
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.