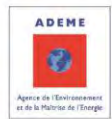
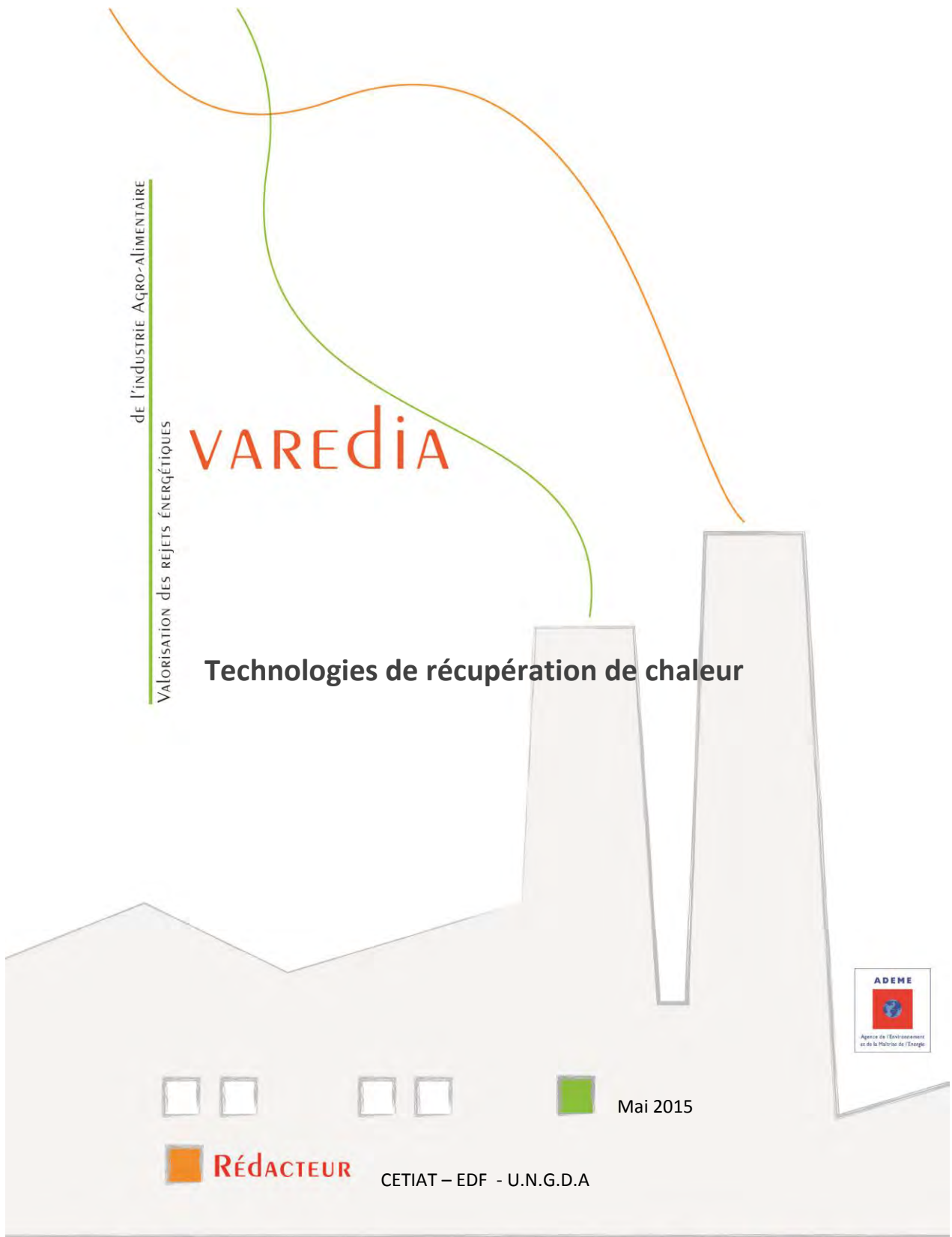


de l'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE
VALORISATION DES REJETS ÉNERGÉTIQUES

VAREdia

Technologies de récupération de chaleur



Mai 2015

 **RÉDACTEUR**

CETIAT – EDF – U.N.G.D.A



SOMMAIRE

1. Les échangeurs de chaleur	3
<i>Échangeurs à plaques</i>	3
<i>Échangeurs rotatifs</i>	6
<i>Échangeurs spiralés</i>	8
<i>Échangeurs tubulaires</i>	10
<i>L'encrassement des échangeurs</i>	12

2. Les systèmes permettant de relever ou d'abaisser la température	20
<i>Compression Mécanique de Vapeur</i>	20
<i>Ejecto-compresseur</i>	23
<i>Pompes à chaleur industrielles"</i>	29
<i>Pompes à chaleur hybride à compression et absorption</i>	32
<i>Les thermo transformateurs (PAC à absorption de type II)</i>	34

3. Les systèmes de transformation de chaleur en une autre forme d'énergie	37
<i>Machine thermique à Cycle Organique de Rankine</i>	37

4. Les stockages de chaleur	40
<i>Stockage chaleur sensible</i>	40
<i>Stockage par accumulateur de vapeur</i>	44

1. Les échangeurs de chaleur

Échangeurs à plaques

Objectifs

Les échangeurs à plaque sont largement répandus dans l'industrie, en particulier dans l'industrie agro-alimentaires : leurs applications sont multiples pour des échanges eau/eau, ou air/air.

Principes

Descriptif des échangeurs à plaques conventionnels

Le concept des échangeurs à plaques date de début 1900. Ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, puis utilisés par la suite dans diverses branches de l'industrie (chimie, nucléaire...).

L'échangeur à plaques est constitué de plaques parallèles brasées ou assemblées par serrage (avec des joints ou pas).

Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides.

Les plaques ne sont pas plates, mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis afin de créer un flux turbulent synonyme d'un meilleur transfert de chaleur.

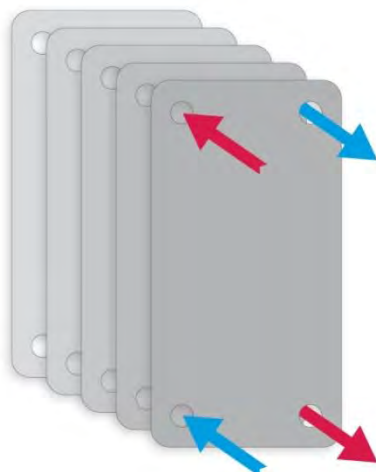


Schéma de principe - crédit CETIAT

Caractéristiques techniques des échangeurs à plaques conventionnels

	Plaques et joints	Plaques brasées
Construction	Empilement de plaques et de joints	Empilement de plaques brasées
	Serrage	Pas de joint
Matériaux	Plaques : acier inox, titane, etc.	
	Joints : nitrile rubber, hypalon, neoprene	
Limites de fonctionnement		
Température	De -35 °C à +200 °C	Brasé Cu : 225 °C Ni : 400 °C
Pression	Jusqu'à 25 bar, test à 40 bar	Brasé Cu : 30 bar Ni : 16 bar
Débits	Jusqu'à 3 500 m ³ /h (une entrée) et 5 000 m ³ /h (double port)	
Surface d'échange	De 0,02 à 4,45 m ² /plaque	
Écart de température	1 K	

Tableau de synthèse – crédit CETIAT

Certains échangeurs à plaques brasées (par exemple Alfares de la société Alfa Laval) peuvent supporter des pressions plus élevées (> 40 bar) sur un intervalle de température plus étendu (-50°C à 400 °C).

Maturité

Largement diffusée dans différents secteurs industriels, en particulier le secteur agro-alimentaire.

Potentiels d'application

Ce type d'échangeur compact convient particulièrement pour la récupération de chaleur à partir des effluents liquides ou en changement de phase, pour le chauffage de l'eau.

Secteurs industriels

Les échangeurs à plaques conventionnels peuvent être utilisés en réfrigération, pompe à chaleur, agro-alimentaire, procédés et pétrochimie.

Avantages

- Un échangeur à plaques pèse de 3 à 5 fois moins qu'un échangeur tube et calandre équivalent.
- Grande surface de contact, échangeur compact.
- Échangeur peu coûteux

Inconvénients

- Pertes de charge
- Écart de température limité (pour éviter dilatation des plaques)

Offre constructeurs

Exemple de fabricants fournisseurs de la technologie

ALFA LAVAL

BARRIQUAND

CIAT

GEA

SWEP

WILTEC

Autres échangeurs à plaques

Il existe aussi plusieurs types d'échangeurs à plaques, présentant de hautes performances et dits « hybrides » car ils allient les caractéristiques de l'échangeur à plaques conventionnel à celles d'autres types (par exemple tube et calandre).

Échangeurs à plaques et calandre

Cette technologie ("plate and shell heat exchanger", ou PSHE) est dite hybride, car elle combine les échangeurs à calandre aux échangeurs à plaques. L'avantage est sa compacité, qui est environ 5 fois plus élevée que celle d'un échangeur à tube et calandre.

Dans ces échangeurs, un ensemble de plaques cylindriques parallèles est placé à l'intérieur d'une calandre. Un fluide circule entre les plaques, tandis que l'autre fluide circule entre les canaux. Selon la configuration, les plaques peuvent aussi être constituées d'anneaux.

Le fabricant finlandais Vahterus Oy propose une large gamme de PSHE, avec des diamètres de calandre compris entre 0,2 et 1 m, pour des puissances échangées de 100 MW, et une pression de service de 100 bar. Pour des applications plus importantes (200 MW), la pression de service est plus basse (60 bar).

La température maximale de fonctionnement de ces échangeurs semble se situer autour de 900 °C selon les catalogues des différents fabricants. Selon l'application ils peuvent être fabriqués en acier inoxydable ou d'autres matériaux (titane, nickel, etc.).

Les PSHE peuvent être utilisés pour des fluides agressifs (par exemple acides). Ils peuvent résister à des contraintes importantes (chocs thermiques et dynamiques) grâce à leur construction rigide et compacte.

Les applications principales des PSHE sont :

- chauffage d'eau (exemple chauffage urbain)
- réfrigération et cryogénie
- récupération de chaleur
- condensation et évaporation

La nature des effluents peut être très variée :

- eau, huile caloporteur, solvants
- vapeur d'eau, hydrocarbures et substances organiques
- fluides frigorigènes.

Échangeurs platulaires soudés

Les échangeurs "platulaires" sont une synthèse des échangeurs tubulaires et des échangeurs à plaques conventionnels. Ils allient donc la compacité et la robustesse de ces échangeurs. L'un des fluides s'écoule dans le canal formé par deux plaques, tandis que l'autre fluide s'écoule librement autour de ces canaux. Les canaux peuvent être de différentes formes. Dans le cas d'effluents encrassant et fortement chargés, le fluide circulera entre les plaques utilisant peu de points de contact.

Ces échangeurs sont généralement applicables pour des échanges gaz/gaz, gaz/liquide, liquide/liquide, ainsi qu'en condensation ou évaporation. Les puissances échangées sont de l'ordre du mégawatt. La pression de service peut aller du vide jusqu'à 40 bars, pour une plage de température entre -180 et 700 °C.

Exemple d'applications avec échangeur platulaire :

- Vin / jus de fruits : Réchauffeurs – refroidisseurs de moûts de vendange et jus de fruits chargés
- Huiles alimentaires : Échangeurs pour installations de désodorisation et trituration
- Réchauffeurs – refroidisseurs de sirop – confiture – solutions- fluides visqueux...

Échangeur Compabloc

Le "Compabloc" (Alfa Laval) est constitué de plaques ondulées soudées. Il peut être fabriqué en acier inoxydable ou avec un matériau compatible avec la nature des effluents. Les plaques forment des modules de nombre et de taille standard, ce qui permet leur agencement selon la puissance souhaitée.

Les écoulements des effluents sont à courants croisés dans un module donné, mais l'empilage des modules transforme la configuration globale en contre-courant et augmente ainsi l'efficacité d'échange.

Les différents modules sont montés sur un châssis et connectés par des chicanes. Le Compabloc peut être utilisé dans des applications entre -100°C et 350°C et jusqu'à 35 bars. La surface d'échange maximale citée par Alfa Laval est de 320 m², avec un débit maximal par unité de 4000 m³/h. Il est utilisé en récupération de chaleur, refroidissement, chauffage, condensation, évaporation et refroidissement de gaz.

Échangeurs rotatifs

Principes

Le principe général des échangeurs rotatifs (appelés également récupérateurs à régénération) est de récupérer la chaleur contenue dans un effluent gazeux en faisant circuler cet effluent au travers d'un matériau accumulateur. Ce matériau accumulateur est ensuite soumis à l'autre effluent et lui cède sa chaleur. Le matériau accumulateur peut être imprégné ou non d'un produit hygroscopique de manière à permettre les échanges tant de chaleur sensible que d'humidité.

La matrice du rotor est en feuille métallique. Une bande formée en ondulations est enroulée avec une bande lisse par-dessus. Il en résulte, selon la hauteur des ondulations, des canaux de passage de l'air de tailles différentes. Les flux d'air circulent dans ces canaux à contre-courant. La surface de l'échangeur thermique est déterminante pour le rendement, mais aussi pour la sensibilité aux encrassements.

Caractéristiques techniques

Le rotor est monté soit dans un caisson ou un cadre périphérique. Les matériaux généralement utilisés sont l'acier inox, l'aluminium de la tôle d'acier ou des feuilles d'acier chromée, en fonction de l'application et de la température. L'épaisseur du matériau varie entre 0,07 mm (installation de climatisation sans nettoyage haute pression) et 0,12 mm (rotor spéciaux, par exemple application en cabine de peinture).

