

DE L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE  
VALORISATION DES REJETS ÉNERGÉTIQUES

# VAREdia

## Analyse technico-économique des solutions de récupération de chaleur identifiées



**Objectif :**

**Coupler les résultats des deux phases précédentes afin de juger de la pertinence technique et économique des solutions de récupération de chaleur.**

Les phases précédentes ont permis de mettre en exergue différents rejets et besoins thermiques dans l'industrie agro-alimentaire. Une analyse a amené à connecter certains besoins avec certains rejets, en associant une technologie : PAC, CMV, échangeur, thermo-compression, stockage thermique, etc. Parmi ces couples rejets/besoins, les différents centres techniques ont mis en avant trois à quatre couples présentant *a priori* un intérêt particulier en termes d'économie d'énergie et de reproductibilité à d'autres secteurs de l'IAA. L'objectif de cette phase est alors d'évaluer la faisabilité et la rentabilité des solutions de récupération de chaleur liées à ces couples rejets/besoins mis en avant.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION .....	4
Energie primaire/secondaire/finale .....	5
Paramètres généraux .....	7
<i>Coût de l'énergie</i> .....	7
<i>Facteur émission CO<sub>2</sub></i> .....	7
<i>Valeurs retenues</i> .....	8
<i>Rendement chaudière</i> .....	9
PAC .....	10
TAR .....	10
Echangeur .....	11
CEE et FONDS CHALEUR .....	13
ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE.....	14
Corps gras (ITERG).....	15
<i>Récupération sur buées pour préchauffage graine</i> .....	16
<i>Récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière</i> .....	18
Alcool (UNGDA).....	26
<i>Valorisation vapeurs alcooliques pour production de vapeur de process</i> .....	27
Produits laitiers (ACTALIA) .....	29
<i>Récupération sur groupes froids</i> .....	29
<i>Recupération sur compresseurs d'air</i> .....	40
<i>Economiseur sur chaudières</i> .....	48
conserves (CTCPA).....	50
<i>Autoclavage</i> .....	51
SYNTHESE .....	53
ANNEXES .....	55

L'analyse technico-économique consiste à calculer pour les solutions de récupération de chaleur préconisées :

- Les économies d'énergie générées (primaire/finale et primaire fossile) ;
- Les économies financières réalisées (différence du coût d'exploitation entre la solution initiale et la nouvelle solution) ;
- Le temps de retour sur investissement (TRI) quand l'investissement est disponible, avec et sans prime CEE ;
- La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> attendue.

Une solution d'efficacité énergétique peut consommer un autre type d'énergie que celle de la solution initiale. Par exemple, dans l'industrie une PAC électrique va souvent venir en substitution d'une partie de la production de chaleur d'une chaudière fonctionnant au gaz. Dans ce cas, il faut comparer les consommations énergétiques sur une même référence, l'énergie électrique provenant d'une transformation d'une autre forme d'énergie.

Dans un premier temps, les paramètres permettant de mener cette analyse seront présentés (paragraphes énergie primaire/secondaire/finale et paramètres généraux). Ensuite, l'analyse technico-économique sera appliquée aux couples rejet/besoin les plus pertinents et identifiés par les Instituts techniques. Il convient de noter que certaines solutions de récupération envisagées sont spécifiques au secteur qui a identifié le couple rejet/besoin mais que d'autres solutions peuvent être appliquées dans d'autres secteurs agroalimentaires. Les couples étudiés sont les suivants :

1. la récupération d'énergie sur les buées des cuiseurs à graines (colza) pour le préchauffage des graines (secteur des corps gras),
2. la récupération d'énergie sur les tours aéroréfrigérantes (TAR) pour le préchauffage des eaux d'appoint des chaudières vapeurs (secteur des corps gras mais applicable à d'autres IAA),
3. la vaporisation des vapeurs alcooliques pour la production de vapeur utilisables sur les procédés de production (secteur de la distillerie d'alcool),
4. la récupération d'énergie sur les groupes froid (secteur des produits laitiers mais applicable à d'autres IAA),
5. la récupération d'énergie sur les compresseurs d'air (secteur des produits laitiers mais applicable à d'autres IAA),
6. la mise en place d'économiseur sur les chaudières vapeur (secteur des produits laitiers mais applicable à d'autres IAA),
7. la récupération de chaleur sur les eaux de l'autoclave lors du refroidissement via un échangeur (secteur des conserves et des plats préparés).

