3 Entraînement d'organismes dans les prises d'eau

Au cours du pompage de l'eau nécessaire au refroidissement, les centrales thermiques entraînent des organismes microscopiques (algues et plancton) ainsi que des organismes qui nagent dans l'eau libre (quelques crustacés et poissons). Le plancton passe par les filtres tournants dont la maille fait généralement entre 1 et 5 mm. Ce n'est pas le cas des crustacés et des poissons qui s'aplatissent contre les panneaux des filtres, puis sont rejetés avec l'eau de lavage des filtres.

Certaines études ont montré que la plupart des organismes attirés dans les prises d'eau sont de petite taille : les crevettes, les larves et les alevins dans la mer et dans les estuaires, ou les alevins dans les rivières. L'exemple des jeunes saumons qui descendent les cours d'eau qui sont plus particulièrement capturés dans les prises d'eau est caractéristique de ce comportement.

Pour réduire l'entraînement de ces espèces, trois types de mesures peuvent être prises :

32. Placer les captages en dehors des zones critiques telles que les frayères sur le bord de mer ou des voies de migration pour les larves d'anguilles dans les estuaires ;
33. Des conceptions des structures de captage qui minimisent l'entraînement d'organismes ;
34. Du matériel de captage équipé de dispositifs de répulsion qui renvoient les organismes dans l'environnement sans dommage.

De nombreux systèmes dissuasifs (dispositifs de répulsion) ont été développés et installés au niveau des captages des centrales thermiques et hydroélectriques au cours des dernières décennies :

- En eau douce, les écrans électriques peuvent effrayer les poissons à des stades spécifiques, mais n'affectent pas les alevins, voire les attirent dans les captages.
- Les rideaux de bulles d'air donnent en général de très mauvais résultats ;
- La lumière est partiellement efficace sur certaines espèces, mais le poisson peut s'acclimater et l'effet de dissuasion n'est pas constant ;
- Certains résultats obtenus avec des systèmes dissuasifs sont prometteurs, mais il y a des résultats contradictoires.

Les investissements dépendent de la taille du captage et du débit, et peuvent être approximés entre 40 000 et 200 000 €.

35. En équipant les systèmes avec des équipements de récupération, qui remettent les organismes dans l'environnement aquatique sans dommage.

Dans les captages importants avec des écrans mobiles, les organismes peuvent être enlevés avec une pompe à poisson ou séparés de l'écran par des jets d'eau à faible pression (1 bar). Dans une centrale électrique située dans l'estuaire de la Gironde (France), ces systèmes se sont avérés relativement efficaces avec un taux de survie allant de 80 à 100 % pour les crevettes, les carreaux et les anguilles. D'autres tentatives sont avérées moins efficaces ou très coûteuses.

Les deux premières actions de nature préventive sont préférables aux actions curatives dont l'efficacité reste encore problématique. Il n'existe pas de solution universelle applicable partout.

XII.3.4 Altération de l'environnement de réception par des rejets chimiques

Le retrait d'eau à des fins de refroidissement peut parfois entraîner des rejets chimiques dans l'environnement de réception. Pour y remédier, on peut utiliser :

- des réactifs pour prévenir l'entartrage des systèmes de refroidissement équipés de tours de refroidissement ;
- des réactifs pour lutter contre les développements biologiques ou certains produits de réaction ;
- des traitements anti-corrosion au sulfate de fer pour protéger, dans certains cas, les condenseurs en alliage de cuivre ;
- les produits de corrosion des échangeurs de chaleur et de la tuyauterie.

En ce qui concerne l'**environnement marin**, l'objectif du traitement biocide est de maintenir les systèmes suffisamment propres pour leur assurer un bon fonctionnement. Pour les captages d'eau de mer, le principal problème consiste à éviter le développement de mollusques (moules, huîtres, etc.) dans le système de refroidissement. La pratique actuelle est l'injection de chlore. Il est généralement produit sur site par électrolyse de l'eau de mer. Ce procédé évite le risque de transport d'hypochlorite de sodium par camion. La chloration peut se faire sur une base continue ou discontinue (saisonnaire) selon plusieurs facteurs tels que les caractéristiques climatiques du site, la qualité de l'eau, la conception du circuit de refroidissement et la typologie du bio-encrassement (périodes de sédimentation et taux de croissance).

L'injection se fait essentiellement à faibles doses pour que la concentration du chlore libre dans le rejet se situe généralement entre 0,1 et 0,5 mg/l en principe (sporadiquement à 0,7 mg/l). La valeur de cette concentration limite est établie par les réglementations locales. Toutefois, lorsqu'il réagit avec des matières organiques, le chlore peut entraîner la formation de substances organo-halogénées (essentiellement du bromoforme dans l'eau de mer). Certaines études montrent toutefois que les concentrations en bromoforme dans les panaches des rejets d'eau chaude provenant des centrales électriques côtières restent extrêmement faibles (environ 15 µg/l).

Il serait ici souhaitable de comparer ce chiffre avec la production naturelle de substances organo-halogénées dans les océans. Selon Grimvall and deLeer (1995), la production annuelle de plusieurs organo halogénés est :

- chlorure de méthyle : 5 000 000 t ;
- bromométhane : 300 000 t ;
- iodométhane : 300 000 t à 1 200 000 t ;
- chloroforme : 90 000 t à 360 000 t ;
- bromoforme : 500 000 t à 1 000 000 t ;
- iodoforme : non détectable dans l'eau de mer.

Des concentrations naturelles en COHA de 6 à 17 µg Cl/g de sédiments ont été mesurées dans le Golfe de Bothnie et de 50 à 180 µg Cl/g de sédiments dans le Golfe de Finlande. La présence de ces molécules organo-halogénés a été attribuée aux réactions de bio-halogénéation.

La chloration est la méthode de traitement chimique anti-encrassement qui est la plus couramment utilisée pour protéger les systèmes des centrales électriques côtières. Un autre oxydant, le dioxyde de chlore, a toutefois été testé avec succès dans les centrales thermiques.

Pendant de nombreuses années, le choix des alliages pour les tubes des échangeurs de chaleur dans les centrales électriques côtières s'est surtout porté sur le titane. Dans ces conditions, la contribution des produits de corrosion est insignifiante, voire même inexistante. Toutefois, on trouve toujours des condenseurs en cuivre qui sont protégés par un film d'hydroxyde ferrique obtenu en ajoutant du sulfate de fer à l'eau de refroidissement.

Pour les centrales électriques **situées à proximité des rivières**, la contribution des réactifs chimiques dépendra pour l'essentiel du type de système de refroidissement et des problèmes biologiques éventuels.

En général, le fonctionnement par recirculation augmente les **risques d'entartrage**. Il nécessite souvent de définir un traitement spécifique de l'eau d'appoint ou de l'eau de refroidissement. Les modes de traitement qui peuvent être utilisés sont les suivants :

- aucun traitement lorsque l'eau est faiblement minéralisée,
- adoucissement à la chaux de l'eau d'appoint,
- vaccination acide de l'eau en recirculation,
- traitement avec retardateur de précipitation,
- traitements combinés du type : vaccination acide et inhibiteurs de tartre ou adoucissement à la chaux et vaccination acide.

Le choix du mode de traitement dépend de plusieurs critères dont quelques uns sont énumérés ci-dessous :

- facteur de concentration,
- composition chimique de l'eau du fleuve,
- conception du système de refroidissement.

Le traitement dépend du facteur de concentration du système de refroidissement :

- avec un faible facteur de concentration (1,05 à 1,2), il n'est généralement pas nécessaire de traiter l'eau du système ;
- avec un facteur de concentration moyen (1,2 à 2), une vaccination acide de l'eau en recirculation est nécessaire lorsque la dureté de l'eau est élevée ;
- avec un facteur de concentration élevé (de 3 à 7), l'adoucissement à la chaux de l'eau d'appoint devient souvent la seule alternative possible ; il pourra être complété par une vaccination acide légère.

La **vaccination acide** de l'eau en recirculation peut être effectuée de trois façons différentes : soit en maintenant le pH à un niveau situé généralement entre 7,5 et 8,5, en limitant l'alcalinité totale à 100 mg CaCO₃/l (pour l'eau d'appoint avec une faible teneur en sulfate), ou en respectant les instructions de régulation qui prennent en compte l'alcalinité, la dureté calcique et la température. L'acide sulfurique est utilisé dans la plupart des cas.

L'objectif de **l'adoucissement à la chaux** de l'eau d'appoint est d'augmenter le pH de l'eau jusqu'à 10 pour précipiter le calcium et une partie du magnésium sous forme de carbonate et d'hydroxyde. À la sortie du décarbonateur, la concentration de calcium résiduel varie entre 0,5 et 1 milliéquivalent par litre. Toutefois, il est associé au carbone, qui rend l'eau traitée extrêmement entartrante. Pour restaurer l'équilibre de l'eau décarbonée, une post vaccination avec de l'acide sulfurique est souvent effectuée. L'adoucissement à la chaux entraîne la production d'une grande quantité de boue. De plus, en augmentant le pH, l'adoucissement à la chaux peut entraîner la précipitation de certains métaux lourds présents dans la prise d'eau.

Le gâteau de filtration produit par précipitation dans le procédé d'adoucissement est collecté au bas du décanteur. Il est normalement pompée vers un épaisseur de boue où la concentration en solides augmente avec la sédimentation en principe assistée par injection de polyélectrolyte. L'eau claire retourne dans le décanteur tandis que la boue concentrée est déshydratée dans des filtres à tambour sous vide ou des filtres à bandes.

Le gâteau produit par déshydratation avec une teneur en eau restante d'environ 50 % est supprimé pour être éliminé dans des décharges. Aucun effet sur l'environnement provenant des sites de décharge des boues d'adoucissement n'a été mentionné.

La **chloration continue** des systèmes à recirculation visant à éliminer la formation de biofilm sur les tubes du condenseur a été abandonnée il y a longtemps depuis que des méthodes mécaniques sont utilisées (Taprogge, systèmes Technos, etc.). Mais la chloration en tant que tel est un traitement efficace. Dans la pratique, cinq traitements de chloration peuvent être utilisés :

- traitement de fin de saison : par exemple, la chloration continue à un faible niveau (0,5 mg/l) pendant 2 à 4 semaines à la fin de la période de sédimentation de la moule d'eau douce (*Dreissena polymorpha*) ;
- traitement périodique : plusieurs périodes d'ajout continu de biocides au cours de la période de sédimentation ;
- traitement intermittent : dosage fréquent (tous les jours ou tous les trois jours par exemple) pendant de courtes durées (quelques minutes ou quelques heures) ;
- traitement continu à un faible niveau au cours de la période de sédimentation : par exemple, en Mer du Nord et dans la Manche, la chloration à 0,5 à 1,0 mg/l., 7 mois par an pour éliminer les moules marines. L'oxydant résiduel à la sortie 0,1-0,2 mg/l ;
- traitement semi-continu alternant de courtes périodes de traitement (15-60 minutes) et de pauses brèves : une chloration semi continue ou une chloration à jet pulsé à un faible niveau est utilisée au Canada contre la moule Zebra et en France ainsi qu'aux Pays-Bas pour contrôler les moules marines dans les centrales électriques.

La **chloration massive ou dosage choc** est une procédure spécifique qui a été développée pour éliminer les algues filamenteuses qui se développent dans les bassins et dans les garnissages des tours de refroidissement. Les concentrations au niveau du point d'injection varient entre 5 et 25 mg Cl₂/l. Afin d'éviter l'émission de chlore dans l'environnement de réception, les purges de déconcentration sont fermées pendant quelques heures. Elles sont ouvertes lorsque la concentration en chlore libre dans l'eau de recirculation est inférieure à la limite de rejet. En fonction des autorisations, cette limite varie entre 0,1 et 0,5 mg ORT/l. Certaines autorisations de rejets sont exprimées en débit. Ces traitements ne sont pas effectués sur tous les sites.

La fréquence des traitements massifs dépend majoritairement de la qualité de l'eau, du facteur de concentration et de l'état général de propreté du système à recirculation. Elle peut être hebdomadaire, mensuelle ou trimestrielle.

La réaction du chlore avec des matières humides et fulviques entraîne la formation de composés organochlorés. En fait, les concentrations en ions bromures dans l'eau des rivières sont en général peu significatives. Dans ces conditions, seuls les composés organochlorés peuvent se former. On peut distinguer les composés volatiles tels que le chloroforme, le dichlorométhane, (POX) et les composés absorbables (AOX).