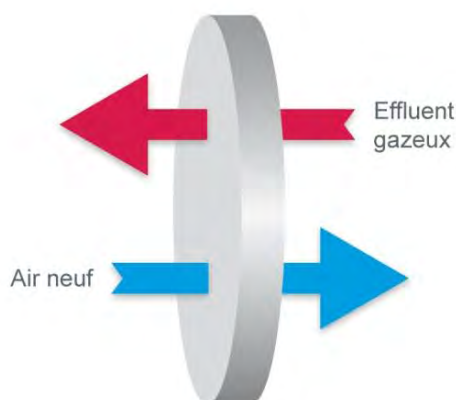


Schéma de principe - crédit CETIAT

Des revêtements anti corrosion (époxy) peuvent également être appliqués. Le profil du rotor est déterminé en tenant compte du comportement du rotor à l'encrassement et des intervalles de nettoyage nécessaire, ainsi que du rendement souhaité. La hauteur de l'ondulation varie entre 1,5 mm et 3 mm. Plus celle-ci est faible meilleur est le transfert de chaleur mais la perte de charge est plus élevée et l'échangeur est plus sensible à l'encrassement.

Les vitesses d'écoulements sont comprises entre 1,6 et 4,5 m/s.

L'efficacité de l'échangeur peut atteindre 75 % de la chaleur totale. Elle est fonction de la vitesse de rotation de la roue et de la vitesse frontale de l'air.

Maturité

Les échangeurs rotatifs ne sont pas très courants en France mais sont beaucoup plus répandus dans d'autres pays (en Allemagne par exemple).

Potentiels d'application

Ces échangeurs sont utilisés pour des transferts de chaleur air/air avec ou sans transfert d'humidité, pour de la récupération d'énergie ou la déshydratation de l'air. Ils sont utilisés dans les centrales de traitement d'air (CTA) des bâtiments pour récupération d'énergie sur air extrait ou dans les process industriels pour la récupération d'énergie sur des procédés de séchages, fours, cabines d'applications de peinture, production d'air sec pour tour d'atomisation...

Secteurs industriels

- Automobile
- Agroalimentaire
- Textile
- Chimie
- Pharmacie
- Céramique
- Imprimerie

Avantages

- Perte de charge relativement faible.
- Bon rendement.
- Effet « autonettoyant » du système s'il fonctionne en contre courant : la poussière déposée sur la face avant de chacune des moitiés du rotor est enlevée dans l'autre moitié par l'air circulant dans l'autre sens.
- Peut être équipé d'un système de nettoyage en place.
- Vitesse de la roue variable, permettant la régulation du transfert de chaleur.

Inconvénients

- Nécessite une petite quantité d'énergie extérieure pour faire tourner la roue.
- Certains systèmes ne sont pas complètement étanches (fuites d'environ 5 %).
- Obligation de tourner sans arrêt (vitesse minimale) ou a minima par intermittence même si l'on ne souhaite pas de récupération de chaleur afin d'éviter tout risque de colmatage par encrassement des petits canaux du matériau accumulateur.

Offre constructeurs

Pour procédés industriels :

KLINGENBURG

SCHEUCHL

HOWDEN

DESSICA

Échangeurs spirales

Principes

Descriptif

L'échangeur de chaleur à spirale est constitué de 2 canaux concentriques formés par deux plaques de métal enroulées de manière hélicoïdale. La distance entre les deux canaux est obtenue à l'aide de taquets soudés sur les plaques et tient compte des débits, de la taille des particules pour les fluides chargés et des pertes de charge. Ces taquets ont également pour effet de favoriser un écoulement turbulent dans chaque canal et d'améliorer ainsi le coefficient d'échange.

L'échangeur peut être utilisé pour des transferts monophasiques (essentiellement liquide/liquide) ou avec changement de phase dans l'écoulement.

Pour des applications monophasiques les fluides circulent généralement à contre courant.

Utilisé en mode bi phasique (condenseur ou évaporateur), la vapeur (ou le fluide à évaporer) s'écoule dans un canal complètement ouvert et le fluide réfrigérant dans un canal en spirale fermée. Ce type de système est utilisé dans des applications de chauffage/refroidissement.

La conception de ces échangeurs leur donne la particularité intéressante d'être « autonettoyant ». En effet contrairement à des échangeurs qui distribuent le fluide dans des multiples canaux, la totalité du fluide s'écoule ici dans le canal de l'échangeur spiralé, sans zone morte. Si celui-ci s'encrasse, le fluide n'a pas d'autre chemin possible. Sa vitesse du fluide augmente alors sous l'effet de la pression et le fluide entre en turbulence, ce qui aide à éliminer les dépôts et à garder les surfaces propres sous l'effet des frottements. Outre les gains liés à une maintenance réduite, ce phénomène permet également de limiter la dégradation du coefficient d'échange liée à la résistance de la couche de dépôt.

Caractéristiques techniques.

Ces échangeurs peuvent fonctionner généralement pour des pressions allant du vide à environ 50 bar (des produits spécifiques peuvent atteindre les 100 bars) et des températures atteignant environ les 400 °C. Ils ne peuvent travailler cependant qu'avec des différences de températures et de pressions limitées.

Les matériaux traditionnellement utilisés pour la fabrication de ces échangeurs sont l'acier inoxydable ou l'acier carbone. Tout autre métal pouvant être usiné à froid ou soudé peut être également employé (duplex, titane, 904 L....).

Selon la configuration la longueur des plaques peut atteindre 2 m pour des surfaces d'échanges allant jusqu'à environ 600 m². Les échangeurs spirales sont plus compacts que les échangeurs tubulaires, ce qui permet de limiter leur encombrement.

Maturité

Ce type d'échangeur a été développé dans les années 30, pour une utilisation dans l'industrie du papier/cartons. Les effluents chargés en fibres de ce secteur rendaient en effet difficile l'utilisation d'échangeurs tubulaires classiques en raison des problèmes d'encrassement trop rapide.

Les échangeurs à spirales sont aujourd'hui courants dans un grand nombre d'industries et sont des équipements standards de divers procédés.

Potentiels d'application

Usages

Ces échangeurs peuvent être utilisés dans diverses applications industrielles, notamment dans des conditions contraignantes. Ils sont adaptés au produits visqueux et encrassants (chargés en particules, fibres, boues, eaux usées...). Utilisés en configuration gaz/liquide (figure 2) ils offrent de bonnes performances comme condenseurs (de tête, à reflux, sous vide), évaporateur ou rebouilleur. Dans cette configuration ils peuvent également être utilisés en réchauffeur afin de remonter la température d'un liquide encrassant avec de la vapeur.

Pour des applications en récupération d'énergie ils sont être utilisés en monophasique (transfert liquide/liquide) pour récupérer l'énergie sur des liquides chargés. Dans le secteur de l'agroalimentaire ils peuvent par exemple être utilisés pour récupérer l'énergie les eaux d'évacuation usées.

Secteurs industriels

- Les échangeurs à spirales sont présents dans de nombreux secteurs industriels :
- Pétrochimie
- Raffinerie
- Aciérie
- Papeterie
- Traitement des métaux et minerais
- Traitement des eaux usées
- Pharmacie
- Traitement d'huile végétale
- Distillerie

Avantages

- Ce système assure de bons coefficients d'échange, notamment par le fait que le fluide entre en turbulence à des vitesses plus faible que dans des échangeurs tubulaires.
- L'encombrement est réduit car la conception de l'échangeur offre une bonne compacité.
- L'échangeur permet l'utilisation de fluides chargés et visqueux.
- Ce système présente des performances élevées en tant que condenseur.
- L'unité peut être facilement nettoyée par lavage à contre-courant, à haute pression ou par nettoyage chimique en ligne (CIP).
- La maintenance est réduite (effet autonettoyant) et est relativement facile car les canaux sont accessibles par ouverture du couvercle de l'échangeur (figure 3).

Inconvénients

- Cet échangeur fonctionne avec des écarts de températures limités.
- Une fois installé le système ne peut être démonté.

Offre constructeurs

Alfa Laval

Le groupe propose 3 gammes d'échangeurs à spirales.

- Une gamme standard pour des applications industrielles variées. Les pressions de services sont comprises entre le vide et 40 bars et les températures entre -100 °C et 400 °C. Les surfaces d'échanges atteignent 700 m²
- La gamme « ALSHE STW » dédiée au traitement des boues et eaux usées avec des températures comprises entre 0°C et 100 °C et une pression de 7 bars.
- La gamme « HP SHE » constituée d'échangeurs spiralés haute pression. Ces échangeurs peuvent résister à des pressions jusqu'à 100 bars et à de hautes températures. Ils sont efficaces sur des process tels que le raffinage du pétrole, le FCC (fluid catalytic cracking), la désalinisation, le coking...

Sondex

Le groupe propose une gamme d'échangeur spiralés industriels fonctionnant à des pressions de 16 bar et des températures pouvant aller jusqu'à 200 °C avec des surfaces d'échanges atteignant 400 m².

Nexson Group

Cette jeune société basée en Bourgogne propose 2 gammes d'échangeurs spiralés :

- La première dite « standard » pour des températures de conception de -200 °C à 450 °C et des pressions de conception allant du vide à 60 Bar.
- La deuxième dédiée aux applications sur des boues et eaux usées (pression de conception 4 bar et température de conception de 150 °C).

Échangeurs tubulaires

Principes

Descriptif

Les échangeurs tubulaires utilisant des tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont largement répandus. On peut distinguer 3 catégories :

- L'échangeur monotube : un tube ayant généralement la forme d'un serpentin est placé à l'intérieur d'un réservoir.
- L'échangeur coaxial (ou "tube-in-tube") : deux tubes sont imbriqués l'un dans l'autre. En général, le fluide chaud, ou à haute pression, s'écoule dans le tube intérieur.
- L'échangeur multitubulaire, qui peut exister sous trois formes :
 - o Échangeur à tubes séparés : à l'intérieur d'un gros tube sont placés plusieurs petits tubes, maintenus écartés par des entretoises
 - o Échangeur à tubes ailetés (batteries à ailettes) : il est constitué d'un faisceau de tubes, répartis en nappes, dans lesquels circule un fluide ayant un bon coefficient d'échange (liquide ou fluide frigorigène). Le fluide extérieur étant un gaz, on met des ailettes sur la face externe des tubes pour en améliorer l'échange.
 - o Échangeur à tubes et calandre : ils sont constitués d'un faisceau de tubes placé dans une enveloppe (calandre). Les tubes sont maintenus par des plaques (perforées) qui servent également de chicanes pour l'écoulement du fluide circulant côté calandre.

Caractéristiques techniques

Divers matériaux de construction sont utilisés pour couvrir des gammes de température et de pression très étendues.

Ces échangeurs sont utilisés dans des applications pouvant atteindre plusieurs MW.

Les principales caractéristiques des échangeurs à tubes et calandre sont présentées dans le tableau ci-après :

Fluides	Eau, frigoroporteur, fluides industriels, frigorigène
Puissance thermique	kW- MW - GW
Pression	20 – 500 bar
Température	< 500 °C
Matériaux	Cuivre, acier
Surface d'échanges	Tubes lisses, tubes à ailettes intégrales

Maturité

Largement diffusée.

Potentiels d'application

Usages

Applications gaz/gaz, liquide/liquide ou avec des effluents en changement de phase.

Dans l'industrie du procédé, la technologie des échangeurs à tubes et calandre est largement répandue.

De plus, la technologie des échangeurs tubulaires est en particulier utilisée dans les récupérateurs de chaleur à partir des fumées de combustion. Dans ce cas, les récupérateurs utilisent des tubes en acier dans une calandre, sans chicanes.

Ces échangeurs permettent d'augmenter le rendement d'une chaudière (+5 à +10 % selon l'application). Ces échangeurs peuvent être conçus pour récupérer la chaleur latente issue de la condensation d'humidité contenue dans les fumées.

Le récupérateur de chaleur peut être utilisé pour préchauffer l'air de combustion (récupérateur air/air) ou préchauffer l'eau de la chaudière et/ou fournir de l'eau chaude sanitaire (récupérateur air/eau).

Ces échangeurs permettent de récupérer la chaleur latente issue de la condensation de l'eau contenue dans les fumées. Ils peuvent être installés en aval de chaudières de puissance de plusieurs MW.

Échangeurs tubulaires

Offre constructeurs

Liste non exhaustive.

Échangeurs tubulaires :

FAVIER
GUILLOT Industrie

Échangeurs tubes et calandre :

ALFA LAVAL
ARMONSTRG
BARRIQUAND
GEA
MERSEN
THERMOFIN
TYCON

L'encrassement des échangeurs

La présente fiche est une synthèse du guide de l'encrassement réalisé par le GRETH.

[GRETh, 2007] H. DEMALES, P.MERCIER, P.TOCHON.P et B.THONON, Guide de l'encrassement des échangeurs de chaleur, Editions GRETh, 2007, ISBN 2-9502555-5-8

L'encrassement des échangeurs de chaleur peut être défini comme le dépôt de matériaux ou de substances non désirées sur les surfaces d'échange. Ce dépôt peut être constitué de cristaux, de sédiments, de résidus biologiques, des produits d'une réaction chimique ou bien encore être la combinaison de plusieurs de ces éléments. C'est un processus dynamique qui se déroule de façon continue généralement jusqu'à atteindre un état d'équilibre ou jusqu'à ce qu'il soit nécessaire de nettoyer l'échangeur – la période d'encrassement pouvant varier de quelques heures à plusieurs mois, voir plusieurs années.

L'encrassement est souvent inévitable dans les installations industrielles. Le couplage encrassement – dégradation des échanges thermiques a de fortes répercussions sur la rentabilité de l'installation. Si le problème de l'encrassement n'est pas anticipé correctement lors de la conception, des coûts supplémentaires dus aux arrêts intempestifs pour maintenance et entretien viennent s'ajouter. **Ces coûts intègrent les dépenses liées, d'une part, au dimensionnement (surdimensionnement de la surface d'échange à mettre en oeuvre, incorporation d'équipements de nettoyage) à hauteur de 20% et, d'autre part, au fonctionnement (perte de production, diminution du transfert, frais de maintenance et nettoyage) à hauteur de 80%.**

Outre ces dépenses, les démontages et remontages répétés peuvent aboutir à une détérioration plus rapide du matériel, ainsi qu'à une réduction de la durée de vie des échangeurs.