## ENERGIE PRIMAIRE/SECONDAIRE/FINALE

L'énergie primaire est l'énergie brute, non transformée. Elle a pour source le rayonnement solaire, les déplacements du vent ou de l'eau, le pétrole, le charbon, le gaz naturel, l'uranium...

En transformant l'énergie primaire, on obtient de l'énergie secondaire : c'est le cas du pétrole brut transformé en fioul ou en essence, du gaz, de l'énergie nucléaire, solaire ou éolienne transformée en électricité.

L'énergie finale, qu'elle soit mécanique (transports...), électrique (appareils électriques, éclairage...) ou thermique (chauffage...) est celle fournie aux utilisateurs.

L'énergie utile est, en bout de course, celle dont profitent réellement les consommateurs après la dernière transformation par leurs appareils. C'est par exemple la lumière d'une lampe, la chaleur fournie par une chaudière, le déplacement d'une voiture...

Entre l'énergie primaire et l'énergie utile, il y a en moyenne 62 % de pertes (lors de la transformation, du transport et de l'utilisation de l'énergie).



Figure 1 : les différentes formes d'énergie (source : ADEME)

L'énergie électrique est quasi inexistante à l'état naturel. Elle est rendue disponible suite à un processus de production d'électricité, grâce à la transformation subie par une source d'énergie primaire. Comme elle n'est pas directement utilisable à l'état naturel, le calcul de son coefficient d'énergie primaire est plus compliqué. En effet, l'électricité provient de sources diverses. Pour calculer le coefficient d'énergie primaire à appliquer à l'électricité, on a pris en compte les différentes sources de production de cette énergie.

Lorsque l'électricité est produite à partir de barrage hydrauliques et des autres sources d'énergie renouvelables, toute l'énergie primaire est transformée en électricité, on applique donc un coefficient de 1. Mais ces sources de production de l'électricité ne représentent un part que de 15 % de l'électricité en France.

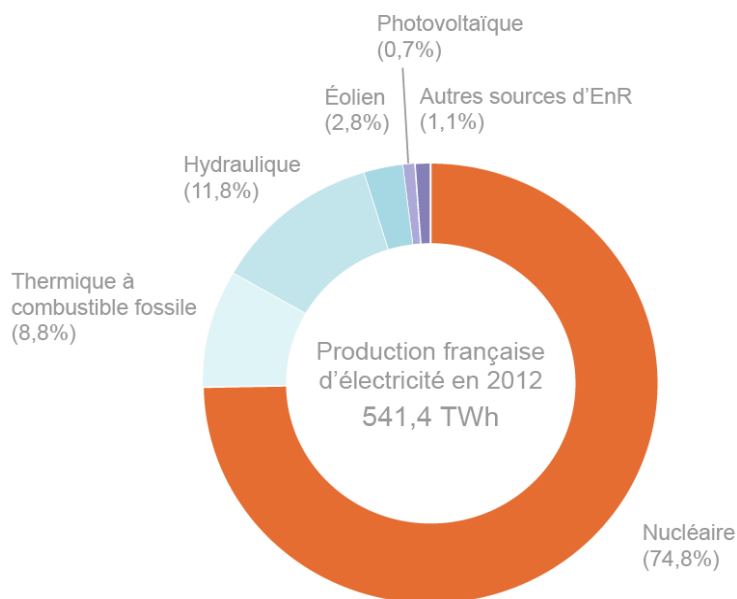


Figure 2 : bouquet énergétique en 2012 (source RTE)

L'électricité produite à partir de centrales thermiques représente près de 10 % de la production française. Le rendement des centrales thermiques françaises dépend du combustible et de la génération de centrales. On retient une valeur moyenne de 38 % pour le rendement des centrales thermiques, considérant que sur l'énergie thermique produite par la combustion des sources primaires, seuls 38 % sont récupérés à la fin sous forme d'énergie électrique.