Toutefois, comme pour l'eau de mer, la présence de composés organohalogénés dans les eaux de surface intérieures n'est pas seulement imputable à la chloration de systèmes de refroidissement. Parmi les autres sources possibles, il faut faire une mention particulière de l'agriculture et de la production naturelle. Dans les

lacs non pollués, en Suède par exemple, les concentrations en COHA vont de 10 à 90 µg Cl/l. Les concentrations les plus élevées ont été mesurées dans les lacs extrêmement eutrophiques.

Parmi les paramètres qui affectent les réactions, engendrant la formation de composés organochlorés au cours de la désinfection de l'eau de refroidissement, citons :

- la concentration en acide humique ou fulvique,
- la concentration en chlore libre,
- le temps de réaction,
- le pH de l'environnement,
- la température de réaction,
- la présence d'ions ammonium.

Ces réactions complexes peuvent être modélisées et validées par des mesures conduites sur site.

La chloration des systèmes à passage unique n'entraîne pas de hausses significatives de composés organochlorés. En réalité, les temps de contact sont courts, au plus 10 minutes, et les concentrations en chlore libre sont faibles. Selon les procédures de chloration utilisées, les concentrations en POX et en COHA mesurées au cours de cette période de pointe varient respectivement entre 0 et 10 µg Cl/l et entre 20 et 150 µg Cl/l. Ces valeurs correspondent aux concentrations en chlore libre au niveau de l'injection qui se situent entre 0,5 et 10 mg/l.

La chloration dans les boucles fermées de systèmes à recirculation peut entraîner des concentrations plus élevées de composés organochlorés. Les facteurs suivants jouent un rôle défavorable à ce niveau :

- le temps de contact est plus long,
- la recirculation augmente la concentration de précurseurs.

Il faut cependant mentionner que l'augmentation du pH consécutive au dégazage de CO₂ est favorable à la formation de POX. Ce dernier passe facilement dans l'atmosphère via la tour de refroidissement.

Dans ces conditions, les concentrations en POX se situent entre 0 et 10 µg Cl/l et les concentrations en COHA entre 200 et 2 500 µg Cl/l. Les concentrations en chlore libre au niveau de l'injection se situent entre 5 et 25 mg/l et les durées vont de 2 à 70 heures.

Il faut toutefois noter que la présence de faibles concentrations en ions ammonium dans l'eau naturelle peut réduire de façon considérable les concentrations en POX et en COHA. En réalité, la cinétique de la réaction chlore-NH₄⁺ est plus rapide que celle des réactions qui se produisent entre les composés chlorés et aromatiques.

XII.3.5 Autres effets nuisibles résultant du choix de certains systèmes de refroidissement

L'utilisation de tours de refroidissement à tirage naturel, forcé ou hybrides, mais aussi de condenseurs à sec permet de réduire considérablement les besoins en débit d'eau d'une centrale électrique et, par conséquent, de limiter l'impact possible sur l'environnement aquatique. Toutefois, la présence de systèmes de refroidissement sur un site peut poser d'autres problèmes. Citons notamment les problèmes esthétiques et le bruit causé par les tours de refroidissement par voie humide. Pour les tours de refroidissement par voie sèche et les condenseurs, en plus des deux aspects évoqués précédemment, il y a également la dissémination possible dans l'air des produits de corrosion provenant de la surface des échangeurs de chaleur, notamment lorsque les échangeurs se composent de tubes à ailettes en acier galvanisé.

Les tours de refroidissement humide à tirage naturel sont des structures qui peuvent être vues de loin et qui ne peuvent pas s'intégrer dans un paysage plutôt plat.

D'autre part, concernant **les tours de refroidissement à tirage mécanique ou les tours de refroidissement hybride**, l'esthétique restant beaucoup plus discutable, elles présentent l'avantage d'être généralement plus basses que la majeure partie de la centrale électrique.

Néanmoins, il faut préciser que beaucoup des facteurs de comparaison entre les différentes technologies dépendent des hypothèses émises par les fabricants sur les données de coûts.

Des remarques similaires ont été faites pour les **tours de refroidissement par voie sèche et les condenseurs refroidis à l'air**. L'effet de la taille est néanmoins beaucoup plus important. En effet, les faibles propriétés d'échange de l'air nécessitent des structures plus importantes. De plus, dans le cas de systèmes à tirage mécanique, la puissance nécessaire pour l'approvisionnement en air est d'environ 2 % de la sortie électrique

nette de l'unité. Pour la même puissance thermique à dissiper, l'effet de la taille est trois fois plus élevé que celui requis pour les tours de refroidissement par voie humide et les systèmes combinés.

Les effets néfastes qui peuvent être causés par un système de refroidissement sont les émissions sonores au niveau de l'entrée et de la sortie d'air. Même pour une **tour de refroidissement humide à tirage naturel**, le niveau sonore peut atteindre 60 dBA à 100 mètres. Pour une **tour de refroidissement humide à tirage mécanique ou une tour de refroidissement hybride**, le niveau sonore atteint environ 70 dBA sous les mêmes conditions. Le niveau est voisin des 80 dBA pour les condenseurs refroidis à l'air.

XII.4 Etude préalable des sites : outil indispensable à l'évaluation de leur capacité de réception, contrôle de l'impact et prévention des effets secondaires

XII.4.1 Analyse de la situation

La source froide est l'un des éléments déterminants dans le choix d'un site. Aussi, il est particulièrement important de prêter attention aux problèmes environnementaux posés par le refroidissement d'une centrale électrique dès les premières étapes. Comme mentionné précédemment, ces problèmes peuvent être de différentes natures :

- le chauffage de l'eau par des systèmes à passage unique ;
- l'effet sur la qualité de l'eau et sur les organismes organiques, dans le cas de tours de refroidissement par voie humide ;
- l'effet sur la qualité de l'air dans le cas de tours de refroidissement par voie sèche ;
- les effets météorologiques, les rejets de substances chimiques et les problèmes sonores quel que soit le mode de refroidissement adopté.

Le concepteur n'est pas désarmé face aux problèmes posés. Les connaissances acquises grâce à de nombreuses observations faites à proximité des centrales électriques existantes constituent une base expérimentale solide servant à orienter efficacement les études préalables avant d'installer une nouvelle centrale électrique.

XII.4.2 Modélisations mathématiques, simulations sur des modèles et tests sur des boucles pilotes, premiers outils indispensables

L'intérêt pour les **modèles numériques** a été évoqué pour les prévisions des changements thermiques dans les champs proches et lointains.

Dans la zone proche, des outils assez sophistiqués servent à décrire les conditions de dilution des rejets de chaleur. Ils sont utilisés au niveau des rejets locaux. Ces modèles servent à mesurer les structures d'écoulement le mieux possible pour assurer la dispersion optimale du panache d'eau chaude dans l'environnement de réception aussi rapidement que possible, et donc limiter au minimum son impact (données météorologiques et hydrobiologiques).

Dans la zone éloignée, les paramètres qui doivent être pris en compte sont beaucoup plus complexes. Ils concernent non seulement les caractéristiques propres à l'environnement de réception, mais aussi les rejets provenant d'autres sociétés. Des modèles beaucoup plus complexes ont été développés dans cette optique. Ils prennent en compte les paramètres biologiques de la qualité de l'eau et la présence de polluants chimiques. Ils intègrent différentes sources de pollution et fournissent une évaluation de la réponse des cours d'eau ou des lacs aux perturbations thermiques et chimiques ou la contribution excessive de nutriments (phénomène d'eutrophisation).

Il existe aussi d'autres modèles utilisés pour simuler l'impact cumulatif de plusieurs tours de refroidissement par voie humide installées sur le même site.

Les prévisions utilisant des modèles numériques doivent compter sur les données de terrain et sur l'expérience acquise. Ces **études in situ et de laboratoire** sont requises pour définir et optimiser le traitement anti-encrassement ou les périodes de nettoyage des systèmes. Les études biologiques permettent de connaître les périodes de reproduction et de fixation des larves ainsi que le taux de croissance des principales espèces biologiques. Ces champs et études de laboratoire sont longs. En réalité, dans le domaine écologique, les outils analytiques prévisionnels n'ont pas encore été entièrement validés.

Pour déterminer le mode de traitement des systèmes à recirculation, des tests systématiques sont conduits sur des boucles pilotes. L'objectif de ces tests est de saisir les **risques d'entartrage** d'une part et d'autre part de définir le mode de traitement optimal ainsi que les instructions de fonctionnement. Parmi les études en laboratoire, il faut citer les simulations de modèles pour la visualisation de la vapeur d'eau et le phénomène de formation de panaches d'eau chaude.

XII.5 Conception des composants et choix des matériaux

XII.5.1 Refroidissement par voie humide

Comme mentionné précédemment, les problèmes rencontrés dans les systèmes de refroidissement par voie humide peuvent être de trois types :

- la corrosion,
- le tartre,
- les développements biologiques.

Depuis plusieurs années maintenant, et presque de façon naturelle, le choix des matériaux utilisés dans les systèmes de refroidissement des centrales électriques s'est orienté vers les matériaux résistants à la corrosion. Il faut dire que la pression dans le condenseur d'une centrale électrique est d'environ 35 mbar, mais qu'elle peut être plus faible dans les unités optimisées pour atteindre une meilleure efficacité, notamment lorsque les conditions climatiques sont favorables, ou même plus élevée lorsque les conditions climatiques ne sont pas favorables. Dans ces conditions, la plus petite fuite dans les tubes provoque l'accès d'impuretés dans le cycle eau-vapeur. Les dommages consécutifs à ces intrusions peuvent être très importants, réduire l'efficacité de l'unité, voire même entraîner sa fermeture.

Afin d'éviter l'arrivée d'eau brute dans le cycle eau-vapeur, le choix des matériaux s'est porté vers des alliages extrêmement résistants. Le titane est donc presque toujours utilisé avec l'eau de mer et des eaux saumâtres. Pour de l'eau des rivières, les condenseurs sont le plus souvent équipés de tubes en acier inoxydable 316 L (ou même ayant une teneur en Mo plus élevée si la concentration d'ions chlorés est supérieure à 100 mg/l) ou en laiton, quelquefois en titane. Afin de limiter la formation de dépôts (sédiments et développements biologiques) dans les tubes, la vitesse maximale moyenne atteint 1,8 m/s pour le laiton. Pour les autres matériaux tels que l'acier inoxydable ou le titane, la vitesse moyenne maximale est bien supérieure. Le choix de la vitesse moyenne résulte en fait de l'optimisation après refroidissement qui prend en compte la puissance requise pour le pompage, elle-même fonction de la vitesse dans les tubes. En général, l'optimisation pour l'acier inoxydable ou le titane entraîne une vitesse se situant entre 1,8 et 2,5 m/s.

Les plaques tubulaires sont souvent en acier au carbone ou revêtues de titane. Une peinture appropriée (époxy ou ébonite) protège le côté en contact avec l'eau en recirculation. Dans certains cas particulier, les dispositifs de protection cathodiques ont été installés pour résoudre entre autres les problèmes de corrosion galvaniques.

Même s'ils sont riches, les alliages tels que l'acier inoxydable peuvent être sujets à une forme particulière de corrosion, comme la corrosion sous dépôts. Pour éviter ce phénomène, les cuves doivent rester propres dans toutes les circonstances. Cet objectif peut être satisfait de deux façons :

- soit en procédant à une injection continue de biocides à action rapide, en général un biocide oxydant tel que le chlore ;
- soit en effectuant un nettoyage mécanique continu. Il existe différents procédés. Ils consistent à injecter des brosses ou des balles de mousse qui sont recouvertes et réutilisées sur une base continue.

La volonté de réduire l'utilisation des réactifs chimiques a imposé la solution suivante.

Pour éviter la corrosion d'acier inoxydable, une procédure particulière est recommandée pour la conservation des tubes ; elle doit être effectuée au cours de la fermeture de l'installation. Cette conservation passe par le drainage, le lavage et le séchage de l'intérieur du tube.

Les principaux échangeurs de chaleur des systèmes de refroidissement auxiliaires sont essentiellement des refroidisseurs en acier ou en acier inoxydable. La distance entre les plaques est relativement courte et elle peut parfois entraîner de l'ensablement. Toutefois, ces systèmes fonctionnent en obéissant au principe d'un sur deux ou deux sur trois. En d'autres termes, le fonctionnement d'un ou deux systèmes suffit à refroidir les auxiliaires tout en permettant au train supplémentaire de jouer le rôle de sécurité. Ce choix de conception sert à programmer des opérations de nettoyage périodiques. Ces opérations consistent dans le démontage de l'échangeur de chaleur non utilisé et dans le nettoyage des plaques avec de l'eau sous pression.