Le nettoyage des échangeurs thermiques entraîne des coûts de main d'oeuvre supplémentaires et exige un équipement adéquat surtout si un traitement chimique est requis. Dans ce cas, un circuit complémentaire impliquant des pompes et des réservoirs peut être nécessaire. Les produits chimiques doivent être achetés et les effluents issus du processus de nettoyage doivent être traités. Les processus de nettoyage plus conventionnels, tels que la projection de vapeur ou d'air comprimé, ou la circulation de boules ou de ressorts dans l'installation, exigent des dépenses supplétives à celles liées à la main d'oeuvre.

Il existe un nombre important de paramètres affectant le choix du type d'échangeur pour une application donnée. Parmi ceux-ci, les plus importants sont les contraintes de pression, de température, d'encombrement, de coût, etc., mais il arrive également que le choix soit dicté par les problèmes d'encrassement ou de facilité de nettoyage.

Le Tableau suivant donne le domaine d'utilisation des échangeurs (liste non exhaustive) en indiquant leurs comportements vis-à-vis des agents encrassant et leurs possibilités de nettoyage (mécanique, chimique).

Type d'échangeur	Domaine d'utilisation Pression Température	Comportement à l'encrassement	Facilité de nettoyage
Tubes et calandre	Presque sans limites	Moyen Meilleur côté tubes	Oui côté tube Moyen côté calandre
Tubes ailettes	100 bars 600 °C	Moyen	Difficile côté ailettes
Plaques et joints	20 bars 200 °C	Bon	Facile
Plaques soudés	40 bars 400 °C	Bon	Assez facile
Plaques Spirale	30 bars 550 °C	Bon	Seulement chimique
Plaques et ailettes	120 bars jusqu'à 650 °C	Mauvais, sauf grand diamètre hydraulique et ondes droites	Très difficile
Plaques à mini-canaux	1000 bars jusqu'à 550 °C	Très mauvais	Très difficile
Graphite SiC Verre Plastique	6 à 15 bars 170 °C variable 1200°C 450 °C 2 bars 250°C	Bon pour fluides corrosifs	Surtout chimique
Lit fluidisé Contact direct		Bon Bon (mais peu d'expérience)	Auto-nettoyage ? -

Tableau 1 : Principaux types d'échangeur et comportement vis-à-vis de l'encrassement [GRETH, 2007]

Types d'encrassement

Dans le but de réduire les coûts liés à l'encrassement et pour améliorer l'utilisation des échangeurs de chaleur, il est nécessaire de mieux comprendre les différents mécanismes élémentaires mis en jeu.

Les types d'encrassement les plus rencontrés sont souvent classés en différentes catégories :

- l'encrassement particulaire (matières en suspension et colloïdes) ;
- l'encrassement par entartrage ou cristallisation (seuil de solubilité) ;
- l'encrassement biologique (par micro- et macro-organismes) ;
- l'encrassement par réaction chimique ;
- l'encrassement par corrosion (oxydation du matériau) ;
- l'encrassement par givrage (température de paroi faible).

Quelque soit le phénomène d'encrassement considéré, il est plus ou moins critique selon la nature des fluides employés et/ou la conception des échangeurs. Dans les situations réelles d'encrassement, il est bien évident que ces différents mécanismes interagissent ou se superposent de manière plus ou moins complexe.

Les types d'encrassement les plus fréquemment rencontrés dans l'industrie sont l'encrassement particulaire et l'entartrage.

Prévention de l'encrassement

Il existe de nombreuses méthodes pour limiter l'encrassement dans les échangeurs. Le choix de l'une ou de plusieurs de celles-ci dépend bien entendu de l'efficacité de la méthode, du type d'encrassement et aussi de nombreux paramètres économiques.

Les efforts les plus importants pour atténuer les effets néfastes de l'encrassement se situent essentiellement pendant les phases de fonctionnement et d'arrêt de l'échangeur. Mais en fait, il est possible d'avoir une action positive pendant les quatre stades suivants de la « vie » d'un échangeur :

- dimensionnement ;
- construction et montage ;
- fonctionnement ;
- arrêt.

Ces diverses actions sont résumées dans le tableau suivant :

Phase de dimensionnement	Phase de construction et montage	Phase de fonctionnement	Phase d'arrêt
- Choix du type d'échangeur	- Assurance qualité sur la fabrication	- Maintien des conditions de fonctionnement (températures, débits...)	- Démontage et nettoyage manuel
- Choix de la géométrie et de la configuration	- Protection pendant le transport et lors du stockage	- Prétraitement des fluides	- Attaque mécanique du dépôt (perçage)
- Choix des conditions de fonctionnement (température, débit...)	- Opération de nettoyage et de passivation - Démarrage	- Utilisation d'additifs (inhibiteurs, anti-tartres, dispersants, acides...) - Nettoyage en continu (boules, brosses, ressorts...)	- Nettoyage hydraulique à la lance (vapeur, air) - Nettoyage chimique

Tableau 2 : actions envisageables pour limiter l'encrassement dans les échangeurs de chaleur [GRETH, 2007]

Lorsque le type d'échangeur le plus adapté à un problème donné est déterminé, il reste un certain nombre de paramètres qu'il est possible de tenter d'ajuster pour réduire la tendance à l'encrassement.

Il s'agit :

- des zones stagnantes ou de faibles vitesses, qui sont des zones où les dépôts s'accumulent plus facilement
- des vitesses qui doivent être optimisées, notamment en recherchant l'homogénéité. En règle général, plus la vitesse est forte et plus l'encrassement est faible ;
- des points chauds (ou froids) qui doivent être évités. En effet, en présence de thermophorèse, le dépôt sera accentué en cas de sous-refroidissement local. Ce phénomène est très lié à la distribution de vitesse au sein de l'appareil ; des états de surface qui jouent un rôle important vis-à-vis de l'initiation de l'encrassement. Ensuite, c'est l'état de surface du dépôt qui contrôle le phénomène de dépôt ;
- du pH qui contrôle l'amplitude et le signe de la charge des particules ;
- des configurations et des modes de fonctionnement ;
- faire attention au choix du matériau dans le cas d'applications corrosives ;
- faire attention de ne jamais se trouver en dessous du point de rosée, point au-delà duquel la condensation de vapeur d'eau et d'hydrocarbures démarre et engendre un dépôt cohésif.

Pour l'encrassement particulière, de nombreuses actions de prévention sont théoriquement possibles bien que certaines d'entre elles nécessitent la connaissance encore imparfaite des mécanismes de dépôt et de réentraînement.

A titre d'exemple, il s'agit :

- de maintenir à une valeur aussi élevée que possible la vitesse de circulation pour minimiser l'épaisseur des dépôts ;
- d'effectuer un nettoyage en continu, avant que l'encrassement ne s'installe par des systèmes à boules, à brosses, à ressorts.

On peut, pour limiter les phénomènes de **corrosion**, envisager des actions de prévention :

- au niveau du dimensionnement et du fonctionnement des installations. Les phénomènes de corrosion sont particulièrement sensibles aux variations de température, de vitesse, de concentration, d'aération, etc. Des spécifications tendant à minimiser ces types de variations doivent donc être dictées pour les diverses conditions de fonctionnement des installations (démarrage, marche normale, arrêt ...);
- dans le choix du matériel. Ce choix est un élément évidemment essentiel. Selon le contexte, on devra utiliser certains aciers (carbone. inoxydable, austénitique ...), certains alliages, le titane, certains matériaux non métalliques ou des revêtements organiques ;
- par des modifications de l'environnement (traitements inhibiteurs pour les eaux, désaération éventuelle...);
- par des protections adéquates, comme la protection cathodique pour certains alliages.

Entartrage :

Des actions de prévention sont envisageables aux différents niveaux de développement des cristaux :

- Ajustement de la concentration en ions pour ne pas dépasser la sursaturation, ou même le cas échéant, pour que la nucléation n'apparaisse pas,
- Utilisation de surfaces lisses pour combattre l'adhérence des très petits cristaux,
- Introduction d'additifs visant à modifier la forme des cristaux pour affecter les mécanismes de nucléation,
- Introduction d'additifs visant à affaiblir la cohérence de la structure cristalline au cours de sa croissance, pour faciliter son enlèvement.

Un traitement de l'eau est souvent indispensable pour prévenir les phénomènes d'entartrage. Plusieurs types de procédés de prévention existent :

- traitement chimique (par exemple décarbonatation à la chaux, réduction de la dureté par adoucissement);
- les procédés électriques ;
- les procédés magnétiques ;
- les procédés par ultrasons (particulièrement utilisé comme mode de prévention contre l'encrassement biologique).

Nettoyage en continu

Les techniques utilisées pour les liquides sont bien adaptées lorsque les dépôts sont tendres et friables, avec une résistance de réentraînement faible.

Diverses techniques sont disponibles sur le marché pour le nettoyage en continu de la surface interne **d'échangeurs tubulaires**. Il s'agit des procédés suivants :

- à boules ;
- à brosses ;
- à ressort.



Figure 1 : Boules en caoutchouc mousse (Taprogge®).



Dispositif TURBOTAL™
(Élément hélicoïdal mobile rentrant en rotation par le fluide en écoulement)

Ces procédés nécessitent une filtration en amont de l'échangeur.

Pour les échangeurs à plaques des procédés analogues sont en cours de mise au point mais il est également possible d'utiliser des **systèmes à inversion de débit**.

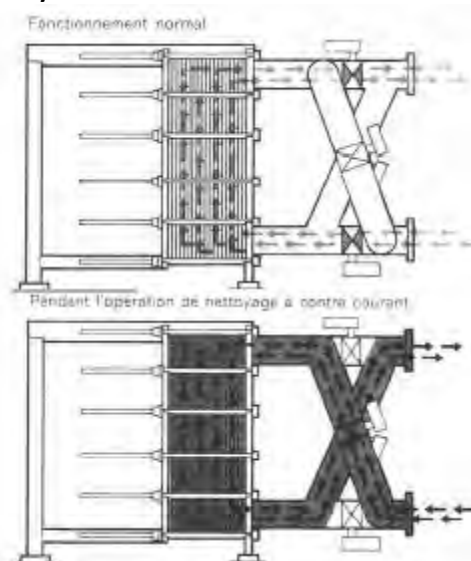


Figure 2 : schéma d'un système à inversion de débit [GRETH, 2007]

Enfin, dans certains cas vraiment extrêmes, des **échangeurs à surface raclée** peuvent être utilisés.

Nettoyage par chocs thermiques

Il s'agit d'une méthode ancienne qui a un regain d'intérêt sur des unités industrielles. Elle fut longtemps utilisée sur les bouilleurs marins pour détartre le faisceau de tubes en le refroidissant le plus rapidement possible de la température nominale à l'ambiance (méthode du casse-sel).

Projection de vapeur ou d'air comprimé

La technique de nettoyage la plus utilisée pour les échangeurs fonctionnant sur des gaz poussiéreux est le soufflage de vapeur ou d'air comprimé.

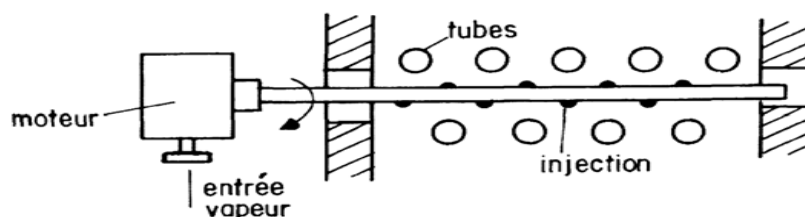


Figure 3 : schéma du principe de la technique de nettoyage par projection (vapeur ou air comprimé) [GRETH, 2007]

Nettoyage à l'eau

Les dépôts solubles dans l'eau peuvent être facilement détachés des surfaces d'échange par lavage. En effet la vitesse importante du jet d'eau produit une contrainte de cisaillement associée à un choc thermique dont l'effet conjugué permet de détacher le dépôt. Le nombre et le diamètre des orifices d'injection varient avec la taille de l'échangeur. On utilise généralement une eau industrielle, de rivière ou de lac ne véhiculant aucun débris qui pourrait gêner l'écoulement dans l'échangeur ou boucher les orifices d'injection de l'eau. Lorsqu'on utilise de l'eau de mer contenant une quantité importante de sel, il est conseillé de rincer l'échangeur à l'eau douce à la fin de chaque nettoyage.

Les nettoyages à l'eau présentent deux gros inconvénients :

- ils génèrent de grand volume d'effluents à récupérer et à traiter ;
- et posent des problèmes d'infiltration et de corrosion : certains échangeurs comme les chaudières ne sont pas des ensembles étanches où l'eau des lavages, acidifiée par le contact avec les dépôts, s'infiltré entre les tubes et les réfractaires, entre les tubes et le casing,... des zones inaccessibles où la corrosion peut s'installer. L'addition de quelques pourcents de produits neutralisants dilués dans l'eau de lavage ne suffit pas à éliminer toute trace d'acide et à sécher les réfractaires.

Nettoyage par produits chimiques

Une solution utilisée pour le nettoyage des chaudières à gaz consiste à remplacer chaque fois que possible l'eau par un produit chimique adapté à la nature des dépôts à éliminer et appliqué sous forme de mousse de manière à réduire les risques d'infiltration entre les tubes et les réfractaires et à recueillir des effluents peu humides (procédé Ceconet).

Le nettoyage chimique à la mousse convient aux générateurs maçonnés fonctionnant au fuel lourd ou résiduaire et au charbon, mais aussi aux générateurs à tubes de fumées. Chambre de combustion, faisceaux de convection, économiseurs d'eau et réchauffeurs d'air métalliques sont couramment nettoyés de cette façon.

Pour enlever les particules des **fumées de combustion**, un traitement chimique n'est pas forcément nécessaire. Les électrofiltres, les collecteurs mécaniques ou les filtres média peuvent remplir cette fonction et le lavage à l'eau aide à pallier à certains problèmes d'encrassement obtenu avec les résidus de pétrole dans les applications maritimes en retirant le sodium et les sédiments. Par contre, le retrait de constituants gazeux est nettement plus délicats et nécessite l'injection d'additifs dans les fumées, qui réagissent avec certains produits indésirables pour éliminer et réduire leur effet : ajout de chaux, de système de MgO récupérateur de sulfure ou des systèmes adsorbants. Les réactifs chimiques liquides injectés dans la flamme ou dans la veine de gaz sont beaucoup plus efficaces, plus faciles à mettre en œuvre qu'un traitement direct sur le combustible et surtout utilisables avec tous les combustibles liquides ou solides.