L'électricité produite à partir de centrales nucléaires représente 75 % de la production française. Le rendement retenu pour les centrales nucléaires est de 33 %. On considère ainsi que 33 % de l'énergie thermique dégagée lors de la fission d'atomes dans le réacteur est effectivement récupérée sous forme d'électricité.

Pour former le coefficient d'énergie primaire de l'électricité, on fait une moyenne pondérée des rendements par moyen de production. Les pertes du transport d'électricité (estimées à 5 %) sont également prises en compte. A la fin du calcul, **le coefficient d'énergie primaire pour l'électricité est de 2,58**. C'est-à-dire qu'on considère qu'un joule d'électricité consommé correspond à la consommation de 2,58 joules d'énergie primaire.

Ce chiffre de 2,58 est celui qui est communément accepté pour la France. Il prend en compte le mix de production d'électricité en France. Il sera différent pour un autre pays qui aurait un mix énergétique différent et des rendements moyens de centrales de production d'électricité différents.

Les derniers calculs effectués par l'organisme de statistique européen Eurostat indiquent que le coefficient de conversion de l'énergie électrique finale en énergie primaire était de 2,2, pour l'ensemble des pays européens, en 2010. Cette valeur est inférieure (donc plus favorable) à celle utilisée dans la directive européenne sur la performance énergétique dont la valeur est de 2,5 ou dans la réglementation thermique 2012 dont la valeur est de **2,58**.

**L'énergie primaire d'origine fossile** représente environ 10 % de la production électrique totale. La consommation d'énergie fossile primaire associée à une consommation électrique est donc calculée de la manière suivante :

$$\text{Energie primaire d'origine fossile} = \text{consommation électrique} * 10\% * 2,58$$

## PARAMETRES GENERAUX

**Le terme TRI fera ici systématiquement référence au Temps de Retour sur Investissement.** Le Taux de Rentabilité Interne, peut également être nommé TRI mais ce critère économique n'est pas utilisé ici. De la même manière, la Valeur Actualisée Nette (VAN) n'est pas calculée. Ces deux critères économiques intéressent plutôt des investisseurs. Les critères regardés en priorité par les industriels sont le coût d'investissement, les économies financières annuelles et le temps de retour sur investissement.

**Une solution technologique sera jugée pertinente si le TRI est inférieur à 3 ans.**

Les TRI calculés sont bruts (sans actualisation, celle-ci a un impact très faible pour des TRI courts qui sont généralement rencontrés lorsqu'une solution est pertinente).

Pour réaliser l'analyse technico-économique des différentes solutions, il faut fixer un certain nombre de paramètres.

## COÛT DE L'ÉNERGIE

Le tableau ci-dessous présente le coût du gaz et de l'électricité pour l'industrie de moyenne taille en France.

Tableau 1 : coût de l'énergie (€/MWh) dans les industries de moyenne taille en France  
(source : Eurostat <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/main-tables>)

Prix (€/MWh)	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Gaz naturel	35,1	32,2	35,5	37,8	39,7	37,3
Electricité	66,7	68,7	72,2	80,9	77,1	74,3

Les prix du gaz naturel pour les consommateurs industriels sont définis de la façon suivante : prix hors taxes national moyen en Euro par MWh au premier semestre de chaque année pour des industriels de taille moyenne (bande de consommation I3 correspondant à une consommation annuelle de 10 000 à 100 000 GJ)

Les prix de l'électricité pour les consommateurs industriels sont définis de la façon suivante : prix hors taxes national moyen en Euro par MWh au premier semestre de chaque année pour des consommateurs industriels de taille moyenne (bande de consommation Ic correspondant à une consommation annuelle de 500 à 2 000 MWh).

## FACTEUR EMISSION CO<sub>2</sub>

### ELECTRICITE

En France, le contenu en CO<sub>2</sub> varie de manière importante en fonction des heures et des saisons, tandis que dans les autres pays européens, cette dispersion est limitée dans la mesure où la production d'électricité à partir de centrales thermiques à combustibles fossiles représente une partie importante de la production.