Les équipements pour l’approvisionnement ou le rejet, les principales conduites d’eau de recirculation et les tours de refroidissement sont en béton armé. Le choix du ciment utilisé dépend du mode de traitement à adopter pour l’eau en recirculation. Donc, dans le cas de la vaccination à l’acide sulfurique, il s’avère parfois indispensable d’utiliser des ciments spéciaux. L’ajout de cendres volantes est recommandé. Dans le cas d’une concentration élevée en acide sulfurique, il est nécessaire d’utiliser des revêtements spéciaux.

Le **garnissage** des tours de refroidissement est généralement fait avec des matériaux thermoplastiques. Des charges spécifiques sont souvent ajoutées au cours de la fabrication pour les rendre résistantes au feu. Le risque de feu dans les garnissages est particulièrement élevé au cours des opérations de maintenance. Ce choix évite les problèmes relatifs à l’amiante rencontrés avec les conditionnements des générations précédentes. De plus, les récents développements ont permis d’augmenter substantiellement les propriétés thermodynamiques du garnissage. Le choix de matériaux synthétiques plus léger et des performances accrues a permis, pour une charge thermique identique, de réduire de façon conséquente la taille des tours de refroidissement. Toutefois, certains profils présents montrent une plus grande sensibilité au (bio) encrassement et au tartre.

Comme on peut le voir, le choix d’un garnissage dépend de plusieurs facteurs. Plus que la performance recherchée, c’est plutôt la qualité de l’eau (la présence de particules en suspension, la tendance à l’entartrage) qui impose le choix du profil. Les industriels ont toujours un défi permanent à relever avec ce problème particulier. Le profil idéal est, bien entendu, celui qui garantit des performances élevées tout en n’étant pas très sensible au (bio)-encrassement et à l’entartrage.

Les **éliminateurs de gouttes** actuellement utilisés permettent de limiter la quantité d’eau puisée pour l’amorçage à 0,01 % voire moins du débit total. Pour les installations situées à côté des principaux axes de circulation des camions, ces valeurs peuvent être encore réduites. Une compensation de la perte de puissance est nécessaire dans ce cas. Les séparateurs sont également faits en plastique.

Une partie de l’**énergie de pompage** peut être récupérée en installant des tours de refroidissement équipées de récupérateurs situés sous le garnissage. Toutefois, ces tours de refroidissement sont extrêmement sensibles au givre. Avant de choisir cette solution, une étude des conditions climatiques locales est absolument nécessaire.

XII.5.2 Refroidissement hybride

Les tours de refroidissement hybrides sont recommandées pour des conditions de sites spéciales. La caractéristique essentielle des tours de refroidissement hybrides est de combiner un procédé d’évaporation avec un procédé sans évaporation. Cela entraîne une baisse de l’humidité relative et le panache disparaît donc presque totalement à la sortie de la tour de refroidissement. Avec un tirage mécanique, on peut réduire considérablement la hauteur de la tour. Les coûts d’investissement sont plus élevés que pour une tour de refroidissement par voie humide.

En général, la consommation d’énergie liée au fonctionnement des ventilateurs et la température élevée de la source froide entraîne une baisse de rendement du cycle et une hausse de la consommation en combustible.

XII.5.3 Refroidissement par voie sèche

Le refroidissement par voie sèche est principalement utilisé dans les régions où les approvisionnements en eau sont insuffisants.

XII.5.3.1 Condenseur à air à tirage mécanique (Figure XII.9, Section XII.11)

Dans un aménagement avec un condenseur à air, les vapeurs d’échappement provenant de la turbine à vapeur sont acheminées dans le condenseur à air (ACC) où la vapeur sera distribuée dans plusieurs tubes à ailettes. L’air de refroidissement est injecté dans ces faisceaux de tubes par les ventilateurs. La vapeur rejette de la chaleur directement dans l’atmosphère via les tubes à ailettes, la condense et circule par gravité dans un réservoir de condensats. À partir du réservoir de condensats, elle revient dans la chaudière. Une conception type d’échangeur de chaleur est le condenseur de type cadre « A » (d’autres conceptions de structures permettent également de s’accommoder des éléments de tubes, ventilateurs et structure en acier).

Les gros condenseurs secs ont tendance à avoir des systèmes de tubes de vapeur longs et complexes susceptibles de causer des problèmes d’implantation et de pertes de charge. Pour minimiser les pertes de charge dans le réseau de vapeur, les faisceaux de refroidissement sont généralement situés à côté du collecteur de la

turbine. En fonction des conditions sur site, les condenseurs à air sont techniquement réalisables pour couvrir une large gamme de tailles de centrales.

Par rapport aux systèmes de refroidissement par voie humide, le rendement du condenseur à air sur le transfert de chaleur dans l'atmosphère est relativement faible, la température de l'eau refroidie étant déterminée par la température de bulbe sec. Le système doit être conçu pour exclure la formation de zones mortes par des gaz non condensables et donc éliminer le danger de condensats sous-refroidis ou de gel. La conception des faisceaux de tubes doit également être robuste pour permettre un nettoyage à l'eau à haute pression des surfaces externes, afin de maintenir le rendement et la production de l'usine. Toutefois, cette méthode de refroidissement avec un condenseur à air permet d'éviter les grosses tours de refroidissement, d'éliminer le panache de vapeur et de réduire considérablement la consommation en eau de refroidissement. En particulier, en utilisant des ventilateurs et des moteurs silencieux, il est possible de satisfaire des restrictions sonores strictes.

Par rapport aux systèmes de refroidissement indirects par voie sèche, le condenseur à air fournit un écart important de température entre la vapeur en condensation et l'air de refroidissement, et par conséquent le condenseur à air aura une surface de transfert de chaleur relativement réduite. Le système de refroidissement indirect par air sec, qui compte deux procédés de transfert de chaleur (c'est-à-dire un condenseur de vapeur et un échangeur de chaleur refroidi à l'air), aurait besoin de compenser soit en adoptant une surface de refroidissement plus importante, soit en augmentant son débit de refroidissement. Les coûts d'investissement pour un condenseur à air seront inférieurs à ceux d'un système de refroidissement indirect par voie sèche, car ce dernier devra inclure les coûts des pompes de recirculation de l'eau de refroidissement et le condenseur de surface. D'autre part, la consommation de la puissance auxiliaire et les besoins en maintenance du condenseur à air à tirage mécanique seront significativement supérieurs à ceux de la tour de refroidissement par voie sèche à tirage naturel.

XII.5.3.2 Condenseur à air à tirage naturel (Figure XII.10, Section XII.11)

Même si les caractéristiques pour l'installation d'un condenseur à air direct dans une tour à tirage naturel, le rendent tout autant réalisable qu'un condenseur à tirage mécanique, les inconvénients sont que la hauteur de la structure de la tour à tirage naturel sera plus élevée, et que les coûts d'investissements sont plus importants. Par exemple, le coût de la tour elle-même pourra être moitié moins cher que celui d'une tour à tirage mécanique.

Les avantages de ce système de condenseur à air à tirage naturel sont :

- des émissions sonores réduites ou inexistantes
- une recirculation de l'air réduite ou inexistante liée à la structure élevée de la tour
- aucune maintenance des ventilateurs, des pompes ou des pompes de circulation d'eau
- aucune consommation électrique auxiliaire pour la condensation de vapeur.

XII.5.3.3 Tours de refroidissement fermées à recirculation par voie sèche (Figure XII.11, Section XII.11)

Dans les tours de refroidissement par voie sèche, l'eau circule via les éléments de refroidissement dans un système fermé. Le rejet de chaleur est exclusivement transmis par convection. Le manque de dissipation de chaleur via l'évaporation entraîne une hausse significative de la température de l'eau de refroidissement et donc une perte de rendement par rapport au refroidissement par voie humide.

En cas de refroidissement par voie sèche, deux aménagements de flux sont possibles :

- un refroidissement en circuit fermé avec des tours de refroidissement de type sec qui serviront au refroidissement direct en étant connectées à un condenseur à surface ;
- un refroidissement en circuit fermé avec des tours de refroidissement de type sec qui serviront au refroidissement direct en étant connectées à un condenseur à injection.

Avantages du refroidissement par voie sèche :

- aucune formation de panache visible,
- définition et examen simples des paramètres chimiques de l'eau de refroidissement en recirculation,
- eau d'appoint inutile au cours du fonctionnement, uniquement en cas de pertes liées à des fuites.

Par rapport au refroidissement par voie humide, le refroidissement par voie sèche présente les désavantages suivants :

- coûts d'investissement et d'exploitation élevés,
- un bâtiment aux dimensions plus importantes,

- une forte influence des températures de l'air ambiant (été/hiver) sur la performance de refroidissement,
- le fonctionnement en hiver nécessite des mesures de prévention contre le givre au cours des temps d'arrêt,
- la tendance à l'encrassement des éléments de refroidissement nécessite un dispositif de nettoyage stationnaire efficace.

XII.5.4 Tours de refroidissement avec rejet des gaz de combustion traités (Figure XII.12, Section XII.11)

Au cours des dernières années, l'émission des gaz de combustion désulfurés via les tours de refroidissement (comme une alternative à l'émission via les cheminées) dans les installations utilisant des combustibles fossiles s'est avérée favorable par rapport aux aspects environnementaux et économiques. Le transport du gaz de combustion sur des zones d'atmosphère plus élevées est possible par les différences de densité entre le gaz de combustion et le mélange du panache de la tour de refroidissement et l'air ambiant relativement froid. Par cette méthode, on obtient une hausse du rendement de la centrale électrique.

Les installations de désulfuration des gaz de combustion des centrales électriques alimentées au charbon fonctionnent souvent suivant le principe de désulfuration par voie humide. Le nettoyage par voie humide refroidit les gaz de combustion à une température se situant entre 50°C et 70°C. Pour une émission compatible avec l'environnement et sans problème de ces gaz de combustion nettoyés via une cheminée, il faut les chauffer davantage, ce qui consommera de l'énergie. Une alternative de réchauffage est l'émission de gaz propre via une tour de refroidissement à tirage naturel : jusqu'à présent, ce principe a été exclusivement utilisé pour le refroidissement par voie humide. Les gaz propres sont conduits dans la tour de refroidissement au-dessus du conditionnement, et sont donc rejetés dans l'atmosphère avec les panaches des tours de refroidissement.

L'intérieur de la tour de refroidissement incluant la bouche de sortie doit être entièrement **traité contre la corrosion**. Au cours de l'entrée des gaz de combustion propres dans la tour de refroidissement, le condensat peut circuler sur la coque de la tour qui, par rapport au béton, est extrêmement agressif en raison de son faible pH.

Les parties en béton de la structure interne comme, par exemple, l'armature supérieure du corps de remplissage supportant les segments des canaux et des têtes de cheminée doivent également être traités de la même manière que l'intérieur de la coque. Les parties en acier telles que les mains courantes qui pourraient entrer en contact avec du condensat acide provenant des panaches doivent être en acier inoxydable spécial.

Le **canal de gaz propre** conduit les gaz nettoyés de la DGC²¹ jusqu'au milieu de la tour de refroidissement. Il peut être inséré dans la tour de refroidissement à la hauteur de la sortie de la DGC (élévation importante) ou juste au-dessus du corps de remplissage (faible élévation). Le diamètre maximal du canal est d'environ 8 m.

Le canal de gaz propre devrait être fabriqué en vinylester renforcé de fibres de verre ou équivalent. À cet effet, des matériaux spéciaux de moulage résistant aux attaques chimiques contenant des résines de panacryl et, comme pour les procédés textile, des fibres résistant aux acides provenant du verre ECR doivent être utilisés.

Du fait de la formation de condensat dans le canal, il devrait être légèrement incliné par rapport à la tour de refroidissement. Pour la sortie du condensat, une installation de sortie au niveau du canal de gaz propre dans la tour de refroidissement est prévue ; elle est reliée au bassin de la tour de refroidissement.

XII.6 Comparaison des coûts entre les différents types de tours de refroidissement

Les éléments de coûts des systèmes de refroidissement sont essentiellement de trois types :

- les coûts liés à l'investissement,
- les coûts liés à la consommation d'énergie (liés au rendement),
- les coûts de maintenance.

Pour les centrales électriques, les coûts d'exploitation liés à l'énergie doivent prendre en compte le gain financier qui est lié à la différence de rendement entre les différentes options. En général, pour les centrales électriques, la comparaison entre les différentes options se fait suivant une méthode socio-économique basée sur le bilan actualisé avec un ratio d'actualisation qui varie d'un pays à l'autre (8 % pour la France, 5 % pour l'Allemagne et l'Italie, 10 % pour le Portugal). Cette méthode est décrite en référence par L. Caudron dans « Les réfrigérants atmosphériques industriels », Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, 1991.