Chocs thermiques

Cette méthode présente un grand intérêt puisqu'elle ne nécessite aucun équipement supplémentaire ni l'arrêt complet de l'installation, mais elle doit être utilisée avec précautions pour ne pas endommager les structures.

Dans le cas d'un échangeur gaz/eau, la méthode consiste à arrêter progressivement le débit d'eau de refroidissement de manière à augmenter fortement et rapidement la température de surface du métal jusqu'à ce qu'elle atteigne celle des fumées à l'entrée de l'échangeur.

Le choc thermique engendré provoque une fragilisation du dépôt qui va ensuite se détacher de la paroi.

D'autres procédés de nettoyage existent. Ils sont indiqués ici mais pas détaillés par souci de concision:

- frappage ;
- soufflage acoustique.
- grenailage.

Nettoyage à l'arrêt

Dans de nombreux cas, que les techniques de traitement des fluides et de nettoyage en continu soient ou non utilisées, il est nécessaire de procéder à un nettoyage complet de l'appareil.

Cette opération s'effectue pendant les phases d'arrêt de l'installation et deux méthodes peuvent être utilisées (soit ensemble, soit séparément) :

- nettoyage mécanique ;
- nettoyage chimique.

Nettoyage mécanique

Le nettoyage mécanique pendant les phases d'arrêt peut être effectué sur l'échangeur en place lorsque l'espace disponible le permet ou sur une aire de nettoyage (échangeur démonté).

Plusieurs techniques peuvent être mise en œuvre.

- Nettoyage à l'eau sous pression ;
- Nettoyage à l'aide d'outils.

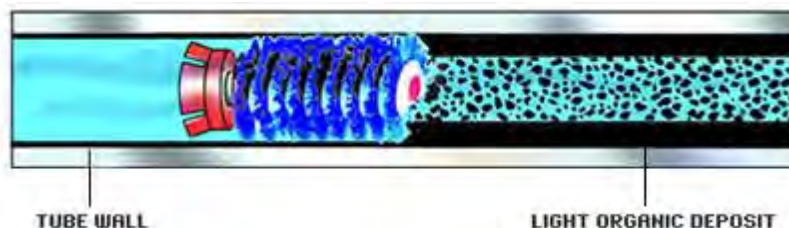


Figure 4 ; Fusil à eau fonctionnant à 15-20 bar, se déplaçant à 3-6 m/s couplé à des racleurs, roues ou brosses. (Document Conco Systems, Inc.)

Nettoyage chimique

Les procédés chimiques ont de nombreux avantages par rapport aux procédés mécaniques.

- Ils sont relativement rapides et efficaces.
- Les surfaces ne subissent pas de dommages mécaniques importants.
- Les solutions chimiques atteignent des zones inaccessibles de l'échangeur et le traitement de toute la surface d'échange est réalisé.
- Ils nécessitent moins de main d'oeuvre que le nettoyage mécanique et, en outre, peuvent se réaliser *in situ* sans démontage de l'appareil.

Substances organiques	Substances non organiques
- huile	- rouille
- graisse	- magnétite
- cires	- carbonate de calcium
- carbone mou	- sulfate de calcium
- goudrons	- hydroxyde de magnésium
- vases	- phosphate de calcium
- végétation	- silice
- substances biologiques	- silicate de magnésium
- polymères	- cuivre et oxydes cuivreux
- résines	- alumine
- peintures	- oxyde de nickel

Tableau 3 : liste de quelques dépôts pouvant être traités efficacement par les méthodes chimiques [GRETH, 2007]

Les principaux inconvénients du nettoyage par voie chimique des échangeurs de chaleur sont dus aux dangers de manipulation (brûlure, intoxication), aux températures élevées des applications, aux coûts élevés des agents chimiques utilisés, aux attaques chimiques des matériaux de l'échangeur (nettoyage irrégulier, corrosion) et aux problèmes de disposition. Les acides et les bases doivent être neutralisés, les matières organiques brûlées et les produits fluorés doivent être neutralisés en produits solides inactifs. Quelques acides organiques, tels que les acides citrique et gluconique sont biodégradables.

D'autres techniques de nettoyage sont également utilisées, notamment dans les échangeurs véhiculant des gaz encrassant. Il s'agit des techniques :

- de dissolution du dépôt l'aide d'un solvant ;
- de création d'un choc thermique au niveau de la surface d'échange pour fragiliser le dépôt et permettre son soufflage hydraulique.

Il n'y a pas de méthode universelle pour nettoyer les échangeurs ; chaque cas est pratiquement un cas particulier. Il est important de choisir la technique de nettoyage en fonction de la nature du dépôt et de son mécanisme d'adhésion.

Source :

[GRETh, 2007] H. DEMALES, P.MERCIER, P.TOCHON.P et B.THONON, Guide de l'encrassement des échangeurs de chaleur, Editions GRETh, 2007, ISBN 2-9502555-5-8

2. Les systèmes permettant de relever ou d'abaisser la température

Compression Mécanique de Vapeur

Objectif

La compression mécanique de vapeur (CMV) permet de récupérer l'énergie thermique contenue dans les vapeurs issues d'un procédé de concentration ou de séchage, et de la réinjecter en tête de procédé.

Principe

Le principe de la CMV est le suivant : les buées issues d'un procédé évaporatoire sont collectées et comprimées par une machine tournante (augmentation de la température de condensation), puis dirigées vers ce même procédé, où elles se condensent en libérant l'énergie nécessaire à la vaporisation d'une nouvelle quantité de buées. Lorsque le processus est amorcé (création des premières buées), il s'entretient uniquement par apport d'énergie électrique au niveau de la machine tournante.

Ce principe s'applique essentiellement aux procédés de concentration par évaporation. L'ensemble de l'installation est illustré sur le schéma de la figure 1:

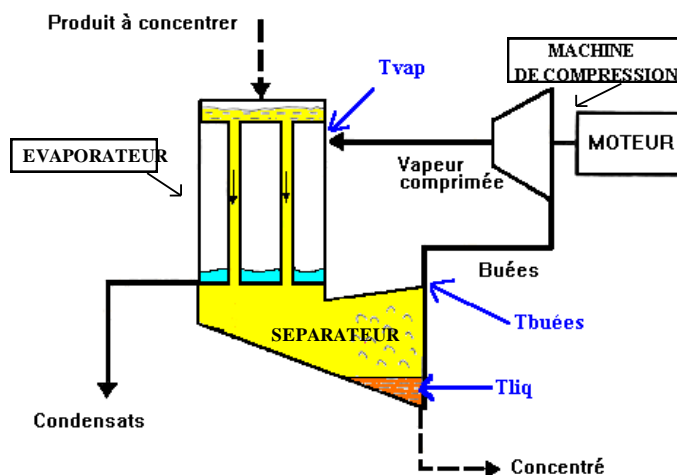


Figure 1 : Schéma de principe d'une évapo-compression – crédit EDF

Performances

La consommation d'énergie électrique est très faible face à l'énergie récupérée lors de la condensation, ce qui offre à cette technique des coefficients de performance (COP) très élevés (de 5 à 30 selon les niveaux de compression).

Par exemple, la CMV permet d'évaporer une tonne d'eau avec une consommation de 15 kWh (séparation des huiles solubles, concentration de lacto-sérum) à 100 kWh (cristallisation de sucre) soit 7 à 50 fois moins qu'un chauffage à partir de vapeur de chaudière et 4 à 5 fois moins que les installations multiples-effets.

La consommation spécifique d'une installation dépend principalement du taux de compression du compresseur, c'est-à-dire de la différence de température de vapeur saturée entre le refoulement et l'aspiration. Le coefficient de performance théorique d'une CMV peut s'écrire :

$$\text{COP}_{th} = T_{vap} / \Delta T_{comp}$$

avec $\Delta T_{comp} = T_{vap} - T_{buées}$

Par conséquent, en ce qui concerne la **machine de compression**, il est intéressant de travailler avec le ΔT_{comp} **le plus faible possible**, en effet les **températures étant exprimées en Kelvin** la valeur T_{vap} a peu d'influence sur le COP. Ceci permet d'une part d'obtenir la consommation la plus basse possible et d'autre part de baisser le coût de la machine de compression tout en augmentant sa fiabilité.

Maturité

L'évaporation avec compression mécanique de vapeur est une technique éprouvée et utilisée dans certains procédés des industries agroalimentaires depuis plus de 30 ans. Il existe de nombreux constructeurs qui proposent des solutions standards sur catalogue.

Potentiels d'application

Agro-alimentaire	Concentration de produits laitiers, de jus de fruits Concentration d'effluents de fermentation, de trempage... Cristallisation de sucre, distillation d'alcool
Chimie	Cristallisation Récupération thermique sur les rejets
Papier	Concentration de liqueurs noires
Textile	Concentration des eaux de lavage de laine, d'eaux de teinturerie
Métaux	Maintien de la concentration de bain d'électrolyte Concentration des bains de traitements de surface (recyclage de bains d'acide chromique) et recyclage de l'eau Zéro rejet en traitements de surface (cadmiage, nickelage...) Séparation des émulsions d'huiles et d'hydrocarbures
Autres	Dessalement d'eau de mer

Avantages

Économies d'énergie

Gain de place

- La CMV autorise dans la plupart des cas la mise en place d'un évaporateur monocorps, plus compact. L'encombrement au sol peut être réduit de 20 à 50 % par rapport à un évaporateur classique multiple effet (plusieurs corps d'évaporation en série).

Environnement

- La concentration par évaporation avec CMV permet de réduire les volumes d'effluents liquides, voire d'atteindre le zéro rejet dans certaines applications (traitements de surface).
- La consommation d'eau de refroidissement est faible ou nulle.
- Les condensats peuvent souvent être recyclés, réduisant d'autant la consommation d'eau de l'usine.
- Une chaudière de production de vapeur centralisée n'est pas indispensable. Un bouilleur électrique peut être intégré à l'évaporateur pour assurer son démarrage ou l'appoint thermique en régime établi.
- Une installation utilisant la CMV peut, dans certains cas, supprimer des nuisances olfactives.

Gamme de débit

- Les capacités évaporatoires peuvent aller de 40 litres/heure à plusieurs dizaines de m³/h.

Exploitation

- En raison d'une bonne maîtrise de l'écart de température entre la vapeur de chauffage et le liquide à ébullition, les chocs thermiques sont limités, l'encrassement de l'échangeur s'en trouve réduit.

Qualité

- Pour la même raison, les produits thermosensibles subissent une moindre détérioration.

Inconvénients

- Maintenance machine tournante
- Diminution de performance avec la concentration du produit

Offre constructeurs

- Capacités inférieures à 200 l/h
 Dans cette gamme de débits, seuls les compresseurs volumétriques à lobes de type roots sont envisageables (MANNESMANN DEMAG). De nombreuses références, essentiellement pour le traitement des effluents de la métallurgie.
- Capacités inférieures comprises entre 200 et 700 l/h
 EDF et PILLER ont développé une soufflante adaptée à ces débits. Plusieurs références dans le secteur de la sidérurgie.
- Capacités supérieures à 3000 l/h
 Pour cette gamme de débit, le matériel est beaucoup plus largement développé : de nombreuses applications sont en service depuis plus de 10 ans dans le secteur agro-alimentaire, en particulier pour la concentration des produits laitiers.

SOCIETES
AGROCHEM
ALFA LAVAL
APV France
A.R.F. (ex-EVATEX)
ENTROPIE
France EVAPORATION
HADWACO
GEA Wiegand France
3 E PROCESS
TGE
H2O GmbH (ex-WITTIG)
KMU FRANCE
LOFT

Ejecto-compresseur

Objectif

L'éjecto-compression permet de récupérer l'énergie thermique contenue dans les vapeurs d'un procédé.

La vapeur sortant d'un procédé peut en effet être réutilisée en la recyclant, au moins partiellement, par sa réinjection dans ce même procédé ou dans un autre en tant que vapeur de chauffage.

Cette solution n'est possible qu'à condition de compenser la chute d'enthalpie entre vapeur de chauffage et vapeur secondaire.

La technique la plus ancienne à cet égard est la thermocompression.

Un thermocompresseur n'est autre qu'un éjecteur à vapeur qui fonctionne un peu suivant le même principe qu'une trompe à eau de laboratoire. La pression de la vapeur motrice est transformée en énergie cinétique au niveau d'une tuyère, en produisant un jet de très forte vitesse.

Ce jet aspire par entraînement une partie de la vapeur secondaire sortant d'un évaporateur par exemple. Au niveau du col, a lieu le mélange vapeur motrice/vapeur aspirée qui sort à une pression supérieure à celle de la vapeur aspirée.

Le terme de thermo-compression est généralement utilisé pour cette technique, mais il est vague.

Il est donc préférable de parler d'éjecto-compression.

Principes

Descriptif

Qu'est ce qu'un éjecto-compresseur ?

C'est un éjecteur à faible taux de compression (généralement inférieur à 2 ou 2,5), essentiellement utilisé dans les procédés d'évaporation/cristallisation et de distillation pour recomprimer les vapeurs.

L'éjecto-compresseur utilise des compresseurs à injection de vapeur d'eau pour comprimer les vapeurs. Les compresseurs à injection de vapeur peuvent comporter des buses d'injection fixes ou variables. L'énergie thermique requise par la compression est de la vapeur vive provenant d'une chaudière.

La vapeur d'eau vive traverse la buse d'injection et est étranglée à la pression de vapeur de réception. Ces dernières sont entraînées par la différence de vitesse. La vapeur et la vapeur d'eau vive sont mélangées dans la chambre de mélange.

Modifier l'ouverture du diffuseur permet de régler la pression à laquelle le mélange de vapeurs quitte le compresseur à injection de vapeur.