De plus, dans la mesure où les moyens émetteurs (centrales thermiques à flamme) fonctionnent en « terme de bouclage » de l'équilibre offre-demande France, la moyenne nationale diffère d'une année à l'autre en fonction des conditions de température et des caractéristiques de fonctionnement du parc.

En conséquence, l'approche, par un seul indicateur, du contenu CO<sub>2</sub> moyen du kWh français s'est révélée insuffisante, et la volonté d'un certain nombre d'acteurs a été d'utiliser des **contenus CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub>/kWh) différenciés par usage.**

	Reference ( Valeur moyenne)	A titre indicatif : plage de variation (hors pertes - 6g)
Chauffage	210	183 à 226
Eclairage résidentiel	115	103 à 112
Eclairage public	97	90 à 92
Usages résidentiels : cuisson	77	66 à 73
Usages résidentiels : froid	61	46 à 59
Usages industriels	57	43 à 57
Usages résidentiels : ECS	56	39 à 55
Usages résidentiels : autres	55	39 à 53
Usages tertiaires et autres	55	39 à 53
Transports	53	34 à 53

Tableau 2 : valeurs des contenus en gramme de CO<sub>2</sub> par kWh pour différents usages de l'électricité (source : ADEME 2005)

## GAZ NATUREL

Le tableau suivant présente les valeurs du contenu CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub>/kWh) de différents combustibles.

	kgCO <sub>2</sub> /GJ	PCI (GJ/tonne)	kgCO <sub>2</sub> /tep (PCI)	gCO <sub>2</sub> /kWh
Essence	73	44	3 066	264
Gazole/FOD	75	42	3 150	271
Fuel lourd	78	40	3 276	282
Gaz naturel	57	49,6	2 394	206
Kérosène	74	44	3 108	267
Charbon	95	26	3 990	343
GPL	64	46	2 688	231
Déchets ménagers	41,3	8,8	1734,6	149

Tableau 3 : valeurs des contenus en CO<sub>2</sub> par kWh des différents combustibles (source : ADEME)

Le gaz naturel est le combustible le plus fréquent dans l'industrie. Les réductions d'émission de CO<sub>2</sub> potentielles des solutions de récupération de chaleur seront calculées uniquement en comparaison d'une solution initiale utilisant le gaz naturel.

## VALEURS RETENUES

Les valeurs retenues sont présentées dans le tableau suivant :

	Electricité	Gaz naturel
Coût (€ / MWh)	75	35
Facteur émission (kg CO <sub>2</sub> / MWh)	57	206

Tableau 4 : paramètres généraux utilisés pour l'analyse technico-économique – coût énergie et facteur émission CO<sub>2</sub>

Comme on peut le voir dans le tableau 1, le coût du gaz naturel est supérieur à 35 €/MWh depuis 2011 mais le tableau concerne les moyennes industries. Dans les industries de plus grande taille, le coût est plus proche des 35 €/MWh, d'où l'utilisation de ce chiffres pour les calculs.



## RENDEMENT CHAUDIERE

Lorsqu'une PAC ou un échangeur est mis en place, la production ou l'échange de chaleur va venir en substitution d'une partie de la production de la chaudière. Le rendement de cette dernière doit alors être fixé pour comparer la solution initiale et la nouvelle solution. Celui-ci peut être très variable d'une installation à une autre : présence d'un économiseur, condenseur, et/ou autres mesures d'efficacité énergétique spécifiques aux chaudières. Le graphe suivant montre les rendements usuels de différentes chaudières industrielles :