²¹ Désulfuration des gaz de combustion

Le bilan « actualisé » se compose de :

- l'investissement auquel s'ajoute les charges indirectes des solutions techniques envisagées ;
- les charges algébriques « actualisées » (maintenance des équipements) et réceptions en cours (production au cours de la durée de vie estimée « t_f ») ;
- « P_i » est le bilan des charges et des réceptions de l'année « i », supposé en milieu d'année.

Le bilan est représenté par l'équation suivante ; « α » étant le ratio d'actualisation :

$$I + \sum_{i=1}^{i=t_f} P_i / ((1 + \alpha)^{i-1/2})$$

Si les charges sont positives, le critère de choix entre les différentes solutions sera le bilan actualisé le plus bas.

Dans le cas de tours de refroidissement à tirage mécanique, on peut supposer que les coûts de maintenance sont très voisins car ils sont principalement liés à la maintenance des ventilateurs. En prenant en compte les deux premiers critères et en sélectionnant la solution la moins chère comme référence, le Tableau XII.3 montre que le système par voie humide est beaucoup plus économique que le système par voie sèche, et que le tirage naturel est plus économique que le tirage mécanique. D'un point de vue économique, les systèmes par voie sèche seraient beaucoup moins recommandables car ils sont plus chers, et ils ont une influence plus importante sur le coût des kWh. Aussi, les systèmes par voie sèche peuvent être recommandés uniquement dans les cas de pénurie d'eau.

Tableau XII.3 : Comparaison des différents types de systèmes de refroidissement à recirculation avec une durée de vie de 25 ans et un ratio d'actualisation de 8 % (étude sur les unités EDF de 1 300 MW_e).

[L. Caudron, "Les réfrigérants atmosphériques industriels", éditions Eyrolles]

Type de système de réfrigération	Tour de refroidissement par voie humide		Tour de refroidissement par voie humide/sèche	Tour de refroidissement par voie sèche	
	À tirage naturel	À tirage induit	À tirage induit	À tirage naturel	À tirage induit
Approche K (air sec 11°C/air humide 9°C)	12,5	12,5	13,5	16	17
Pression de condensation nominale (en mbars)	63	63	66	82	80
Puissance thermique (en MW _{th})	2458				
Puissance électrique délivrée (MW _e)	1285	1275	1275	1260	1240
Puissance des ventilateurs (MW)	0	10	12	0	26
Alimentation des pompes (MW)	13	13	8	14	13
Coût du réfrigérant	1	1,25	2,3	5,7	4,8
Coût du refroidissement	1	1,1	1,6	3,6	3,1
Différence en coût en kWh/coût du kWh (%)	0	1,0	2,4	8,4	8,9

Tableau XII.4 : Comparaison des tours de refroidissement par voie humide et des condenseurs à air avec une durée de vie de 20 ans et un ratio d'actualisation de 8 % pour une unité à cycle combiné de 290 MW_{th}.

Type de système de réfrigération	passage unique	Tour de refroidissement par voie humide		Condenseur à air
		tirage naturel	tirage induit	
Approche K (air sec 11°C/air humide 9°C)	/	≈8	≈8	≈29
Pression de condensation nominale (en mbars)	34	44	44	74
Puissance thermique (en MW _{th})	290	290	290	290
Différence de puissance électrique délivrée (en MW_e)	+ 0,6	0	0	- 1,8
Alimentation du ventilateur et de la pompe (en MW)	1,9	1,95	3	5,8
Différence globale en puissance électrique (en millions d'Euros)	-4,7	-2,9	0	12,6
Écarts de coût en consommation en eau (en millions d'Euros)	-8,9	-8,9	0	0
Écarts de coût en système de refroidissement (en millions d'Euros)	-3,0	1,9	0	8,9
Coût des systèmes de refroidissement	0,82	1,11	1	1,54
Bilan général des coûts (en millions d'euros)	-16,5	-1,0	0	12,6

La même comparaison est possible pour les installations en cycle combiné. Le Tableau XII.4 montre que les systèmes par voie sèche sont plus onéreux que les systèmes par voie humide, mais la différence est plus faible qu'avec les centrales électriques classiques. La différence entre le tirage mécanique et naturel est moins importante ; elle est plus ou moins comparable. Les systèmes par voie humide sont préférables aux systèmes par voie sèche. Les coûts de maintenance, les taxes éventuelles pour l'eau d'appoint ou les débits de purge, ainsi que les coûts des produits chimiques nécessaires au traitement de l'eau ne sont pas pris en compte dans ce tableau. Il peut également sous-estimer le coût des systèmes par voie humide ou surestimer le coût pour le refroidissement par voie sèche. Donc, les systèmes par voie sèche peuvent être recommandés en fonction du

prix de l'eau et du traitement de l'eau pour les systèmes par voie humide, ou si l'on tient compte de la durée de vie de l'installation lorsqu'une durée de vie plus courte réduit les différences entre les systèmes par voies sèche et humide.

Un facteur important dans la comparaison des coûts est le rendement, ou plutôt la perte de rendement liée au refroidissement avec des systèmes de refroidissement moins efficaces. Cette perte est mesurée via le facteur adimensionnel énergie-température (en $\text{kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}}$) par degré d'écart de température de l'eau de refroidissement (en K). Dans l'exemple théorique suivant, le facteur provient de [Paping, pers. comm.].

En partant du principe qu'une vapeur de 100 bars à 530 °C correspond à 3 451 kJ/kg, on obtient (en appliquant le diagramme de Mollier) :

50 mbars.	32,7[°C])	2110 [kJ/kg]
60 mbars.	35,6[°C])	2130 [kJ/kg]
70 mbars.	38,8[°C])	2150 [kJ/kg]

Les pressions de fonctionnement mentionnées précédemment et leurs températures de condensation respectives sont également liées à une température d'eau de refroidissement moyenne en Europe de 15°C, ainsi qu'à une hausse de 10°C de l'eau de refroidissement avec le condenseur lui-même.

Avec le coefficient de transfert thermique du condenseur, le condensat le quittera avec une température totale de 30°C et une pression de fonctionnement inséparable d'environ 43 mbar (cf. Tableau XII.3 et Tableau XII.4). Aussi, pour calculer le facteur énergie-température pour les températures des influents de refroidissement, le calcul commence avec 50 mbar.

Le rendement est calculé selon le cycle de Carnot, qui donne un rendement approchant les 40 % habituellement utilisés pour les centrales électriques classiques :

$$\begin{aligned} \text{à 50 mbars} &= (3\,451 - 2110) / (3\,451 - 4,18 * 32,7) \times 100 = 40,4609\% \\ \text{à 60 mbars} &= (3\,451 - 2130) / (3\,451 - 4,18 * 35,6) \times 100 = 40,0037\% \\ \text{à 70 mbars} &= (3\,451 - 2150) / (3\,451 - 4,18 * 38,8) \times 100 = 39,5583\% \end{aligned}$$

La perte de rendement minimale exprimée par degré de température dans un contexte idéal (thermodynamique) :

$$\begin{aligned} \text{différence de rendement entre 50 mbar et 60 mbar} &= 4,572 \text{ ‰ pour } 2,9 \text{ K de différence} \\ \text{différence de rendement entre 60 mbar et 70 mbar} &= 4,454 \text{ ‰ pour } 3,2 \text{ K de différence} \\ \text{différence de rendement entre 50 mbar et 70 mbar} &= 9,026 \text{ ‰ pour } 6,1 \text{ K de différence} \end{aligned}$$

Cette perte de rendement peut par ailleurs être exprimée par rapport au rendement total et par K :

$$\begin{aligned} 4,572 \text{ ‰} / (2,9 \text{ K} * 0,4) &= 3,9 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}} \text{ par K de différence} \\ 4,45 \text{ ‰} / (3,2 \text{ K} * 0,4) &= 3,5 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}} \text{ par K de différence} \\ 9,026 \text{ ‰} / (6,1 \text{ K} * 0,4) &= 3,7 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}} \text{ par K de différence} \end{aligned}$$

À partir de ce calcul simplifié, il ressort que pour un rendement d'environ 40 %, la perte ou le gain pour chaque degré d'écart de température de l'eau de refroidissement peut être estimée en utilisant le facteur de 3,5 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{MW}_{\text{th}}$ par K.

XII.7 Choix du traitement des méthodes alternatives de recirculation d'eau - monitoring

Comme mentionné précédemment, les problèmes de corrosion se posent rarement dans les systèmes de refroidissement des centrales électriques. L'utilisation de produits inhibiteurs de corrosion est toutefois inutile pour les systèmes de refroidissement refroidis par de l'eau brute.

XII.7.1 Traitement anti-tartre

Avec un système de refroidissement par voie humide, la seule façon de réduire les rejets de chaleur dans l'environnement aquatique consiste à faire recirculer de façon l'eau de refroidissement. Cette pratique entraîne une hausse du facteur de concentration (Tableau XII.5). Elle est souvent utilisée pour les centrales électriques situées sur les **cours d'eau et dans les estuaires**.

Cette concentration tend à entraîner la précipitation de sels de calcium qui ne sont pas très solubles : carbonate, sulfate, phosphate. Le tartre que l'on trouve le plus souvent est le carbonate de calcium. Il se dépose sur les tubes des condenseurs et dans le remplissage des tours de refroidissement, ce qui entraîne une baisse de rendement. Deux techniques de prévention sont généralement utilisées pour empêcher la formation de carbonate de calcium dans les systèmes de refroidissement des centrales électriques. La première est l'adoucissement à la chaux de l'eau d'appoint, la seconde est la vaccination de l'eau en circulation avec de l'acide sulfurique ou chlorhydrique.

Tableau XII.5 : Rapport entre le facteur de concentration, le débit d'eau et l'énergie rejetée dans le cours d'eau de réception (exemple individuel)

Facteur de concentration	Débit d'eau (m ³ /h)	Énergie rejetée dans le cours d'eau de réception (%)
1	36000	100
1,2	3600	8,3
1,3	2600	5,5
1,4	2100	4,2
1,5	1800	3,3
2,0	1200	1,7
3,0	900	0,8
4,0	800	0,5
5,0	750	0,4
6,0	720	0,3

Seuls les inhibiteurs de tartre organiques pour lesquels les données écotoxicologiques sont disponibles sont utilisés, conformément aux réglementations définies. Leur emploi est extrêmement limité. En réalité, les données écotoxicologiques actuelles sont souvent insuffisantes. De plus, ces substances émises dans le cours d'eau de réception peuvent altérer les opérations de traitement d'eau des industries situées en aval du point de rejet.

Les centrales électriques **situées sur les côtes** sont généralement refroidies par un système à passage unique. Les tours de refroidissement fonctionnant sur après un pré-refroidissement peuvent être installées afin de réduire la charge thermique. Ce choix dépendra principalement des conditions locales (marées, mélange, etc.).

D'autre part, le fonctionnement par recirculation d'eau de mer est exceptionnel. En réalité, des facteurs de concentration élevés peuvent entraîner la précipitation d'une grande quantité de sels (carbonate de calcium, sulfate de calcium, sulfate de baryum, etc.). Même si la formation de carbonate de calcium peut être évitée en ajoutant de l'acide, il n'en va pas de même pour les autres sels qui peuvent uniquement être stabilisés par les inhibiteurs organiques (phosphonates, polyacrylates, copolymères, etc.).

XII.7.2 Traitements anti-encrassement (biocides)

Une analyse récente des expériences conduites en EUROPE avec des méthodes visant à réduire l'encrassement biologique a permis de tirer les conclusions suivantes :

Le **nettoyage mécanique** des systèmes et la **filtration de l'eau** sont les procédés les plus couramment utilisés. Il passe par le nettoyage continu des tubes des condenseurs par des balles de mousse ou des brosses, le nettoyage manuel, l'utilisation de dégrilleurs, de filtres dotés de tamis de différentes largeurs.

Trois autres méthodes physiques sont également régulièrement utilisées pour le traitement anti-encrassement des systèmes industriels. Elles concernent :

- le maintien de vitesses assez élevées pour éviter la fixation d'organismes organiques ($v > 2$ m/s), cette recommandation est très suivie de nos jours ;
- la hausse de température, qui consiste à élever la température de l'eau de refroidissement au-delà de 40°C pendant quelques douzaines de minutes. Cette technique élimine les organismes fixés (moules), mais requiert néanmoins une conception appropriée des systèmes de refroidissement ;
- les revêtements et les peintures non toxiques qui réduisent la fixation des organismes, renforcent l'effet de vitesse et facilitent le nettoyage. Ces revêtements sont cependant chers et doivent être remplacés tous les 4 à 5 ans.