Ces appareils peuvent également être proposés avec une tuyère à section variable permettant d'ajuster (automatiquement ou manuellement) la consommation de vapeur motrice aux besoins réels de fonctionnement.

Un éjecteur (figure ci-dessous) reçoit donc en entrée deux fluides généralement gazeux, mais qui peuvent aussi être liquides ou diphasiques :

- le fluide à haute pression, appelé fluide moteur ou primaire ;
- le fluide à basse pression, appelé fluide secondaire ou entraîné.

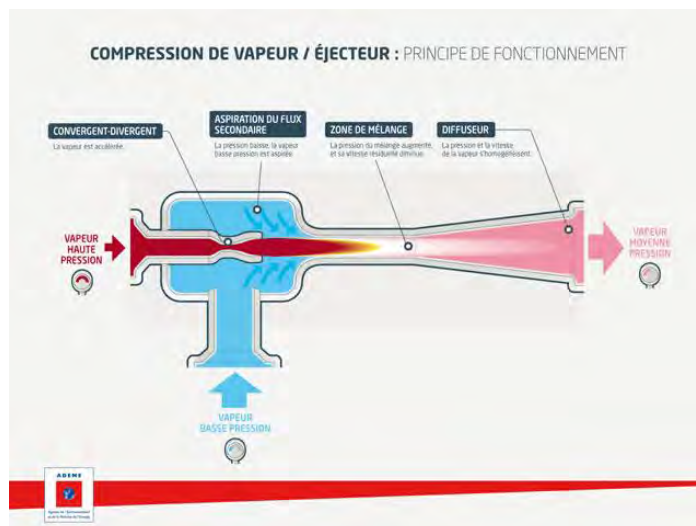


Figure 1 : Schéma d'un éjecteur – crédit ADEME

Le fluide moteur (vapeur haute pression) est accéléré dans un convergent-divergent, créant une baisse de pression dans la zone de mélange, ce qui a pour effet d'aspirer le fluide secondaire (vapeur basse pression). Les deux fluides sont alors mélangés et une onde de choc peut prendre place dans la fin de cette zone. Il en résulte une augmentation de la pression du mélange et une baisse de sa vitesse, qui devient subsonique. Le diffuseur permet de convertir la vitesse résiduelle en augmentation de pression.

L'éjecteur réalise ainsi une compression du fluide secondaire au prix d'une baisse d'enthalpie du fluide primaire. C'est la raison pour laquelle on appelle souvent thermocompresseur un éjecteur, et on parle de thermocompression.

Un éjecto-compresseur est par conséquent constitué de :

- une arrivée de vapeur vive ou vapeur motrice (repère 1) constituée principalement d'une boîte d'alimentation facilitant le démontage de la tuyère ;
- une arrivée de vapeur « molle » (buées) (repère 2) dirigeant celle-ci à la périphérie du jet de vapeur, avec une mise en vitesse conduisant à une légère détente ;
- une tuyère (repère 3) assurant la transformation de l'énergie de pression de la vapeur vive en énergie cinétique ;
- un convergent-divergent (repère 4) où s'effectue le « mélangeage » des 2 vapeurs, avec transmission d'une partie de la vitesse de la vapeur motrice à la vapeur aspirée, puis la transformation de l'énergie cinétique du mélange en énergie de pression

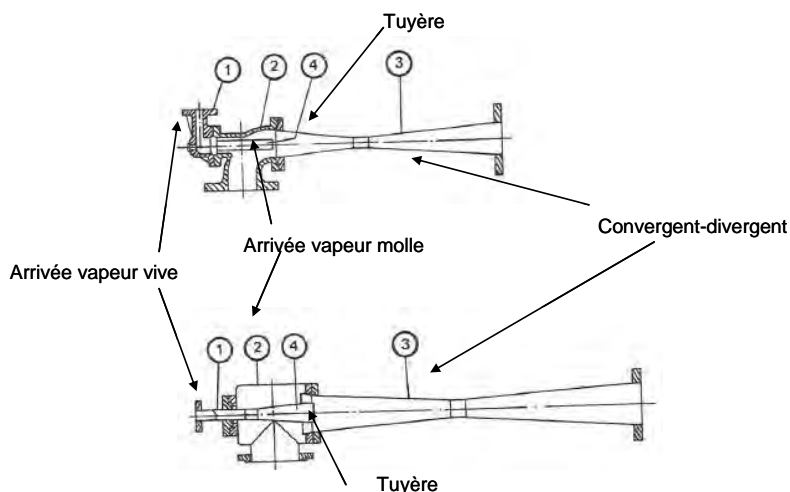


Figure 2 : Schéma d'un éjecto-compresseur (Direction Études et Recherche d'EdF) – crédit EDF

Finalement, le moteur de l'éjecteur est l'énergie cinétique de la vapeur vive sortant de la tuyère. L'énergie reçue par la vapeur molle est donc en totalité de l'énergie mécanique.

Éjecteurs mono-tuyère

Ce sont les plus classiques et les plus répandus.

Des courbes donnent en général les conditions opératoires et la consommation spécifique mM/mA d'un éjecteur aspirant de la vapeur d'eau et utilisant aussi la vapeur d'eau comme vapeur motrice.

mA : masse de vapeur à l'aspiration

mM : masse de la vapeur motrice

Le meilleur rendement est obtenu pour un rapport de compression (pression absolue de vapeur recomprimée divisée par pression absolue de vapeur « molle ») de l'ordre de 2. Dans ce cas, l'écoulement dans le convergent-divergent est encore subsonique, mais se rapproche du domaine supersonique.

Cet éjecteur permet une plus grande souplesse en termes de variation des critères de fonctionnement par rapport aux multi-tuyères.

Le rendement global d'un éjecto-compresseur classique est de 25 à 30%

Éjecteurs multi-tuyères

Ce sont des éjecto-compresseurs très performants, caractérisés par la détente de la vapeur motrice dans plusieurs tuyères, d'où leur nom.

Le rendement global de l'éjecto-compresseur multituyères est de 38 à 42 % (Maguin-Interis), avec les caractéristiques suivantes :

- pression de la vapeur à l'aspiration : $PA = 2,2$ à 3 bar abs.
- Pression de la vapeur motrice : $PM = 22$ bar et $TM = 320^\circ C$
- Le taux d'entraînement mA/mM est de 3 avec $PR - PA = 0,6$ à $0,65$ bar abs.

PA : Pression à l'aspiration

PM : Pression de la vapeur molle

PR : Pression au refoulement

mA : masse de vapeur à l'aspiration

mM : masse de la vapeur motrice

TM : température de la vapeur motrice

La particularité du multi-éjecteur par rapport à un éjecteur classique mono-tuyère est la division du flux haute pression par de nombreuses buses permettant de se rapprocher d'un écoulement d'un fluide parfait. L'homogénéisation des vapeurs haute pression et basse pression est donc optimale. Le rendement attendu est de 10 à 20 % supérieur par rapport à un éjecteur mono-tuyère. Le coût de maintenance est faible car il n'y a pas de pièces mécaniques en mouvement.

Maturité

La théorie est actuellement parfaitement connue, le calcul pratique de l'éjecteur se base sur des courbes qui permettent une prédétermination assez précise.

Les caractéristiques finales résultent du savoir-faire des constructeurs.

Cette technologie est mature.

Les codes de calcul sont reconnus, les équipementiers connaissent également les précautions à prendre au niveau des sécurités de construction.

Potentiels d'application

Les éjecteurs sont des dispositifs statiques qui permettent de réaliser la compression d'un fluide sans recourir à la compression mécanique. Ils peuvent donc se substituer à des compresseurs dans de nombreuses applications, comme la **compression mécanique de vapeur**, les **cycles de réfrigération** ou de pompe à chaleur, l' **extraction des incondensables** au condenseur d'un cycle à vapeur.

Ils sont utilisés dans de nombreuses industries (papeteries, raffineries, sucreries ...); Le rendement enthalpie est moins fort que les RMV, mais ils permettent de fonctionner avec des delta T plus important et des coûts de maintenance très faibles.

Usages

Dès que de la vapeur vive (buées d'évaporation par exemple) est disponible à une **pression élevée** par rapport à la pression d'utilisation dans un équipement (évaporateur, colonne de distillation, tamis moléculaire pour la déshydratation ...), il est alors possible de la recomprimer et d'utiliser ce mélange comme vapeur de chauffage soit du même équipement, soit d'un autre équipement. Par conséquent, l'usage est simple et les applications nombreuses.

Secteurs industriels

Les applications sont nombreuses

- Agroalimentaire : laiteries, distilleries, brasseries...
- Papeteries
- Concentrations
- ...

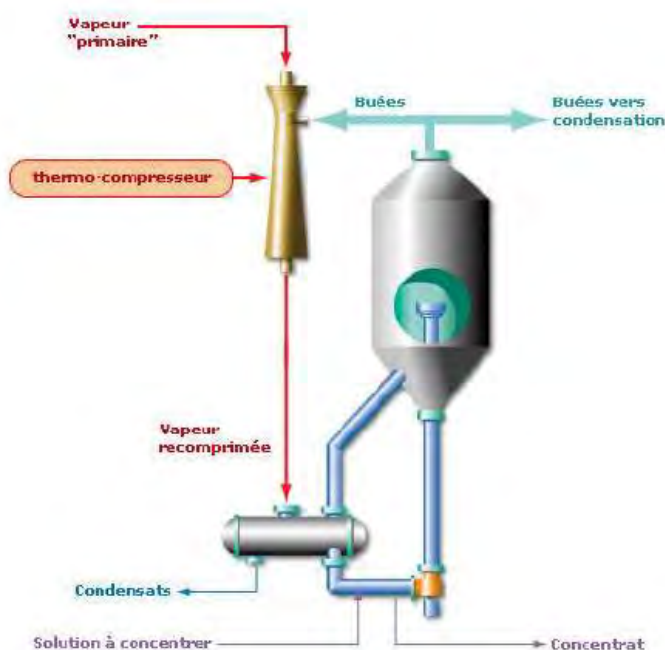


Figure 3 : schéma d'une installation de concentration avec thermocompresseur – crédit ADEME

L'éjecto-compresseur est le plus souvent installé sur le premier effet d'un évaporateur multiple effet, l'équilibre thermique de l'évaporateur conduit à ne comprimer qu'une partie des buées d'évaporation.

La quantité de vapeur évaporée au dernier effet est sensiblement égale à la quantité de vapeur motrice de l'éjecto-compresseur. Elle doit être condensée et constitue une perte, sauf si on peut l'utiliser au préchauffage des solutions diluées froides.

Investissements

Le dimensionnement et le coût des éjecto-compresseurs varient fortement selon les conditions de température et de pression des vapeurs motrice, aspirée et refoulée.

L'investissement est cependant modeste.

Thermo mono tuyère 6000 euros à 10 000 euros

Thermo multi-tuyères 25000 euros à 30 000 euros

Mise en place 15 000 euros vannes tuyauterie HP 10 ml et tuyauterie BP 2 x 10 ml

Le thermo mono tuyère représente 10 % de l'ensemble du coût de sa mise en place
 Le thermo multi tuyère représente 20 % de l'ensemble du coût de sa mise en place

Budget global : mono tuyère : 100 k€
 multi tuyère : 150 k€

Avantages

L'éjecto-compresseur possède les avantages suivants :

- Appareil fiable et robuste (sans pièce en mouvement)
- Facilité de conduite
- Appareil simple, relativement peu coûteux et d'entretien facile
- L'éjecteur est dimensionné pour une application donnée, évitant ainsi un surdimensionnement
- Diminution de la taille totale du condenseur
- On peut l'utiliser également comme secours d'une installation équipée d'une recompression mécanique (avec un condenseur)
- Il peut être utilisé pour réduire la consommation de vapeur d'appoint dans une installation équipée d'une RMV : cette vapeur sert non seulement d'appoint d'énergie thermique dans l'évaporateur, mais aussi de vapeur motrice d'un éjecteur recomprimant une faible partie de la vapeur évaporée (parallèlement au compresseur mécanique)

Inconvénients

- Du fait de son rendement global, l'économie d'énergie est faible au final mais suffisante pour des équipements dont la durée de fonctionnement annuel est faible et donc ne permettent pas la mise en œuvre d'équipements plus lourds
- Les grandes vitesses atteintes par la vapeur conduisent à un niveau de bruit élevé qu'il est impératif de traiter au moyen d'un capotage acoustique (isolant thermique également)
- Le rendement diminue rapidement dès que l'on s'éloigne des caractéristiques nominales de la vapeur motrice
- La plage de variation de débit aspiré est assez réduite. Pour les faibles débits, il se produit un décrochement, et la vapeur vive passe dans la tuyauterie de vapeur molle.
- Il nécessite une vapeur motrice avec une pression élevée, pas toujours disponible sur les sites des IAA.
- Pour de grands débits ; les pertes de charge deviennent prépondérantes et le rapport de compression chute.

Offres constructeurs

De nombreuses applications sont en service depuis de nombreuses années.

Constructeurs
Kinetic Therm
MC2
Kadant Johnson France B.V.
L.V.I.' Systems
Interpec
GEA Process engineering

Liste non exhaustive.

Conclusions

Les éjecteurs représentent une technologie simple à mettre en œuvre du moment que les débits sont relativement stables et que la durée de fonctionnement des installations dépasse les 2000 heures par an. Les multi éjecteurs, malgré un montant d'investissement supérieur, permettent une économie d'énergie plus conséquente.

Le coût de l'électricité va augmenter dans les prochaines années, cela risque d'impacter très fortement la rentabilité des systèmes motorisés.