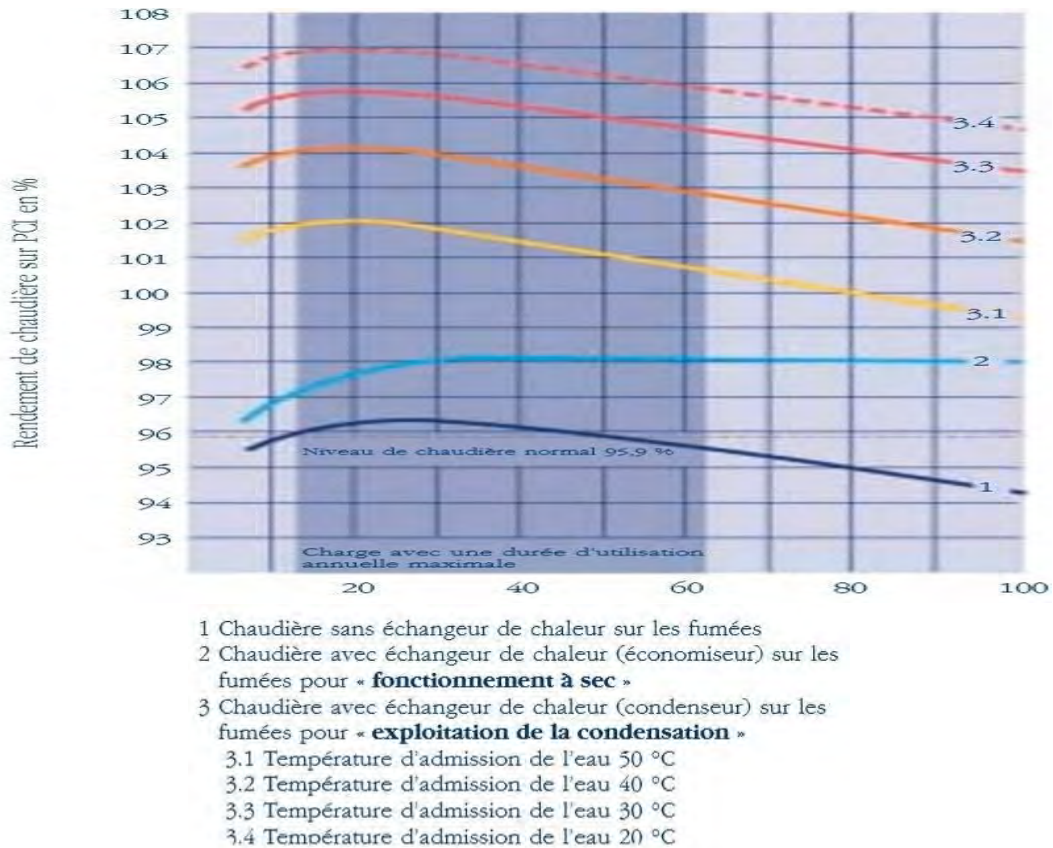


Figure 3 : graphe montrant le rendement de plusieurs types de chaudière en fonction de sa charge

Pour les chaudières de puissance comprise entre 400 kW à 20 MW, les articles [R. 224-20](#) à [R. 224-30](#) du code de l'environnement fixent des rendements énergétiques minimaux. Par ailleurs, ils imposent à l'exploitant la mise en place d'appareils de contrôle permettant de mesurer le rendement caractéristique de ces chaudières ainsi que l'appréciation de la qualité de la combustion.

Puissance (P) en MW	Fioul domestique (%)	Fioul lourd (%)	Combustible gazeux (%)	Combustible minéral solide (%)
0,4 < P < 2	85	84	86	83
2 ≤ P < 10	86	85	87	84
10 ≤ P < 50	87	86	88	85

Tableau 5 : rendements minimaux réglementaires en fonction de la puissance et du combustible

Les pourcentages fixés aux [articles R. 224-23](#) et [R. 224-24](#) sont réduits de :

- 7 points pour les chaudières à fluide thermique autre que l'eau ;

- 2 points pour les chaudières d'une puissance supérieure à 2 MW produisant de la vapeur d'eau ou de l'eau surchauffée à une température supérieure à 110° C ;
- 5 points pour les chaudières d'une puissance inférieure ou égale à 2 MW produisant de la vapeur d'eau ou de l'eau surchauffée à une température supérieure à 110° C.

La figure 4 présente le rendement des chaudières entre l'entrée et la sortie. Dans ce rendement n'est pas compris les pertes du réseau (purgeur, pertes thermiques) ainsi que le taux de retour condensat. En pratique, les rendements des chaudières industrielles si on considère le système global sont 10 % inférieurs aux rendements des chaudières seules.