D'autres techniques sont parfois utilisées telles que :

- l'assèchement ;
- l'installation de filtres spécifiques (filtres à moules).

Les méthodes physiques s'appliquent à l'eau de mer et à l'eau douce.

Les UV peuvent être utilisés comme traitement non chimique dans certains cas.

Un **traitement chimique** peut être utilisé dans les cas où des méthodes physiques ne sont pas appropriées ou montrent des résultats insuffisants. Il existe des produits oxydants tels que le chlore, la monochloramine, le dioxyde de chlore et l'ozone qui peuvent servir de traitement anti-encrassement. Certains composés organiques dégradables applicables par intermittence et non toxiques pour l'environnement de réception peuvent être une alternative à la chloration. Parmi ceux-ci, certains polymères aminé créant un film protecteur se sont avérés être prometteurs comme matériaux anti-corrosion. Mais à ce jour, le traitement intermittent au sulfate de fer est plus efficace.

XII.7.3 Monitoring

Étant donné le débit des systèmes de refroidissement des centrales électriques, ils ne peuvent raisonnablement pas fonctionner sans un système de monitoring et de contrôle avancé. Ce raisonnement s'applique à la fois aux problèmes de tartre et de développement biologique.

Pour éviter l'**entartrage**, la régulation d'injection d'acide dans l'eau de recirculation est généralement soumise à un contrôle continu de paramètres physico-chimiques tels que : l'alcalinité, la dureté calcique, la conductivité, la température au niveau de la sortie du condenseur. Un ordinateur utilise ces différents paramètres comme base de calcul d'un indice d'entartrage spécifique, et les compare avec les instructions de fonctionnement. Au besoin, le régulateur adapte le débit de la pompe d'injection. Des méthodes de contrôle plus précises sont également utilisées dans des sites à haut risque. Elles portent notamment sur la mesure du pH 4 critique et d'autres contrôles de tartre.

En ce qui concerne le suivi des **développements biologiques**, il existe plusieurs types de capteurs qui sont mis en place. Parmi ceci, il faut citer les biomoniteurs et les capteurs électrochimiques.

Un contrôle de la qualité de l'eau de drainage est souhaitable ; il permettra de contrôler des paramètres tels que la température, la concentration en oxygène, le pH, la conductivité, etc.

XII.8 Conception du système de refroidissement

Il ne faudrait pas négliger que l'adoption de systèmes d'eau de refroidissement pour un site donné peut être la conjugaison de plusieurs facteurs différents. Les caractéristiques propres à chaque site sont le facteur le plus évident.

XII.8.1 Conception et récupération d'énergie

Dans les centrales thermiques classiques, le cycle thermodynamique impose le rendement global de l'installation. L'économiseur, le surchauffeur et le réchauffeur optimisent le fonctionnement de la chaudière. Les surchauffeurs à basse et haute pression augmentent la température de l'eau d'alimentation en récupérant une partie de l'énergie retirée grâce à l'extraction de vapeur. Afin de réduire la consommation électrique des auxiliaires, les pompes d'alimentation en eau actionnées par des turbines sont également utilisées ; elles sont également fournies par des extractions de vapeur. L'air de combustion est également chauffé par des réchauffeurs d'air avant d'entrer dans la chaudière. Tous ces dispositifs ont le même objectif : **réduire les pertes énergétiques du cycle**.

Les lois de la thermodynamique régissent la perte énergétique dans le condenseur.

Si des gains en énergie peuvent être obtenus dans les systèmes de refroidissement, c'est essentiellement au niveau de la conception et des choix qui en découlent qu'ils peuvent être faits. Certaines règles en or peuvent être appliquées :

- limiter le nombre de pompes,
- éviter les tours de refroidissement à tirage mécanique,

- si une tour de refroidissement est nécessaire, privilégier une tour de refroidissement par voie humide aux systèmes de récupération (récupérateurs),
- si les débits de déconcentration sont suffisants, installer une turbine de récupération hydraulique sur la purge de déconcentration ;
- lorsque les débits ne doivent pas être constants, utiliser des variateurs de fréquence sur les pompes ou les ventilateurs.

Les conclusions suivantes ont émergé suite à ces observations :

- deux ensembles de pompes sont suffisants : un pour l’approvisionnement du système de refroidissement auxiliaire, l’autre pour le système de refroidissement principal ;
- si le refroidissement à passage unique n’est pas possible, les tours de refroidissement par voie humide à tirage naturelle devraient être préférées aux autres systèmes de refroidissement ;
- deux schémas sont toutefois concevables (Figure XII.13 et Figure XII.14 dans la Section XII.11) et permettent d’éliminer la chaleur provenant du système auxiliaire via la tour de refroidissement.

XII.8.2 Mesures de conception et de réduction du bruit

La réduction du bruit des systèmes de refroidissement peut être obtenue de plusieurs façons :

- en installant des murs anti-bruits autour des tours de refroidissement,
- en modifiant le relief du site (pentes boisées),
- en choisissant des ventilateurs « peu bruyants »,
- en utilisant des panneaux anti-bruits.

Ces différentes solutions permettent généralement de réduire les émissions sonores de façon significative.

XII.8.3 Mise en œuvre des méthodes physiques

Dès la phase de conception, il est absolument nécessaire de s’intéresser à la mise en œuvre de méthodes physiques permettant notamment d’éviter les développements biologiques. Elles concernent notamment les points suivants :

- garantir une vitesse adéquate dans toutes les parties du système ;
- installer des systèmes de nettoyage continu de tous les échangeurs de chaleur si cela est possible techniquement ;
- fournir des filtres à moules sur les sites à risque ;
- concevoir les systèmes permettant de procéder aux opérations de nettoyage manuel dans des conditions normales de fonctionnement (fonctionnement de l’échangeur de chaleur de substitution) ;
- concevoir les systèmes permettant les hausses de température (recirculation avec une tour de refroidissement) ;
- dans des tours de refroidissement par voie humide à tirage naturel, préférer les corps de remplissage avec une surface adaptée et/ou une structure permettant de réduire l’encrassement ; le nettoyage périodique doit être facultatif, par exemple en cas de teneur élevée en solides dans l’eau de refroidissement usée.

XII.8.4 Modélisation et tests pilotes

L’objectif de la modélisation est d’étudier tous les impacts physiques et chimiques et d’adapter les résultats de cette modélisation aux installations, afin de réduire le plus possible ces impacts. Il est particulièrement important d’étudier :

- l’extraction et les déversements d’eau,
- les aspects visuels du site,
- le développement de panaches,
- les impacts thermiques et chimiques de l’environnement de réception.

L’objectif des tests sur la boucle pilote est de définir le traitement optimal de l’eau de refroidissement pour le tartre et des développements biologiques. Pour ce faire, les installations pilotes représentant des conditions réelles de fonctionnement commerciales sont installées sur le site pendant environ une année. En général, ces tests pilotes devraient durer assez longtemps pour permettre d’intégrer les variations de qualité de l’eau de refroidissement en raison des variations saisonnières. Ils servent également à estimer l’opportunité de certains choix sur une échelle représentative (exemples : choix du remplissage de la tour de refroidissement, choix des alliages, etc.).

XII.8.5 Choix d’un système de refroidissement

Comme l'étude de l'analyse précédente le montre, le choix du type de système de refroidissement dépend essentiellement des conditions locales propres à chaque site. Aussi, il est extrêmement difficile et pas forcément approprié de donner une recommandation unique. Le diagramme concernant la logique de prise de décision (Figure XII.15, Section XII.11) donne une idée des cas possibles.

Du point de vue énergétique, le refroidissement par voie humide (refroidissement à passage unique si nécessaire avec une tour de refroidissement par voie humide) est de loin la solution la plus économique avec l'avantage écologique d'économiser de l'énergie et d'éviter les émissions de gaz de combustion. Qu'il s'agisse d'une technique à passage unique ou d'un système à recirculation avec une tour de refroidissement par voie humide, les bilans énergétiques sont favorables à cette solution.

Bien entendu, ces refroidissements par voie humide ne peuvent être envisagés que si le cours d'eau de réception s'y adapte. Pour une gestion durable des ressources en eau, il est absolument essentiel que ce point soit examiné attentivement en prenant particulièrement en compte les développements futurs. Une modélisation à long terme, intégrant des données statistiques, est un outil nécessaire à l'estimation et à l'évaluation des impacts sur l'environnement. Cette approche essentielle repose sur le choix du mode de refroidissement, du facteur de concentration et des traitements potentiels.

XII.9 Conclusions

Une approche MTD pour les systèmes de refroidissement des **nouvelles** centrales électriques nécessite une série de points de réflexion :

1. le besoin de faire des études préalables concernant les conditions du site ;
2. le choix de matériaux résistants à la corrosion pour la surface d'échange de chaleur des condenseurs et des tours de refroidissement ;
3. la mise en place de protections locales (peintures, protection cathodique, etc.) ;
4. la réduction des consommateurs d'énergie (ventilateurs, pompes) ;
5. l'installation de systèmes anti-bruit (murs, panneaux, modification du relief du site, etc.) ou le choix de solutions entraînant des émissions plus faibles (ventilateurs peu bruyants) ;
6. l'optimisation de l'utilisation des réactifs de traitement et la mise en place de (bio) moniteurs et de dispositifs de suivi et de contrôle chimique ;
7. l'étude des systèmes permettant de gérer les opérations de hausse des températures ;
8. la conception des captages d'eau pour limiter le prélèvement d'organismes vivants ;
9. un contrôle de la qualité des rejets d'eau par le drainage (température, oxygène, etc.).

Les points 3, 4, 5, 6 et 9 sont également importants pour les centrales électriques **existantes** car ils concernent le mode de fonctionnement et de gestion d'une installation. Les autres problèmes concernent l'évaluation du site qui, pour une installation existante, est un fait donné. En ce qui concerne ces points, le résultat d'une évaluation pour l'installation existante peut entraîner un profond changement dans la conception d'un système de refroidissement existant qui est généralement cher et pas forcément économique. Dans ces situations, la durée d'amortissement de l'installation (échangeur de chaleur, structure de captage) affectera tous les changements possibles résultant d'une évaluation d'un site.

Par expérience, aucune solution unique n'a été trouvée. Chaque cas est particulier et dépend, par exemple, du cycle de la centrale électrique. Dans le cas d'unités équipées de systèmes à recirculation, le choix du traitement de l'eau dépendra du facteur de concentration choisi, des températures maximales et de la qualité du retrait d'eau. Il en va de même pour la lutte contre les développements biologiques. Même si les macro-organismes peuvent généralement être éliminés par des chocs thermiques, cette solution ne peut pas être appliquée pour éliminer les biofilms.

XII.10 Bibliographie

-B. Vincent, « Exploitation et maintenance de la source froide », Revue Générale Nucléaire, n° 3, 247-257, mai/juin 1986.

-R. Gras et J. Jacquet « Problèmes d'environnement liés à la source froide des centrales thermiques », École d'Été de mécanique des fluides, 353-393, 6-10 octobre 1975.