Les prix du gaz devraient être plus stables du fait de la disponibilité de cette énergie et du gaz de schiste. La fiabilité des appareils est très importante et les frais de maintenance sont très faibles



Photo 1 : modèle 3D : www.kinetic-therm.com – crédit UNGDA

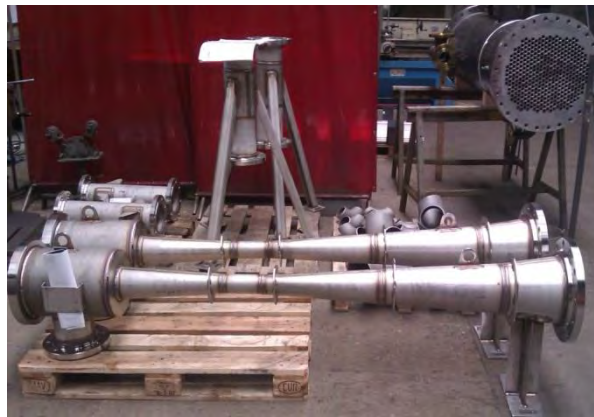


Photo 2 : éjecteur et condenseur : www.kinetic-therm.com - crédit UNGDA



Photo 3 : éjecteur installé : www.kinetic-therm.com- crédit UNGDA

Sources

- Concentration par évaporation et recompression mécanique de vapeur par Jean-François Reynaud
- Collection de la direction des études et recherche d'Électricité de France
L'évapo-concentration (ADEME)

Pompes à chaleur industrielles

Définition

Une pompe à chaleur (PAC) est un dispositif thermodynamique permettant, grâce à l'apport d'un travail W (compresseur) de transférer de la chaleur du milieu le plus froid (source) vers le milieu le plus chaud (puits).

Principe

Une pompe à chaleur est composée d'une boucle fermée contenant un fluide frigorigène qui est soit à l'état liquide, soit à l'état gazeux, soit à l'état diphasique. Ce fluide traverse quatre organes principaux (voir figure 1) :

- *Un évaporateur* où le fluide absorbe de la chaleur de la source froide en se vaporisant (la source froide est donc refroidie),
- *Un compresseur* qui augmente l'enthalpie et la pression du fluide (et donc sa température de condensation),
- *Un condenseur* dans lequel le fluide cède sa chaleur latente à la source chaude en se condensant (le puits est donc réchauffé),
- *Un détendeur* qui régule l'alimentation de l'évaporateur et transfère le liquide de haute pression à basse pression.

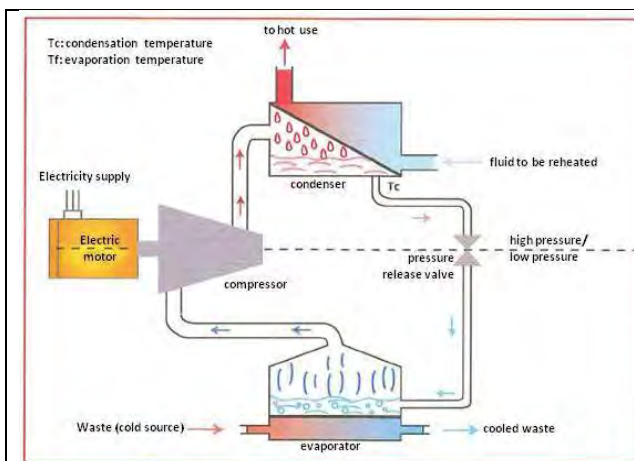


Figure 1 – Schéma de base d'une pompe à chaleur – crédit EDF

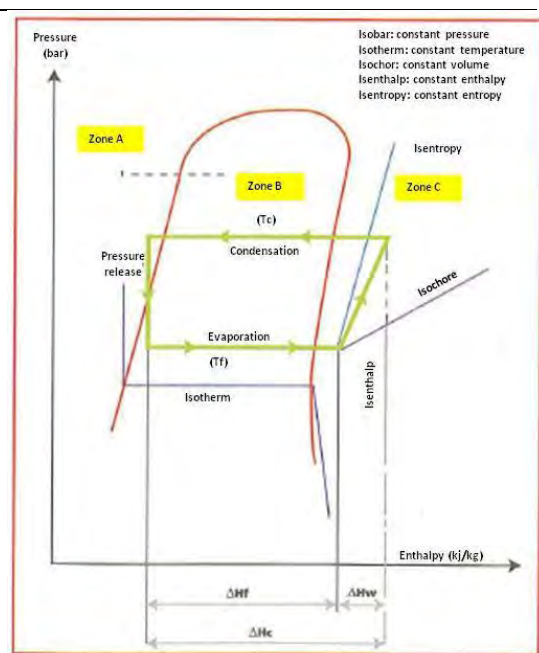


Figure 2 – Cycle du fluide frigorigène – crédit EDF

La récupération d'énergie se fait grâce aux changements d'état successifs du fluide frigorigène. Le cycle du fluide est souvent analogue à celui présenté en figure 2.

Performances

Pour caractériser les performances d'une PAC, on utilise le COP (coefficient de performance) qui est le ratio de la chaleur produite par sa consommation électrique. Dans une première approche, on peut utiliser l'approximation suivante :

$$\text{COP} \approx 0.55 \times \text{COP}_{\text{CARNOT}} \text{ avec } \text{COP}_{\text{CARNOT}} = T_C / (T_C - T_F)$$

où T_C et T_F sont respectivement les températures de changement de phase du fluide frigorigène au condenseur et à l'évaporateur, en Kelvin.

Pour des écarts de 40/50 °C entre température d'évaporation et de condensation, le COP est de l'ordre de 3 et peut facilement atteindre des valeurs allant jusqu'à 4 ou 5 selon le fluide choisi et l'architecture de la PAC..

Maturité

État actuel : des PAC de 100 kW à quelques MW permettant d'atteindre des températures de 100°C sont aujourd'hui commercialisées.

Perspectives 2015 : offre commerciale de PAC jusqu'à 120 °C

Perspectives 2017 : commercialisation des PAC à eau (amélioration du COP, avantages liés à l'eau : fluide naturel, disponibilité, pérennité, facilité de maintenance,...)

Potentiels d'application

Récupération d'énergie sur les effluents industriels, les Tours Aéroréfrigérantes (TAR), condenseurs des groupes froids pour assurer :

- la production d'eau chaude pour process , eau chaude sanitaire ou eau chaude pour alimenter un réseau de chaleur.
- la production de vapeur pour process.
- la récupération d'énergie sur les buées des sécheurs industriels.

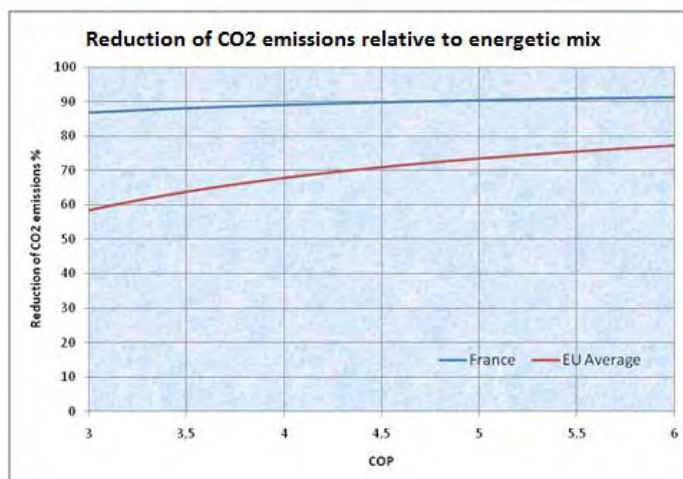
Avantages

- Gain énergétique lorsque la PAC est installée en substitution partielle de chaudière
Ex : PAC de COP = 4 ; 1 kWh gaz substitué par 0,25 kWh élec
- Performances environnementales

La PAC permet de profiter d'un double gain :

- le gain associé à la réduction de consommation en énergie primaire obtenu par l'effet du COP de la PAC
- le gain associé au faible contenu en CO₂ du MWh électrique en France.

Ainsi, l'implantation d'une PAC ayant un COP de 3, permettant ainsi de substituer 3 kWh de gaz consommé par une chaudière, par 1 kWh d'électricité consommé par la PAC, conduit à **réduire les émissions de CO2 initiales de 90%**. L'effet d'une telle substitution est particulièrement sensible en France (par rapport aux autres pays de l'Union Européenne) en raison du faible contenu en CO₂ du kWh produit principalement à partir d'énergie nucléaire.



crédit EDF

Figure 3 : Gains en émissions de CO2 (en % des émissions initiales) lors de la substitution de calories issues d'une chaudière (ou d'un brûleur à gaz) par les calories issues d'une PAC

Les coûts d'investissement

Le prix d'une PAC peut varier énormément en fonction de ses conditions de travail. Des machines produisant de l'eau chaude à des températures inférieures à 70°C sont souvent dérivées des machines pour la climatisation tertiaire et le froid industriel. Elles sont produites en grosses quantités et donc elles sont beaucoup moins chères que d'autres machines conçues sur mesure à des températures plus élevées. En première approche, aujourd'hui, on peut considérer qu'une machine standard coûte près de 500 €/kW électrique installé, alors qu'une PAC conçue sur mesure coûtera près de 1500 €/kW installé.

Le coût d'installation peut varier entre 0 et 100% du coût d'investissement en fonction de la proximité entre source froide et source chaude.

Offre constructeurs

PAC commercialisées (T > 90°C) :

- Mayekawa, Kobelco, Toyo Engineering, MHI, Toshiba Carrier (Japon)
- Thermea (Allemagne), JCI, Clauger (France), STAR (GB)
- Emerson (USA)
- JCI, Clauger (France)

PAC en développement (T > 90°C) : Ebara (Japon), Kier (Corée)

PAC commercialisées (T > 100°C) : Mayekawa, Kobelco, Toyo Engineering, JCI

PAC en développement (T > 100°C) : MHI (Japon), Thermea (Allemagne), Clauger (France)

REX

Principe et performances de la récupération de chaleur par PAC ont été validés par un prototype de petite taille sur un site industriel d'un secteur agroalimentaire : récupération de chaleur sur des effluents à 50°C pour fournir des besoins à 55, 65 et 80 °C.

Pompes à chaleur hybride à compression et absorption

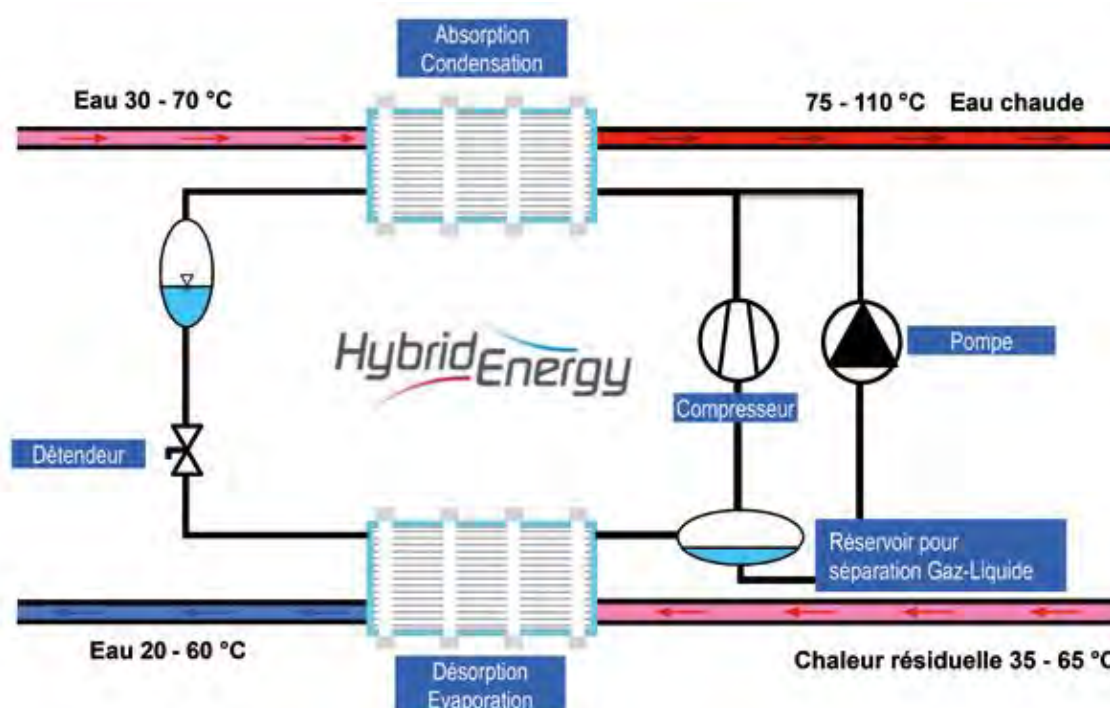
Principe de fonctionnement

Le cycle thermodynamique de cette PAC se base sur un cycle de Lorentz avec un mélange de solution $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$.

Froid et chaud sont produits grâce :

- A la détente et à la compression du réfrigérant (mélange eau/ammoniac)
- Aux réactions chimiques entre l'eau et l'ammoniac : production de chaud et de froid à partir des phénomènes d'absorption (mélange des éléments) et de désorption (séparation des éléments).

Le principe de fonctionnement est présenté sur le schéma ci-dessous.



Source : http://www.aximaref.com/photos/973_Plaquette_PAC_Hybride_01_14.pdf

Crédit EDF

Le cycle peut être décrit de la manière suivante :

1. Mélange à haute pression d'un liquide (solution très pauvre en ammoniac) et d'un gaz (forte concentration d'ammoniac avec un peu d'eau). Ce mélange provoque une réaction exothermique.
2. Détente de ce mélange avant d'arriver dans le désorbent
3. Désorption du mélange à basse pression (réaction endothermique : la chaleur nécessaire est prélevée au milieu extérieur) et séparation des phases (phase vapeur riche en ammoniac et phase liquide très pauvre en ammoniac)
4. Compression des phases liquide (pompe) et gazeuse (compresseur) de manière synchronisée.

Les températures délivrées sont comprises entre 70 et 115°C.

Avantages de cette machine

- Travail à très faible pression (<20 bars)
- Pas de HFC

Inconvénients

- Machine a priori difficile à démarrer
- Les performances sont intéressantes pour des glides (différence de température du fluide frigorigène entre l'entrée et la sortie des échangeurs) de 10°C minimum coté source chaude.
- La flexibilité de la machine et la régulation restent assez floues
- Investissement probablement supérieur à une PAC à compression classique

Performances

- La puissance thermique produite par ces machines s'échelonne de 450 kW à 1250 kW.
- Les températures délivrées des machines installées sont comprises entre 70 et 90°C.