Nous fixons alors une valeur moyenne, représentative des chaudières industrielles :

<b>Rendement chaudière / PCI (%)</b>
<b>85</b>

Tableau 6 : paramètres généraux – rendement Chaudière

#### PAC

Plusieurs pistes de récupération de chaleur identifiées mettent en jeu des pompes à chaleur. Le tableau suivant présente les paramètres liés aux PAC. L'investissement dépend de la puissance thermique produite au condenseur (Pchaud).

Puissance (P) en MW	Investissement (€ / kW chaud installé)	Durée de vie PAC (ans)	Coût maintenance PAC (% de l'investissement)	Coût installation PAC (% de l'investissement)
<b>0 &lt; P &lt; 0,5</b>	<b>450 - 700</b>	<b>15</b>	<b>4</b>	<b>50</b>
<b>0,5 &lt; P &lt; 1</b>	<b>320 - 550</b>			
<b>1 &lt; P &lt; 4</b>	<b>240 - 420</b>			

Tableau 7 : paramètres généraux – PAC

#### TAR

Dans plusieurs cas mis en avant par les centres techniques, la chaleur est à récupérer sur des tours aéro-réfrigérantes (TAR). N'ayant pas toujours le régime de température de ces TAR ni la technologie, nous prendrons un régime typique rencontré dans l'industrie.

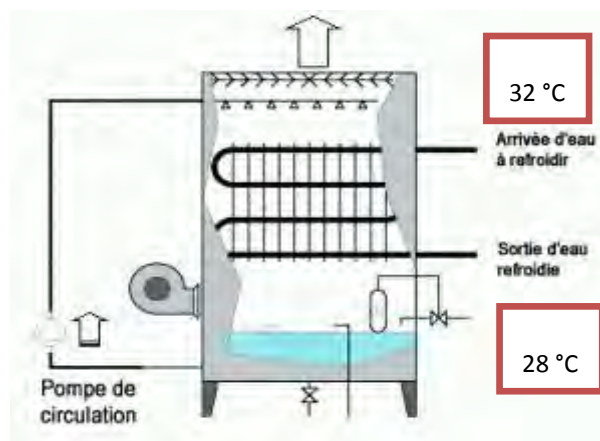


Figure 4 : régime de température classique d'une TAR humide en circuit fermé

Le fluide thermique généralement utilisé dans ce genre de système de refroidissement est de l'eau glycolée. **La concentration en glycol est fixée à 20 %.**

Récupérer de l'énergie en amont d'une TAR va soulager son fonctionnement. Elle aura ainsi une consommation énergétique amoindrie (pompes, ventilateurs) ainsi qu'une diminution de la consommation d'eau (pour les TAR humides). **La réduction de ces consommations doit être prise en compte dans les calculs d'économies (énergie et financières) et réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.** Nous présentons en annexe les consommations spécifiques de différentes technologies de systèmes de refroidissement. La consommation spécifique des TAR est fixée à **23 kWe/MWth** évacués pour les TAR humides (ventilateurs et pompes) et **20 kWe/MWth** pour les TAR sèches (ventilateurs). Le rendement des moteurs électriques pour le fonctionnement des TAR est fixé à 98 %.

La consommation en eau des TAR humides étant très variables, les économies financières dues à une réduction de consommation en eau ne seront pas calculées. Elles sont cependant a priori peu importantes.

## ECHANGEUR

Pour calculer les échangeurs (puissance échangée, débits, températures, surface d'échange, coût), **une efficacité de 80 %** sera fixée (ou les paramètres seront déterminés de manière à trouver une efficacité de 80 %). L'efficacité de l'échangeur correspond au rapport de la puissance thermique réellement échangée à la puissance d'échange maximum théoriquement possible, avec les mêmes conditions d'entrées des fluides (nature, débit,...) dans l'échangeur.

Cette valeur souvent rencontrée, permet d'obtenir de bons échanges thermiques sans que la surface et le coût soient trop importants.

Les coûts d'exploitation des échangeurs (maintenance, pompes de circulation) seront négligés.