- H.A. Jenner, C.J.L. Taylor, M. Van Donk, M. Khalanski, « Chlorination By-products in Chlorinated Cooling Water of some European Coastal Power Stations », *Marine Environmental Research*, vol. 43, n°4, pp. 279-283, 1997.
- R. Ambrogi, « Environmental Impact of Biocidal anti-fouling Treatment by Chlorine Dioxide ». Actes du Premier Symposium Européen sur le dioxyde de chlore. *Collana ambiente*, vol. 17, pp. 119-132, Rome, 1996.
- L. Duvivier, « Étude des divers procédés de lutte contre l'entartrage des circuits de réfrigération des centrales électriques », Travail de Fin d'études, Université Catholique de Louvain, Facultés des Sciences Appliquées, juin 1988.
- G. Gutner, « Aéroréfrigérants secs et mixtes », École d'Été de mécanique des fluides, 60-69, 610 October 1975.
- Actes : Conférence sur les systèmes de refroidissement avancés et les tours de refroidissement, EPRI TR-104867, Février 1995.
- L. Duvivier, « Concentration et conditionnement des eaux de surface intérieures dans les circuits de refroidissement atmosphériques des grandes centrales thermiques », 36^{èmes} Journées internationales du CEBEDEAU, 205-234, Liege, 25-27 mai 1983.
- Deleval, Duvivier, Hosdain, « Lutte contre l'entartrage des circuits de réfrigération des centrales électriques », 9th Cooling Tower and Spraying Pond Symposium-International Association for Hydraulic Research, Institut von Karman, 20-23 septembre 1994.
- L. Duvivier, « Considérations générales relatives à l'entartrage des circuits de réfrigération industriels », Actes des Journées Information Eaux, Vol. 1, 311-3111, 18-20 septembre 1996.
- H.A. Jenner, J.P.M. Mommen, « Driehoeksmosselen en aangroeiproblemen », *H2O*, 18^{de} jaargang, nr. 1, pp. 2-6, 1985
- Guide de l'environnement non radioactif - Protocole de chloration massive des réfrigérants, EDF-SPT, Département Sécurité - Radioprotection - Environnement, juillet 1984.
- Aprosi, Bidard, Nepveu de Villemarceau, « Expérience d'exploitation des réfrigérants des centrales françaises : hydrobiologie - chimie aquatique », *Revue Generale Nucléaire*, n° 5, 425-429, septembre/octobre 1986.
- Rook, « Formation of Haloforms during Chlorination of Natural Waters », *Water Treatment and Examination*, 23 (part 2), 234, 1974.
- Bellar, Lichtenberg, Kroner, « The Occurrence of Organohalides in Chlorinated Drinking Waters », *JAWWA*, 66, 73, December 1974.
- Amy et al., « Evaluation of THM Precursor Contributions from Agricultural Drains », *JAWWA*, 57-64, January 1990.
- G. Asplund, A. Grimvall, « Organohalogens in Nature -More widespread than previously assumed », *Environmental Science and Technology*, 25, pp. 1346-13450, 1991.
- L. Duvivier, « Formation et élimination des organo-halogénés lors de la désinfection des eaux », Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées, Université Catholique de Louvain, juin 1993.
- C.T. Jafvert, R.L. Valentine, « Reaction Scheme for the Chlorination of Ammoniacal Water », *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 26, n° 3, 1992.
- Bilello, Singley, « Removing Trihalomethanes by Packed Column and Diffused Aeration », *JAWWA*, 62-71, Février 1986.
- Munz, Roberts, « Air-Water Phase Equilibria of Volatile Organic Solutes », *JAWWA*, 62-69, Mai 1987.
- Isaac, Morris, « Rates of Transfer of Active Chlorine between Nitrogenous Substances », *Water Chlorination - Environ. Impact and Health Effects*, Vol. 3, 1980.

- Weil, Morris, « Kinetics Studies on the Chloramines. The Rates of Formation of Monochloramine, N-chloromethylamine and N-chlorodimethylamine », Jour. Am. Chem. Soc., Vol. 71, 1979.
- 4 S.A. Hubbs et al., « Use of Chlorine Dioxide and Chloramines as alternate Disinfectants al Louisville », Actes du séminaire AWWA, Conférence AWWA, pp. 51-60, Atlanta, 15 Juin 1980.
- Neden et al., « Comparing Chlorination and Chloramination for Controlling Bacterial Regrowth », JAWWA, 80-88, Juillet 1992.
- « Centrale de CHOOZ B1 B2-Examen des Salissures biologiques-Rapport de synthèse », Rapport LABORELEC CO3-800-95-005F/LDU/RVM, 22/03/05.
- « CHOOZ B - Essais sur poste pilote. Conditionnement des eaux de réfrigération », Rapport LABORELEC CO3/06578 - 1, 15/01/1991.
- « Eaux de réfrigération : Centrale de Seraing-Résultats des essais en station pilote », Rapport Laborelec SER/ER/LD-CO3, 04/11/92.
- « Eaux de réfrigération : Centrale de Drogenbos-Résultats des essais en station pilote », Rapport Laborelec DROG/ER/LD-CO3, novembre 91.
- L.C. Neale, « Cooling Problems of Thermal Power Plants - Physical Model Studies », École d'Été de mécanique des fluides, 159-180, 6-10 Octobre 1975.
- J.P. Benque, « Modèles mathématiques des rejets thermiques », École d'Été de mécanique des fluides, 184-200, 6-10 octobre 1975.
- J. Smitz, « Pégase-Planification et gestion de l'assainissement des eaux », Ministère de la Région Wallonne, Rapport de Synthèse, 1991.
- Ernst, Winkler, « Flow Patterns of Cooling Tower Plumes in the near atmosphere Results from a mathematical model », 9th Cooling Tower and Spraying Pond Symposium International Association for Hydraulic Research, Institut von Karman, 20-23 septembre 1994.
- , Cycle Chemistry Guidelines for Fossil Plants : All Volatile Treatment », EPRI, TR-105041, avril 1996.
- Mortensen, Conley, « Film Fill Fouling in Counterflow Cooling Towers : Mechanism and Design », Cooling Tower Institute, Paper TP94-05, Houston, février 13-16, 1994.
- Montjoie, Noble, Mirsky, « Research of Fouling Film », Cooling Tower Institute, Nouvelle Orléans, février 17-19, 1993.
- Duvivier, van Damme, Bolsée, « Le choix des corps d'échange des tours de réfrigération et leur influence sur les phénomènes d'entartrage par le carbonate de calcium », Actes des Journées d'Information Eaux, Vol. 1, 371-3711, 18-10 septembre 1996.
- Dedieu, « Étude expérimentale de l'entartrage des corps d'échange de réfrigérants industriels », Thèse de doctorat INSA Toulouse, 05/06/97.
- J.P. Fesson, « Le primage et la séparation dans les réfrigérants », École d'Été de mécanique des fluides, 202-215, 6-10 octobre 1975.
- G. Ribier, « Optimisation dans le calcul thermique et la détermination d'un réfrigérant atmosphérique à tirage naturel », École d'Été de mécanique des fluides, 217-229, 6-10 octobre 1975.
- Manoha, Lepeintre, Pechon, « Le Modèle TELEMAC-3D pour les écoulements tridimensionnels : de nouvelles perspectives pour les études d'environnement », Hydroécologie Appliquée, Tome 4, Vol. 1, 13-20, 1992.
- Nagel, « New Developments in Air-Cooled Steam Condensers and Dry cooling Towers », 9th Cooling Tower and Spraying Pond Symposium -International Association for Hydraulic Research, Institut von Karman, 20-23 septembre 1994.
- van der Spek, « Advanced Low Noise Cooling Fan », 9th Cooling Tower and Spraying Pond Symposium -International Association for Hydraulic Research, Institut von Karman, 20-23 septembre 1994.

- Kosten, Wyndrum, Wet, Dry and Hybrid Systems -A Comparison of the Thermal Performance », EPRI - Conference on Cooling Towers and Advanced Cooling Systems, St Pétersbourg, 3 août, 1994.
- Burns, Nicholson, Annett, Alexander, « The Impacts of Retrofitting Cooling Towers at a Large Power Station », EPRI - Conference on Cooling Towers and Advanced Cooling Systems, St Pétersbourg, 3 août, 1994.
- Lindahl, Jameson, « Plume Abatement and Water Conservation with the Wet/Dry cooling Tower », EPRI - Conference on Cooling Towers and Advanced Cooling Systems, St Pétersbourg, 3 août, 1994.
- Gill et al. « A Mechanistic Approach to the Development of Chemical Solutions for Fouling of Cooling Tower Film Fills », EPRI - Conference on Cooling Towers and Advanced Cooling Systems, St Pétersbourg, 3 août, 1994.
- J.F. Commaille, « Perturbations apportées par le rejet de produits tartrifuges dans les rivières sur les traitements physico-chimiques ultérieurs de ces eaux », Thèse de doctorat, INSA Toulouse, 25 octobre 1982.
- L. Duvivier, « Élimination des tartrifuges avant rejet. Conséquences industrielles », Tribune du Cebedeau, n° 487-488, 37, 247-252, 1984.
- « Zebra Mussel Monitoring and Control Guide », EPRI TR-101782, décembre 1992.
- Leyen et al., « Mitigation of Macrofouling : A Comparative Study of Ozone and on Organic Filminducing Polymer », 7th International Zebra Mussel and Aquatic Nuisance Species Conference, Nouvelle Orléans, 28-31 janvier, 1997.
- Duvivier et al., « Do we need Chlorine for Water Treatment ? », Actes du Power-Gen '96 Europe, Vol. 1, 757-770, juin 96.
- Duvivier et al., « Fighting Zebra Mussel Fouling with Ozone », EPRI-Service Water System Reliability Improvement Seminar, Daytona Beach, juin 25-27, 1996.
- K. D'Hondt, « On-line Analyse van de "Kritische pH », Applitek, Vergadering Scheikunde, Laborelec, 28/04/93.
- Lin et al., « Surveillance de la menace d'entartrage du circuit de refroidissement d'une centrale nucléaire par un capteur électrochimique automatique », Actes des Journées Information Eaux, Vol. 1, 331-3316, 18-20 septembre 1996.
- G.J. Licina, « Monitoring Corrosion and Biofilm Formation in the Emergency Service Water System at Susquehanna », EPRI-Service Water System Reliability Improvement Seminar, Daytona Beach, 25-27 juin, 1996.
- L. Caudron dans « Les réfrigérants atmosphériques industriels », Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France, 1991.
- Y. Coeffe, P-M. Clique, B. Manoha, « Thermal Impact Studies for French Coastal Nuclear Sites », 18ème ICCE. Le Cap, pp 2342-2356, 1982.
- M. Darras, J. Montfort, J.F. Parent, « Ouvrages de prise et de rejet d'eau, conception et réalisation. A. The Dilution of Heated Discharges of Power Plants. B. Seashore Power Stations and Protection of the Marine Environment », Rapport EDF DER HE/ 42/85.18, 1985.
- F. Bordet, « Conception des ouvrages d'eau des centrales nucléaires littorales », Rapport EDF DE E-3011, 1983.
- B. Manoha, « Three-dimensional numeric Modelling of Thermal impact for Gravelines Nuclear Power Plant », 23ème Congrès IAHR. Ottawa, 1989.
- A. Gilbert, R. Gras, D. Rault, « Numeric Computation of Natural River Temperatures », International Conference on Water Quality Modelling in the Inland Natural Environment. Bornemouth England, paper M1, pp. 457-472, 10-13 juin 1986.

- A.W.H. Tumpenny, T.E. Langford, R.J. Aston, « Power Stations and Fish », CEGB Research, pp. 27-39, avril 1985.
- F. Travade, « Aspiration d'organismes aux prises d'eau des centrales », Revue générale nucléaire, n°1, pp. 59-62, 1987.
- EDF International, « Cordemais Coal-Fired Power Station. Units 4 and 5. Environmental Impact Study », 1987.
- J.W. Whitehouse, M. Khalanski, M. Saroglia, « Marine Macrofouling Control Experience in the UK with an overview of European Practices », Actes du symposium sur les technologies de contrôle du macro-encrassement des condenseurs, Hyannis, Mass. EPRI rapport CS 3343, pp. 17.1-17.16, Déc., 1983.
- J.W. Whitehouse, M. Khalanski, M. Saroglia, H.A. Jenner, « The Control of Biofouling in Marine and Estuarine Power Stations », Rapport collectif de CEGB, EDF, ENEL et KEMA, 48 pp., 1985.
- M. Khalanski, G. Aprosi, F. Travade, « Biofouling Control in Power Station Circuits. Overview of Electricité de France's experience », Condenser Biofouling Control Symposium; the State of the Art, EPRI Meeting, Lake Buena Vista, Florida, 1985.
- M. Khalanski et Ph. Lutz, « La chloration de l'eau de réfrigération », Revue Générale Nucléaire, n°1, pp. 52-58, 1987.
- NCASI, « Naturally occurring Organohalogen Compounds - A Survey », Technical Bulletin, n°629, 1992.
- H. Palm, R. Lammi, « Fate of Pulp Mill Organochlorines in the Gulf of Bothnia Sediments », Environmental Science and Technology, 29, pp. 1722-1727, 1995.
- H. Kankaanpää, J. Tossari, « Background Levels of EOX and AOX in Sediments of the Gulf of Finland. Molecular Weight Distribution of EOX in Sediments », Chemosphere, 28, pp. 99-116, 1994.
- 3 G. Asplund, « The Origin of Organohalogenes found in the Environment », Linköping Studies in Arts and Science, n° 77, Linköping University, Suède, 1992.
- Ph. Gosse, M. Khalanski, « La modélisation numérique appliquée à l'évaluation d'impact hydrobiologique », Revue Générale Nucléaire, n° 1, pp. 46-51, 1987.
- M.J. Saleçon, J.M. Thébault, « Modélisation d'écosystème lacustre » Masson, ISBN 2-225-85627-3, 1997.
- G. Aprosi, C. Nepveu de Villemarceau, « French operational Experience of fouling Problems (Algae, Bryozoa) in cooling Towers », 6th IAHR Cooling Tower Workshop, Pise, Oct. 4-7, 1988.
- J.C. Moretteau, M. Khalanski, « Settling and Growth of *D. polymorpha* in raw Water Circuits of the Cattenom Nuclear Power Plant (Moselle, France) », Actes : Fourth International Mussel Conference, Madison, EPRI Report, mars 1994.
- M. Khalanski ; « Zebra Mussel and other invasive Species in cooling Water Circuits of French Power Stations on Rivers », Seventh International Zebra Mussel and Aquatic Nuisance Species Conference, New-Orleans, 28-31 jan. 1997.
- H.A. Jenner, J. Whitehouse, C. Taylor, M. Khalanski, « Cooling Water Management in European Power Stations », à paraître dans Hydroécologie Appliquée.
- B. Comby, « Un écologiste pour le nucléaire », La compagnie du livre, ISBN 2-84155-035-4, 1994.
- VGB-Richtlinie für die Planung von Kühlturmanlagen, R 135 P, 1997.
- VGB-Richtlinie „Empfehlung für den Winterbetrieb von Kraftwerks-Naßkühltürmen“, R 129 P, 1988
- VGB-Richtlinie „Einsatz von Holz im Kühlturbau“, R 611 U, 1996
- DIN 1947 : Wärmetechnische Abnahmemessungen an Naßkühltürmen.
- VGB-Richtlinie : « BTR Bautechnik bei Kühltürmen », R 610 U, 1997.
- VGB-« Kühlwasser-Richtlinie », R 455 P, 1990.