Maturité

Fin 2012, la société Hybrid Energy avait fourni un total de 8 unités. Ces unités sont majoritairement en fonctionnement en Scandinavie, dans l'industrie agroalimentaire.

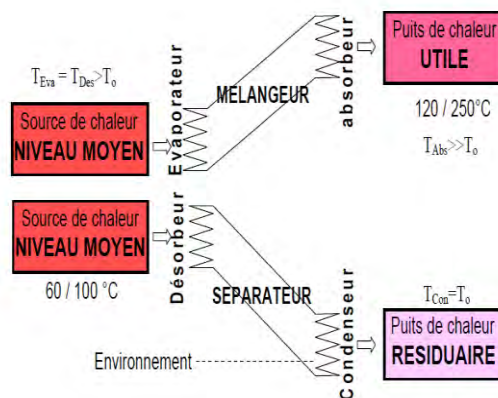
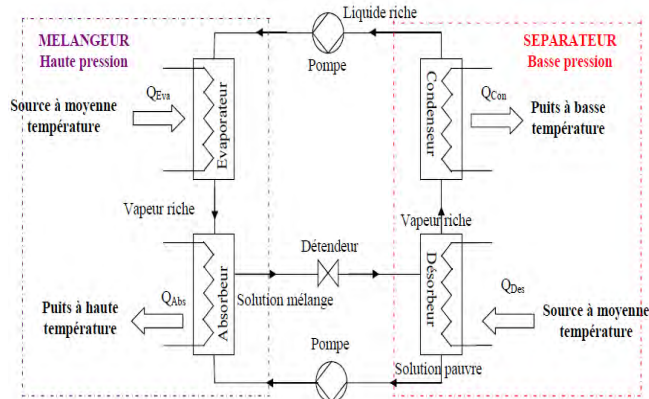
Offre constructeur

La société norvégienne HYBRID ENERGY développe et commercialise des PAC à Compression Absorption (PAC CA). La phase de développement du produit est aujourd'hui terminée. Cette société cherche donc désormais à mettre son produit sur le marché.

Les thermo transformateurs (PAC à absorption de type II)

Principe

Ce sont des machines trithermes qui permettent à partir d'une source (effluent) à un niveau moyen de température, de produire de la chaleur à un niveau élevé de température et de produire du froid à un niveau plus bas de température (transformeur de chaleur). Elles fonctionnent grâce à la faculté de certains liquides d'absorber et de désorber une vapeur. Cette dernière réaction est endothermique et nécessite l'apport de chaleur.



Représentation schématique d'un thermo-transformateur – crédit thèse Halima Noubli Nancy Université

Le mélange de travail est séparé dans le désorbeur chauffé par une source de chaleur à moyen niveau (Q_{Des}) souvent grâce à une chaleur résiduaire à une température moyenne (c.-à- d. entre le niveau de demande (besoin d'apport d'énergie) et le niveau environnemental). Une vapeur riche et un liquide pauvre sont obtenus. La vapeur est condensée, en rejetant de la chaleur (Q_{Con}) vers un puits de chaleur à plus bas niveau à T_{Con} . Le liquide riche est ensuite évaporé dans l'évaporateur recevant de la chaleur d'une source à moyen niveau d'énergie (Q_{Eva}) à $T_{Eva} = T_{Des}$. La vapeur produite est alors absorbée au sein de l'absorbeur par la solution pauvre provenant du désorbeur. La chaleur libérée lors de l'absorption (Q_{AM}) est rejetée vers un puits à un niveau thermique plus élevé à T_{Abs} . Le mélange ainsi obtenu est renvoyé vers le désorbeur et effectue à nouveau le cycle.

Ces machines utilisent comme fluide de travail un mélange binaire, dont l'un des composants est beaucoup plus volatil que l'autre, et constitue le fluide frigorigène, l'autre constitue l'absorbant. Deux couples sont principalement utilisés : Eau+Bromure de Lithium ($H_2O/LiBr$), l'eau étant le fluide frigorigène; Ammoniac+Eau (NH_3/H_2O), l'ammoniac étant le fluide frigorigène.

Performances

On définit l'efficacité de cette de la machine comme le rapport de la chaleur fournie à haute température sur l'énergie du processus récupérée à moyenne température.

Couple de fluide	Coefficient d'efficacité	Elévation de température maximum	Température de besoin maximum
H2O / BrLi	0.45 – 0.48	50	130

Caractéristiques des PAC à absorption type II selon le couple de fluide – crédit EDF

L'efficacité est nettement inférieure à 1 contrairement aux pompes à chaleur. Cette technologie possède des atouts considérables pour permettre de répondre à des besoins thermiques sans effectuer d'apports complémentaires d'énergie lorsque la quantité d'énergie est disponible en quantité et que l'élévation de température ne dépasse pas 50°C.

Potentiel d'application

Les thermo transformateurs à absorption sont particulièrement adaptés à la revalorisation des chaleurs résiduelles industrielles. Ils permettent d'utiliser de la chaleur résiduaire bas niveau (60°C à 80°C) pour en revaloriser une partie et ainsi fournir de la chaleur utile à un haut niveau thermique (> 100°C). Il est aussi possible d'utiliser un tel système pour élever la température d'une chaleur à moyenne température issue de capteurs solaires ou de sources d'eaux chaudes par exemple.

Au niveau industriel, d'autres sources de chaleur sont possibles :

- Les effluents avant leur rejet dans les réseaux d'assainissement,
- Les condensats ;
- L'eau de refroidissement des processus industriels ou des systèmes de production d'électricité.

Le puits d'énergie pour le condenseur est l'environnement qui est à température ambiante et le puits de chaleur utile au niveau de l'absorbeur est un procédé typiquement endothermique nécessitant de la chaleur à plus de 100°C.

En raison de la fluctuation dans l'approvisionnement en chaleur résiduaire, il peut être nécessaire d'employer de grands réservoirs de stockage afin assurer le fonctionnement stable et continu de la pompe à chaleur.

Les coûts d'investissement

Coûts d'investissement d'un thermo-transformateur (€/kW installé)		
Puissance d'environ 0.5 MW	Puissance d'environ 1 MW	Puissance d'environ 4 MW
800 – 900	720 – 830	590 – 680

Les coûts d'investissement des thermo transformateurs sont élevés, entre 20 et 50 % supérieurs aux coûts de PAC à compression mécanique.

Références

Une publication fait référence à une installation en Chine dans une entreprise produisant du caoutchouc synthétique (2003).



Installation de transformation de chaleur de 5MW – X. Ma, J. Chen, S. Li, Q. Sha, A. Liang, W. Li, Application of absorption heat transformer to recover waste heat from synthetic rubber plant

Elle est utilisée pour chauffer un besoin à 110°C à partir d'une source à 98°C.

Ci-dessous d'autres références industrielles utilisant cette technologie de récupération de chaleur :

- R.M Barragan, C.L. Heard, V.M. Arellano, Experimental performance of the water/calcium chloride system in a heat transformer, *International Journal of Energy Research* 20 (1996) 651-661
- Z. Mostofizadeh, C. Kulick, Use of a new type of heat transformer in process industry, *Applied Thermal Engineering* 18 (1998) 857–874.
- M.R. Jeday, J. Labidi, P. Le Goff, Heat transformer for upgrading the waste heat of an industrial sulfuric acid plant, *Chemical Engineering Research and Design* 71 (A5) (1993) 496–502.

3. Les systèmes de transformation de chaleur en une autre forme d'énergie

Machine thermique à Cycle Organique de Rankine

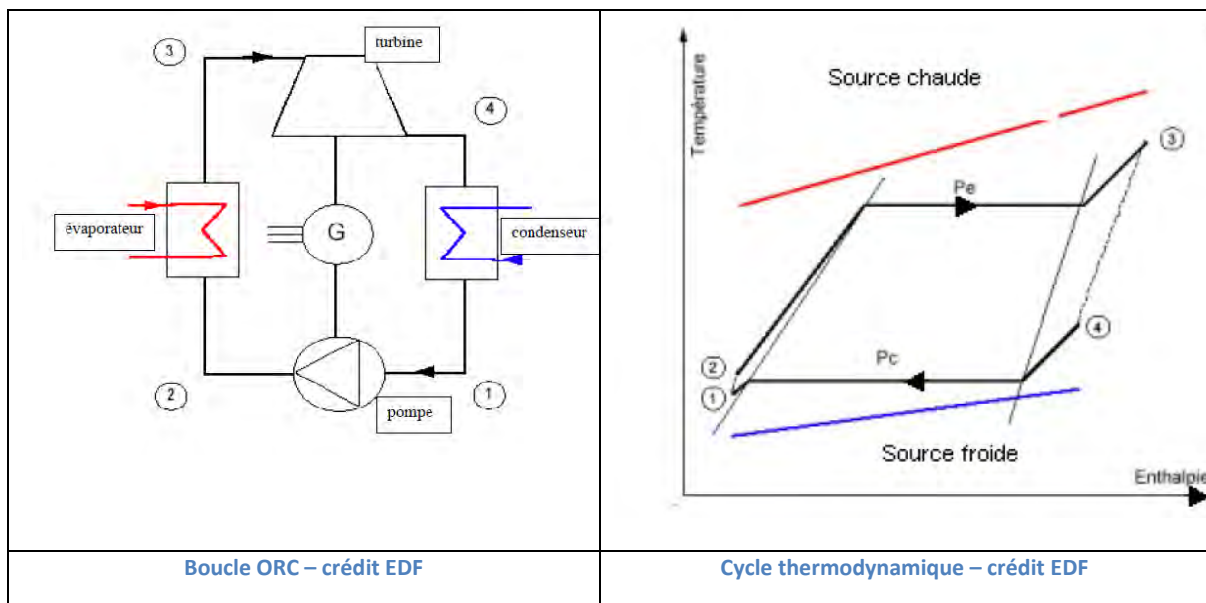
Définition

Le Cycle Organique de Rankine (ORC) est un cycle thermodynamique qui permet de produire un travail mécanique convertible en électricité à partir d'une source de chaleur (effluent industriel gazeux ou liquide, géothermie, solaire, biomasse, gaz, etc.) et d'une source froide (généralement air ambiant ou eau).

Principe

Le cycle ORC fonctionne avec un fluide organique à grande masse molaire appelé fluide de travail. Ce fluide est pompé en phase liquide (étape 1-2), chauffé, vaporisé à haute pression dans un **évaporateur** par un fluide chaud (effluent à valoriser) et surchauffé (étape 2-3), détendu dans une **turbine** où il produit du travail mécanique (étape 3-4) puis refroidi et condensé (étape 4-1) à basse pression jusqu'à un état de liquide sous-refroidi dans un **condenseur** (source froide = air ambiant ou eau du réseau ou effluent froid) avant d'être ramené à haute pression par une **pompe** pour pouvoir compléter le cycle avec une nouvelle évaporation.

La turbine est reliée à un **alternateur** assurant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.



Performances

Le principal indicateur de performance d'un cycle ORC est son rendement global. Ce rendement est défini par :

$$\eta_{\text{cycle}} = (P_{\text{elec}} - P_{\text{pompe}} - P_{\text{AUX}}) / P_{\text{evap}}$$

avec :

- P_{elec} la puissance électrique brute produite par l'alternateur
- P_{pompe} la puissance consommée par la pompe du fluide de travail
- P_{AUX} la puissance électrique des organes auxiliaires
- P_{evap} la puissance absorbée à l'évaporateur

Le rendement est généralement compris entre 10 et 20 % selon les niveaux de température.

Si l'on considère 10 % comme seuil d'acceptabilité du rendement du cycle, **l'écart de température entre source froide et source chaude ne doit pas être inférieur à 70/80 °C. Ainsi, la température de la source chaude ne doit pas être inférieure à 90/100 °C pour un refroidissement à température ambiante.**

Les fluides organiques sont préférés à l'eau lorsque la température de la source chaude est inférieure à une certaine valeur car ils permettent d'obtenir une vapeur surchauffée à plus basse température.

Les organes auxiliaires sont :

- Pompe du fluide de travail
- Électronique : régulation, capteurs
- Pompe huile circuit intermédiaire (entre source chaude et évaporateur)
- Circuit de refroidissement
 - Pompe circuit de refroidissement (eau glycolée)
 - Et/ou ventilateur aérofrigorant

Ils peuvent consommer entre 10 et 20 % de la puissance brute produite par la turbine

Maturité

Il existe une vingtaine de références en Europe (fonderie, biomasse, géothermie, cimenterie).

Potentiel d'application

L'ORC est une solution de valorisation de chaleur fatale. Énergétiquement, c'est une solution moins intéressante qu'un échangeur, une pompe à chaleur, ou un groupe froid par absorption. L'ORC peut être une solution de valorisation lorsqu'on ne peut pas récupérer l'énergie avec un échangeur (besoins décalés dans le temps et/ou l'espace par rapport à la source de chaleur) ni avec une pompe à chaleur (besoins décalés dans le temps et/ou l'espace par rapport à la source de chaleur, température de la source chaude trop élevée).

En IAA, un système ORC peut être appliqué sur la chaleur fatale récupérée :

- Industrie laitière (100 – 150 °C) : 610 GWh
- Sucrierie (100 – 150 °C) : 510 GWh

Plusieurs usages sont potentiellement sources de rejets thermiques valorisables par ORC dans l'IAA :

- Fumées chaudière
- Concentration par évaporation
- Procédés de distillation
- Séchage
- Fours
- Pasteurisation
- Stérilisation
- Blancheurs

Il existe de nombreuses références dans les secteurs de la sidérurgie, la verrerie ou encore la cimenterie. Aujourd'hui, à notre connaissance, il n'y a pas d'exemple d'application en IAA.

Avantages

Turbine de petite taille, peu coûteuse par rapport à une turbine à vapeur d'eau.

Solutions fiables, entièrement automatisées, nécessitant peu de supervision.