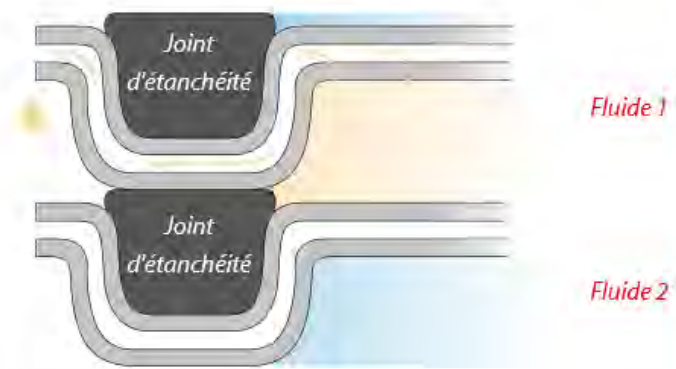
**La technologie d'échangeurs à plaques et joints** sera choisie dès qu'elle est envisageable (basses pressions et basses températures), car ce type d'échangeur présente d'excellents coefficients d'échanges, une grande compacité et une facilité de nettoyage appréciée, notamment dans le secteur de l'agro-alimentaire.

Lorsqu'une grande étanchéité est exigée entre les flux de l'échangeur, des échangeurs à plaques soudées ou des échangeurs à double paroi peuvent être envisagés. Ces technologies sont plus coûteuses.

**Échangeurs de chaleur à double parois : aucun risque de contamination grâce aux doubles parois.**

Les plaques sont soudées ensemble par paires autour des orifices. Cette conception nécessite une plaque supplémentaire par canal de circulation.

En cas de fuite d'une plaque ou d'un joint d'étanchéité, les fluides primaires et secondaires ne se mélangent pas. La fuite sera en outre visible depuis l'extérieur. Les échangeurs de chaleur sont conformes aux directives relatives à l'eau potable.



**Même si le fluide 1 fuit, il ne se mélange pas au fluide 2.**

Figure 5 : principe d'un échangeur à plaques à double parois (source : Danfoss)

Le coût des échangeurs sera calculé avec l'outil du Greth Echtherm®. Ce coût sera comparé au calcul réalisé avec la méthode matches (<http://www.matche.com/equipcost/Exchanger.html>). Le coût des échangeurs dépend fortement des matériaux. Nous prendrons l'INOX comme matériau de référence.

**L'encrassement :**

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. Les coûts liés à l'encrassement des échangeurs intègrent les dépenses liées, d'une part, au dimensionnement (surdimensionnement de la surface d'échange à mettre en œuvre, 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 %.

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. En effet, des arrêts non planifiés de l'installation peuvent mener à une perte complète de production qui représente à son tour un manque à gagner pour les industriels. 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'œuvre 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 supplémentaires à celles liées à la main d'œuvre.

**Les surcoûts engendrés par les phénomènes d'encrassement ne seront pas pris en compte ici**, car ils nécessitent des études spécifiques poussées que nous ne pouvons faire pour tous les cas d'étude identifiés.

Un **certificat d'économies d'énergie** est une mesure politique nationale qui permet d'encourager les économies d'énergie. La mise en place des CEE est liée à une volonté de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> nationales tout en limitant les dépenses publiques, en sensibilisant et responsabilisant la société civile.

La loi de programme du 13 juillet 2005 impose aux « personnes morales qui vendent de l'électricité, du gaz, de la chaleur, du froid [...] ou du fioul aux consommateurs finaux » et dont les ventes annuelles excèdent un seuil fixé par décret des obligations de réalisation d'économies d'énergie chez leurs clients sur une période donnée. Le principe est d'obliger ces acteurs (les « obligés ») à réaliser des économies d'énergie et d'encourager les autres acteurs (les « non-obligés ») par l'obtention d'un certificat. Les obligés peuvent soit réaliser eux-mêmes les mesures d'économie d'énergie, soit acheter des certificats aux non-obligés, soit payer une surtaxe à l'Etat. La pénalité est fixée à 20 €/MWh cumac (cumulé actualisé) maximum et les certificats sont donc négociables sur le marché des certificats entre 0 et 20 €/MWh cumac. **Nous calculerons les primes CEE pour des montants de certificat de 2,3 et 4 €/MWh, valeurs moyennes que l'on retrouve sur le marché des CEE.**