- VGB-Merkblatt « Aufbereitung von Betriebswasser und Kühlturm-Zusatzwasser durch Entcarbonisierung bzw. Flockung und Entcarbonisierung », M 403 G, 1992.
- VGB-Fachbuch : Bautechnik in Wärmekraftwerken, B 009, 1993.
- Tesche, W.; Planerische Berücksichtigung von Rezirkulation bei Zellenkühltürmen in Reihenanordnung. VGB-TB 110, VGB-Kraftwerkstechnik GmbH, Essen (1996).
- VDI-Wärmeatlas : Berechnung von Rückkühlwerken.
- Held : Kühlwasser-Verfahrenstechnik und chemische Methoden für die Kühlwasserbehandlung in Industrie und Kraftwerken, Vulkan-Verlag, Essen (1994).
- DIN EN 45 531 : Bestellrichtlinien Turbinenhilfseinrichtungen, Trockenkühlturm.
- DIN EN 45 532 : Bestellrichtlinien Turbinenhilfseinrichtungen, Naßkühlturm.
- VDI 3734 B12 : Emissionswerte technischer Schallquellen; Rückkühlanlagen; Kühltürme, 1990.
- Abwärme-Auswirkungen, Verminderung, Nutzen. Bericht 82-3 der Abwärmekommission 1982.
- Auswirkungen von Kühltürmen. Bericht 82-1 der Abwärmekommission, 1982.
- Ernst, Wurz : Naturzug-Naßkühlturm des Kernkraftwerks Philippsburg (Block 1). Untersuchungen des Betriebsverhaltens der Emissionen und der Schwadenausbreitung. Fortschritt-Bericht R. 15, Nr. 25 der VDI-Zeitschriften, 1983.
- Ernst Schnabel : Naturzug-Naßkühlturm des Kernkraftwerkes Philippsburg (Block 1). Ergebnisse der Schwadenausbreitungsrechnungen. Fortschritt-Bericht R. 15, Nr. 30 der VDI-Zeitschriften, 1984.
- Baer et al.: Thermodynamische Untersuchungen am Naturzug-Naßkühlturm des Kraftwerks Neurath und Modelle für das Betriebsverhalten und die Schwadenausbreitung, Fortschritt-Berichte R. 15 Nr. 7 der VDI-Zeitschriften.

XII.11 Illustrations

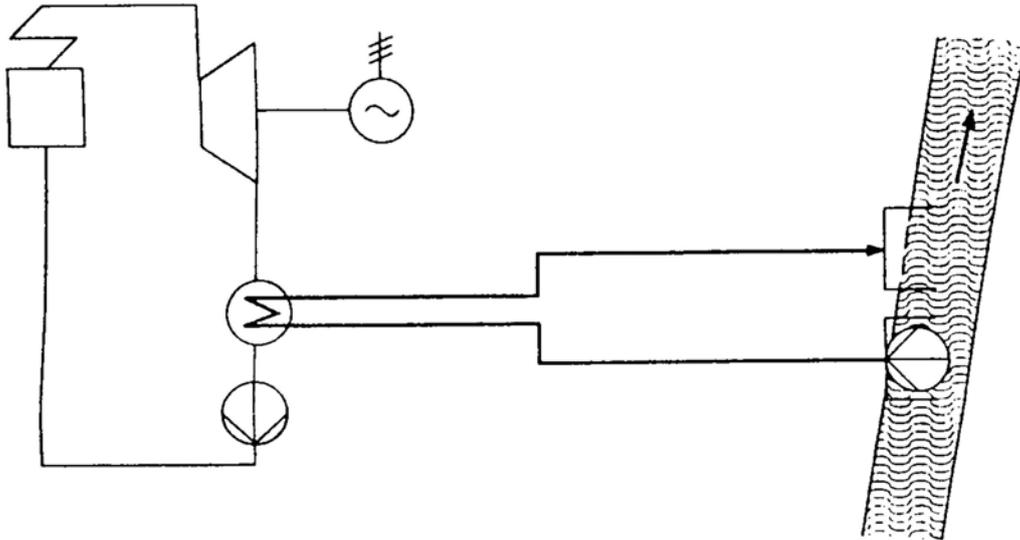
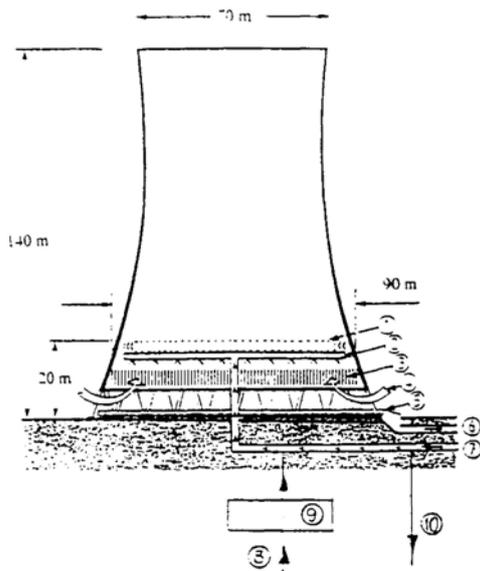


Figure XII.1 : Système à passage unique



- Wet cooling tower:
- 1 drift eliminator
 - 2 water distribution
 - 3 film pack
 - 4 air inlet
 - 5 water outlet
- Once through cooling with cooling tower
- 6 to aquatic environment
 - 7 from aquatic environment through condenser to cooling tower
 - 8, 9, 10 not existent
- Recirculating cooling
- 5 to condenser
 - 6 from condenser
 - 8 from aquatic environment
 - 9 water treatment
 - 10 to aquatic environment

Figure XII.2 : Tour de refroidissement par voie humide

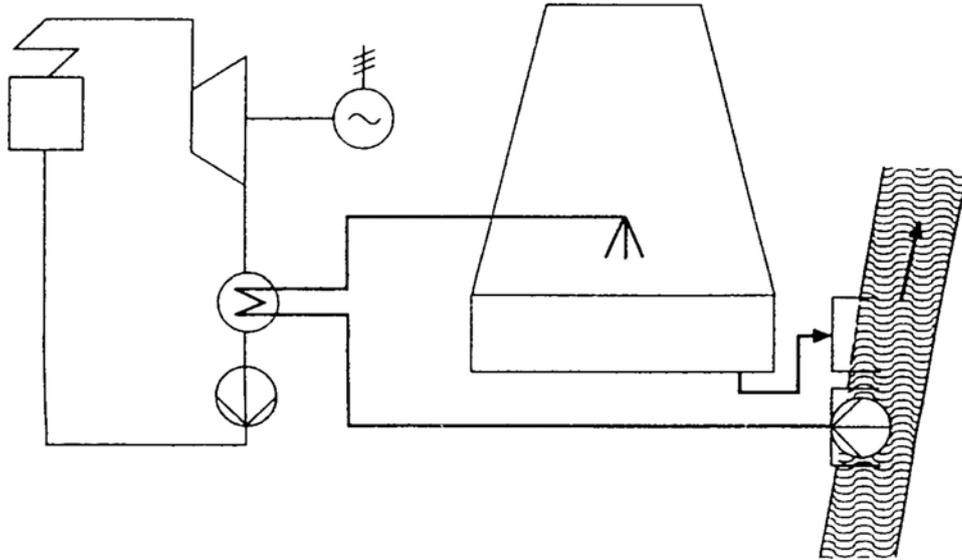


Figure XII.3 : Système de refroidissement à passage unique avec tour de refroidissement

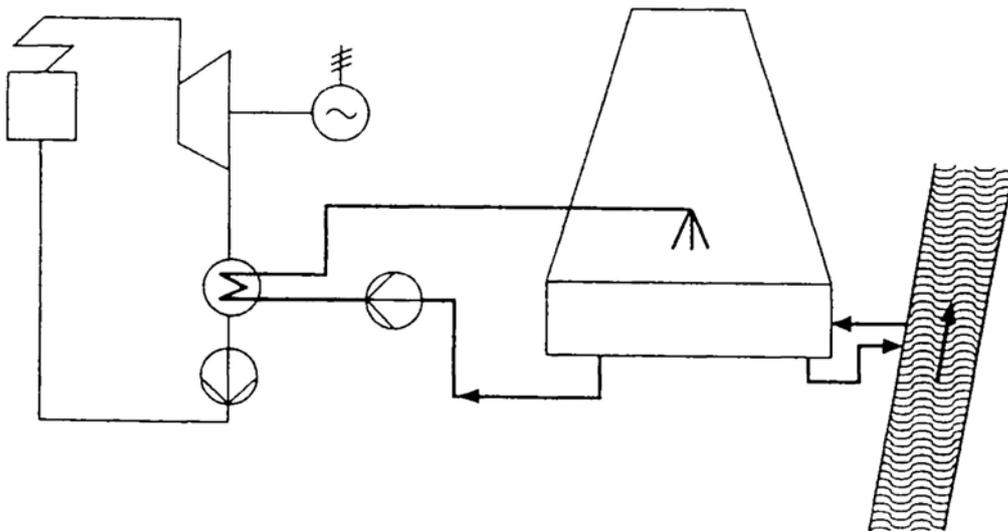


Figure XII.4: Refroidissement à recirculation

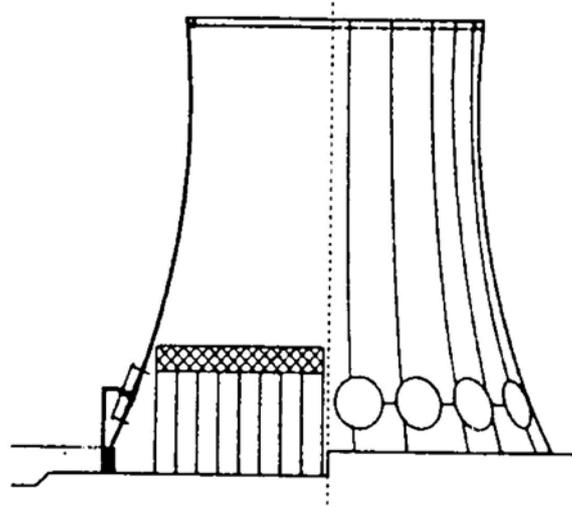


Figure XII.5 : Tour de refroidissement à tirage mécanique (ventilateurs à pression)

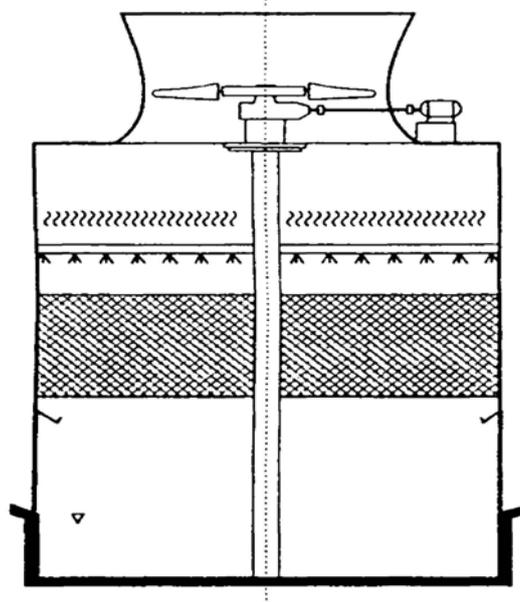


Figure XII.6 : Tour de refroidissement à tirage mécanique (ventilateurs à succion, construction de type cellulaire)