La multitude des fluides disponibles permet de construire des modules adaptés à la valorisation de chaleur à partir de 80°C, jusqu'à 350°C.

Possibilité de faire de la cogénération.

Coûts

Le coût d'investissement d'un ORC est entre 1500 et 3000 € par kilowatt électrique installé. Le coût dépend fortement de l'échangeur qui récupère la chaleur de la source chaude.

Offre constructeurs

- $T < 100^{\circ}\text{C}$
 Produits commercialisés : Kobelco, MHI (Japon)
 Infinity Turbines LLC, Electraterm, UTC Power (USA)
 Conpower (Allemagne)

 Produits en développement : POSCO/BNI (consortium Coréen/USA)
 Ulvac (Japon)
 Enertime (France)
 Bosch (Allemagne)
- $100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$
 Produits commercialisés : FUJI electric (Japon)
 Eneftech (Suisse)
 Ormatic (Allemagne)
 Bosch (Allemagne)

 Produits en développement : Cryostar (France)
 Kobelco (Japon)
- $150^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$
 Produits commercialisés : FUJI electric (Japon)
 Turboden (Italie)
 Ormatic, Koehler (Allemagne)
 Ormat, Infinity Turbines LLC, UTC Power (USA)

 Produits en développement : KIER, POSCO (Corée)
 JFE (Japon)
- $T > 350^{\circ}\text{C}$: Triogen (Pays-bas)

REX

- Boucle ORC géothermale : Hot Dry Rock, Soultz (Alsace) / Pelec = 1.5 MW
- Couplage Chaudière à biomasse / ORC : Scierie Mayr-Melnhof, Leoben (Autriche) / Pelec = 1.6 MW
- ORC en récupération de chaleur dans l'industrie : MIROM (Belgique) / Pelec = 3 MW
 CIMAR (Maroc) / Pélec = 1.9 MW

4. Les stockages de chaleur

Stockage chaleur sensible

Principes

Principe physique

Cette méthode consiste à chauffer un liquide ou un solide sans changement de phase.

La quantité d'énergie stockée dépend du changement de température du matériau et peut être exprimée selon l'équation 1.

$$E = m \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (\text{Équation 1})$$

où m représente la masse du matériau liquide ou solide, Cp sa capacité calorifique à pression constante et T1 / T2 ses températures initiale et finale.

Les systèmes de stockage par chaleur sensible sont beaucoup plus simples que ceux par changement de phases ou par réactions chimiques. Ils ont cependant l'inconvénient d'être plus volumineux. Pour cette raison, un critère important dans la sélection du composé de stockage est la valeur du produit (ρC_p). L'autre inconvénient majeur associé aux systèmes de stockage par chaleur sensible est qu'ils ne peuvent stocker et fournir de l'énergie à température constante.

La capacité de stockage d'un système à chaleur sensible à l'aide d'un composé liquide ou solide est donné par :

$$Q_s = mc\Delta T = V\rho c\Delta T \quad (\text{Équation 2})$$

Avec m la masse, V le volume, c la capacité calorifique, ρ la masse volumique et ΔT la différence entre les températures maximum et minimum du composé.

Cette expression peut être utilisée pour calculer la masse et le volume de stockage requis pour une application donnée.

Pour du stockage sur un lit de solide, la porosité (ε) du lit doit être prise en compte :

$$V = Q_s / \rho c(1 - \varepsilon)\Delta T \quad (\text{Équation 3})$$

Le choix du composé utilisé dépend largement du niveau de température requis par l'application. Le stockage de chaleur sensible peut être réalisé à basse ou haute température. Pour des températures inférieures à 100 °C l'eau liquide, la roche ou le béton sont généralement utilisés. Pour des températures supérieures, des solutions existent également comme par exemple les sels fondus, les huiles organiques utilisées comme milieu de stockage liquide, ou le béton haute température et la céramique réfractaire en milieu solide.

Caractéristiques techniques

Milieu de stockage

Le tableau 1 précise la nature de fluide ou solide ainsi que les gammes de températures et les propriétés physico-chimiques associées aux différents milieux de stockage par chaleur sensible utilisant des liquides.

Milieu de stockage	Type de fluide	Gamme de T (°C)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité calorifique (J/kg.°C)
Eau	-	0 -100	1 000	4 190
Eau-Éthylène Glycol 50/50	-	-	1 050	3 470
Caloria HT43	huile	(-10) - 315	-	2 300
Dowtherms	huile	12 - 260	867	2 200
Therminol 55	huile	(-18) - 315	-	2 400
Therminol 66	huile	(-9) - 343	750	2 100
Ethylene Glycol	-	-	1 116	2 382
Hitec	sel fondu	141 - 540	1 680	1 560
Draw salt	sel fondu	220 - 540	1 733	1 550
Lithium	sel liquide	180 -1300	510	4 190
Sodium	sel liquide	100 - 760	960	1 300
Ethanol	liquide organique	jusqu'à 78	800	2 400
Propanol	liquide organique	jusqu'à 97	800	2 500
Butanol	liquide organique	jusqu'à 118	809	2 400
Isobuthanol	liquide organique	jusqu'à 100	808	3 000
Isopentanol	liquide organique	jusqu'à 148	831	2 200
Octane	liquide organique	jusqu'à 126	704	2 400

Tableau 1 : Propriétés des milieux liquides pour le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible – crédit CETIAT

Les contraintes et limitations relatives à l'utilisation de liquides peuvent être évitées par l'emploi de matériaux solides. De plus grands volumes sont cependant nécessaires comparé à l'eau, de par le fait que les solides ont en général une capacité de stockage plus faible.

Les oxydes de magnésium, d'aluminium ou de silicones sont des matériaux réfractaires pouvant également être appropriés pour le stockage par chaleur sensible à haute température.

La liste des propriétés physico-chimiques de divers matériaux est donnée dans le tableau 2 :

Milieu de stockage	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité calorifique x10 ⁽⁻⁶⁾ (J/kg.K)
aluminium	2707	896
oxyde d'aluminium	3900	840
sulfate d'aluminium	2710	750
briques	1698	840
briques de magnésium	3000	1130
béton	2240	1130
fonte	7900	837
fer pur	7897	452
cuivre	8954	383
terre (sèche)	1260	795
sulfate de potassium	1980	670
chlorure de potassium	2660	920
carbonate de sodium	2510	1090
granit	2640	820
carbonate de calcium	2500	900
marbre	2600	800
grès	2200	710

Tableau 2 : Propriétés de milieux solides pour le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible – crédit CETIAT

Systemes

Les paramètres à considérer pour le dimensionnement d'un système de stockage sont les suivants :

- la capacité volumique (en kWh/m³)
- le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le stockage
- la stabilité mécanique et thermique des matériaux
- la réversibilité totale après un grand nombre de cycles
- les pertes thermiques limitées (compacité)
- le coût de l'énergie récupérée (inférieur au prix de l'énergie)

Potentiels d'application

- Stockage pour valorisation de chaleur fatale
- Stockage d'énergie solaire
- Procédés industriels : procédés batch, lissage du décalage entre demande et approvisionnement

Maturité

Les systèmes de stockage à eau chaude sont largement répandus dans l'industrie et le bâtiment.

Concernant l'utilisation de sels fondus leur mise en œuvre impose des contraintes techniques plus importantes. On retrouve la majorité des exemples d'application sur des centrales solaires.

Le stockage sur solide est très souvent utilisé pour des besoins de températures allant jusqu'à 100 °C en association avec des systèmes de chauffage solaire à air. La conception est simple et peu chère. Typiquement les dimensions des pierres varient des 1 à 5 cm. Pour des plus hautes températures, l'utilisation de briques réfractaire est utilisée depuis de nombreuses années dans les fours par exemple.

Enfin des prototypes pour l'utilisation du béton pour le stockage d'énergie à haute température en centrale solaire sont à l'étude.

Stockage utilisant de l'eau

Avantages

- L'eau est non toxique, et peu chère,
- Capacité calorifique et une densité élevées,
- Les échangeurs peuvent être évités si l'eau est utilisée comme fluide caloporteur dans le capteur,
- Charge et décharge du réservoir possible simultanément,
- Régulation d'un système à eau est aisée et flexible.

Inconvénients

- Stratification délicate
- Problèmes de corrosion (pouvant être traités par des additifs chimiques)
- Limitation à une la température opératoire se situant en dessous de 100°C.

Stockage utilisant des liquides autre que l'eau :

Avantages

- Stockage à température élevée densité énergétique faible (de l'ordre de 65 kWh/m³)
- Densité énergétique élevée
- Réduction des volumes de stockage

Inconvénients

- Nécessité d'un fluide de transfert intermédiaire
- Coût des matériaux et échangeurs pouvant être élevé
- Problème de stabilité du produit
- Problème de corrosion
- Contraintes réglementaires liées à l'utilisation des fluides

Stockage utilisant des matériaux solides

Avantages

- Large gamme de température d'utilisation (jusqu'à 1 000 °C)
- Contact direct possible (limitations les coûts liés aux échanges)
- Matériau non toxique

Inconvénients

- Densité énergétique faible (de l'ordre de 15 kWh/m³)
- Volumes importants
- Matériau pouvant se dégrader dans le temps
- Problèmes de dilatation

Stockage par accumulateur de vapeur

Principes

Principe physique

De nombreux procédés industriels requièrent de grandes quantités de vapeur. Cette demande en vapeur se fait généralement sur une pression variant entre 1 et 20 bar, ce qui correspond à des températures de saturation comprises entre 100 et 210 °C. Elle est rarement stable et des fluctuations importantes peuvent avoir lieu (pics de demandes liés aux procédés batch, phase de démarrages, charge de production....).

En pratique il existe deux manières de générer de la vapeur :

- par un apport de chaleur sur de l'eau bouillante, indirectement via un brûleur comme dans une chaudière conventionnelle,
- en réduisant la pression de l'eau stockée à sa température de saturation. Ceci conduit à un excès d'énergie dans l'eau causant la vaporisation de celle-ci.

Ce dernier principe sert de base aux accumulateurs de vapeur.

Quand la demande en vapeur est basse et que la chaudière est capable de générer plus de vapeur que nécessaire, le surplus est injecté dans un volume d'eau stockée sous pression. Au bout d'un temps donné l'eau croît en température et en pression jusqu'à atteindre la température de saturation à la pression de fonctionnement de la chaudière.

La demande va excéder la puissance de la chaudière si :

- une charge est appliquée plus vite que la capacité de réponse de la chaudière,
- une forte demande arrive sur une période plus longue que le fonctionnement normal.

Dans les deux cas il en résulte une chute de pression au sein de l'accumulateur de vapeur et une partie de l'eau chaude stockée se vaporise. La vitesse à laquelle cette vaporisation a lieu dépend de la pression de stockage et du débit requis pour l'approvisionnement du système.

Descriptif

Cet équipement est essentiellement une extension de la capacité de stockage d'une chaudière.

Un accumulateur de vapeur à pression variable consiste en un réservoir sous pression rempli d'eau à 50-90 % dépendamment de l'application.

La vapeur est chargée sous la surface de l'eau par un distributeur équipé d'une série d'injecteurs de vapeur fonctionnant jusqu'à ce que la totalité de l'eau soit à la pression et la température requise.

Le niveau d'eau généralement s'élève et s'abaisse durant les cycles de charge/décharge.

Caractéristiques techniques

La densité énergétique du système est d'environ 20 à 30 kWh/m³ avec une température maximale d'environ 200 °C. Les durées de stockages vont d'une vingtaine de minutes à quelques heures.

Le réservoir (partie la plus chère du système) est dimensionné pour contenir l'eau chaude saturée à la température requise par le process (généralement entre 5 et 30 bar, possible jusqu'à 150 bar).

Le réservoir est généralement cylindrique de diamètre variable et doit être conforme à la directive européenne sur les équipements sous pression.

Les paramètres sont à prendre en compte pour le dimensionnement du système sont :

- un temps suffisamment long doit être disponible dans le procédé entre deux périodes de surcharge pour permettre la recharge du réservoir,
- la demande moyenne doit être inférieure à la puissance de la chaudière, afin que le surplus de vapeur recharge l'accumulateur hors période de pic de demande.
- Une quantité d'eau suffisante doit être stockée pour répondre à la demande en vapeur lors de la décharge. Il faut donc prévoir un volume du réservoir suffisamment important.

- Une vitesse trop importante de décharge risque de produire de la vapeur humide. La vitesse et le débit de vapeur déchargé depuis la surface doivent être inférieurs à une certaine valeur prédéterminée, dépendante de la taille du réservoir et de la surface de liquide.
- La puissance d'évaporation doit être suffisante. Ceci dépend de la pression à laquelle l'eau est stockée lorsque l'accumulateur est complètement chargé (pression de la chaudière), et la pression minimum à laquelle il va fonctionner à la fin de la période de décharge (pression de conception de l'accumulateur). Plus la différence de pression est grande, plus la quantité de vapeur produite sera importante.
- La pression de conception de l'accumulateur doit être supérieure à la pression de distribution de la vapeur en aval.

Maturité

La technologie des accumulateurs de vapeur est ancienne et les principes en sont maîtrisés. Leur utilisation a beaucoup diminué dans l'industrie moderne mais de nombreuses réalisations existent et de nouvelles applications (notamment sur des centrales solaires) ont vu le jour.

Potentiels d'application

Toute application industrielle nécessitant de la vapeur avec une demande non stable dans le temps :

- Industrie agroalimentaires
- Papier/carton
- Chimie/pharmacie
- textile

Avantages

- Réduction de la puissance de dimensionnement de la chaudière (non basé sur les pics de demande)
- Utilisation plus rationnelle des brûleurs
- Pression et qualité de la vapeur constantes
- Réduction de la fréquence de commutation des générateurs de vapeur
- Réduction de l'usure
- Réduction de la consommation d'énergie

Inconvénients

- Encombrement
- Sécurité et maintenance des équipements sous pressions

Offre constructeurs

Liste non exhaustive

BOSCH

BYWORTH BOILER

ATTSU TERMICA