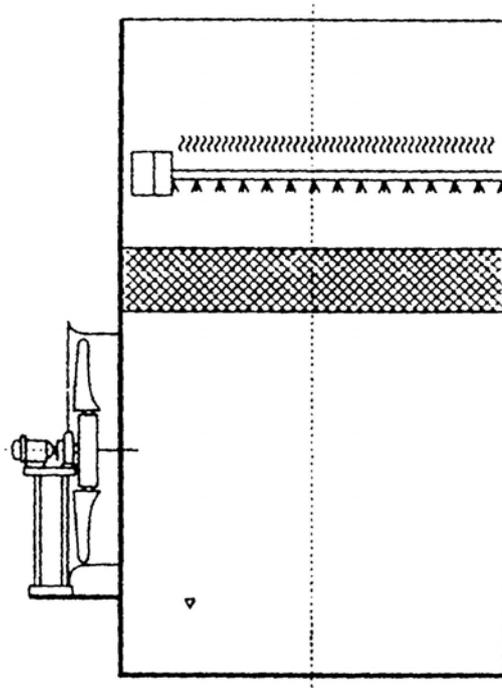


Figure XII.7 : Tour de refroidissement à tirage mécanique (ventilateurs à pression, construction de type cellulaire)

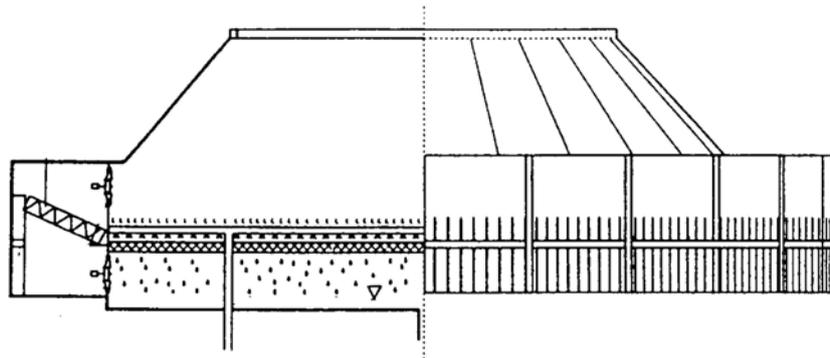


Figure XII.8 : Tour de refroidissement hybride

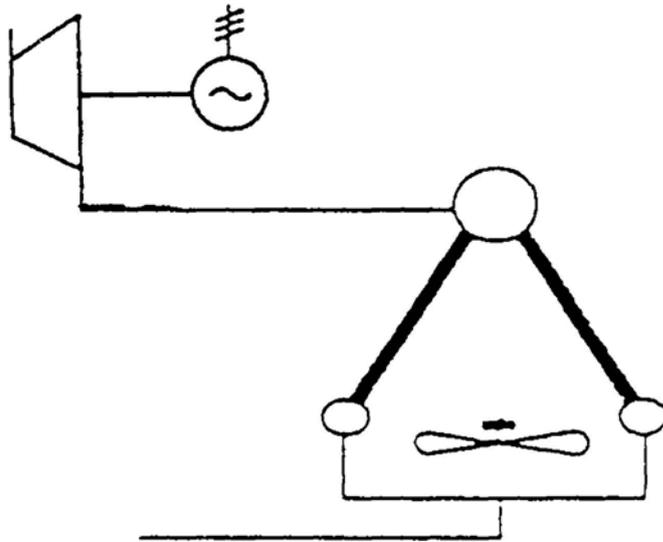


Figure XII.9 : Condenseur à air à tirage forcé

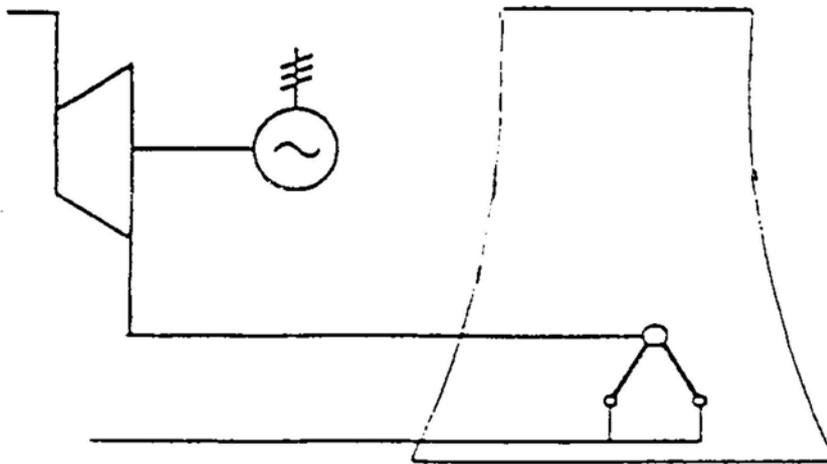


Figure XII.10 : Condenseur à air à tirage naturel

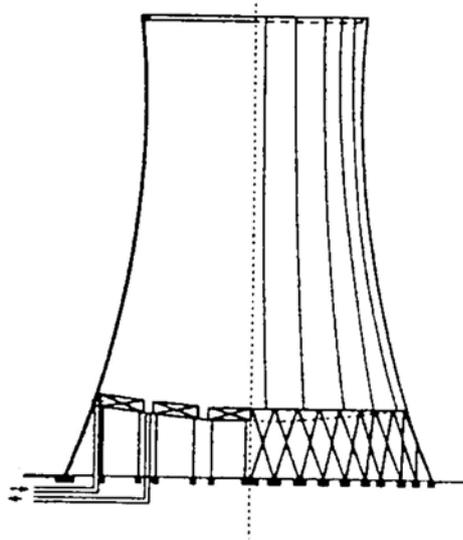


Figure XII.11 : Tour de refroidissement fermée par voie sèche à circulation indirecte

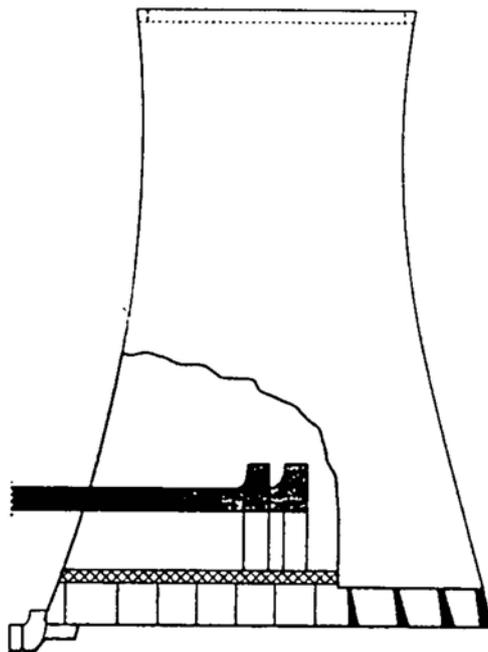


Figure XII.12 : Tour de refroidissement avec rejet des gaz de combustion propres

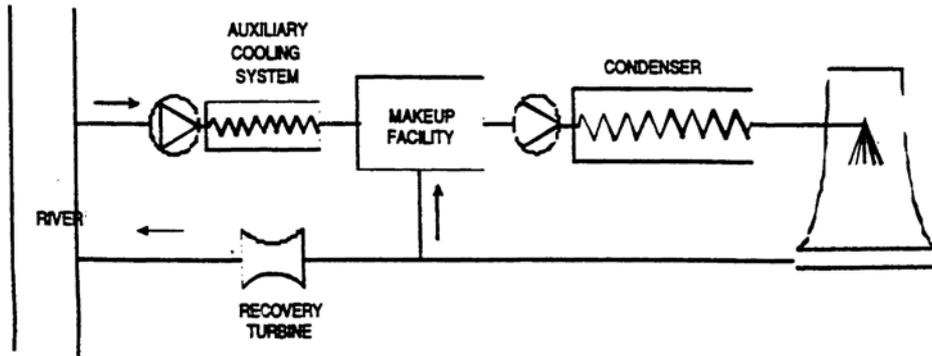


Figure XII.13 : Système de refroidissement avec un facteur de concentration fixe

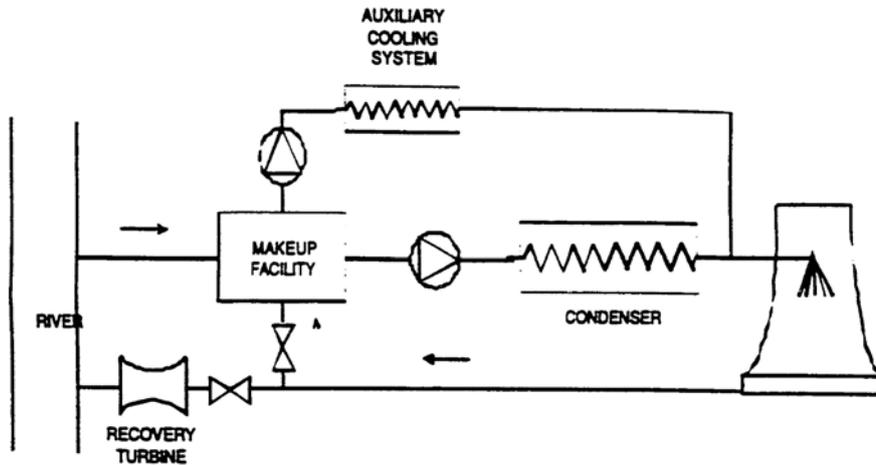


Figure XII.14 : Système de refroidissement avec un facteur de concentration fluctuant

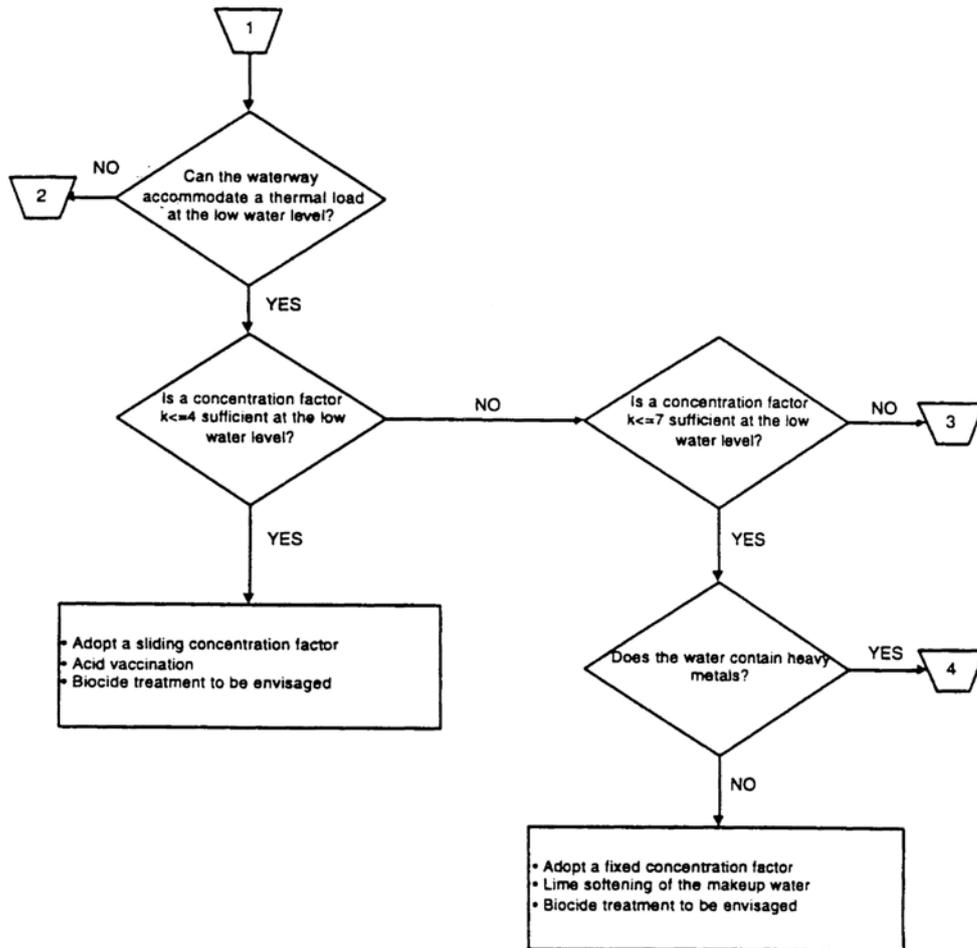


Figure XII.15 : Diagramme logique de prise de décision pour le choix d'un système de refroidissement