Des fiches standards donnant le calcul des GWh cumac existent pour différentes solutions d'efficacité énergétique. Lorsque la fiche n'est pas applicable, il est tout de même possible de bénéficier d'une prime CEE en réalisant une opération spécifique. **Le calcul des cumac a été réalisé avec les fiches de la période n°2.**

**Lorsqu'une solution présente un TRI inférieur à 3 ans, il n'est pas possible de toucher une prime CEE pour une opération spécifique.**

Le fonds chaleur est une aide à l'investissement dont les objectifs sont de :

- Financer les projets de production de chaleur à partir d'énergies renouvelables et de récupération d'énergie (EnR&R) ainsi que les réseaux de chaleur liés à ces installations. Ces aides financières permettent à la chaleur renouvelable d'être compétitive par rapport à celle produite à partir d'énergies conventionnelles ;
- Favoriser l'emploi et l'investissement dans ces différents secteurs d'activité ;
- Expérimenter de nouveaux champs (thématique émergente, méthodologie) pour une meilleure mobilisation des EnR, en vue de leur généralisation.

La prime CEE et la subvention fonds chaleur ne sont pas cumulables. L'investisseur doit choisir entre les deux possibilités. **Les aides au financement dispensées dans le cadre du fonds chaleur ne sont pas évaluées ici.** Elles peuvent couvrir entre 20 et 40 % de l'investissement initial.

## ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE

Suite aux audits énergétiques réalisés dans le cadre du projet, chaque centre technique a mis en avant plusieurs pistes d'amélioration d'efficacité énergétique, en identifiant une source (chaleur fatale) et un besoin pouvant être potentiellement assouvi par cette source. Une fois la technologie de récupération de chaleur identifiée, une analyse technico-économique de cette technologie est réalisée.

L'analyse technico-économique consiste à calculer pour les solutions de récupération de chaleur mises en avant par les centres techniques :

- Les économies d'énergie générées (primaire/finale et primaire fossile) ;
- Les économies financières réalisées (différence du coût d'exploitation entre la solution initiale et la nouvelle solution) ;
- Le temps de retour sur investissement (TRI) qui nécessite d'avoir l'investissement de la solution (pas toujours disponible) avec et sans prime CEE ;
- La réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

CORPS GRAS (ITERG)

Le tableau suivant présente les couples rejets/besoins ainsi que la technologie à étudier pour le secteur des corps gras :

Process	Atelier (préciser si process ou utilité)	Rejet/ Ressource	Tinitiale du rejet	Tfinale du rejet	Besoin	Technologie identifiée	Tinitiale du besoin	Tfinale du besoin	Fluide	Débit
			°C	°C			°C	°C		Kg/h
Trituration des graines	Cuisson des graines	Buées des cuisseurs + Condensats de cuisson	100		Pré- cuisson des graines	<b>Echangeur SOLEX</b>	20	50	Vapeur d'eau Solide	
Raffinage huile	Désodorisation	TAR (refroidissem ent de l'huile désodorisée)			Eau d'appoint de la chaudière	<b>Echangeur</b>	14	28	Eau	3890
Raffinage huile	Désodorisation	TAR (refroidissem ent de l'huile désodorisée)			Eau d'appoint de la chaudière	<b>Pompe à chaleur</b>	14	45	Eau	3890
Raffinage huile	Désodorisation	TAR (refroidissem ent de l'huile désodorisée)			Eau d'appoint de la chaudière	<b>Pompe à chaleur HT</b>	14	55	Eau	3890

Tableau 8 : couple besoins/ressources retenus dans le secteur des corps gras

**Technologie identifiée : échangeur Solex**

Un échangeur de type technologie Solex permet de préchauffer les graines en valorisant les buées sortant des cuiseurs. Il pourrait remplacer les précuiseurs (utilisant de la vapeur produite à partir de gaz naturel) utilisés pour la précuisson des graines de colza.

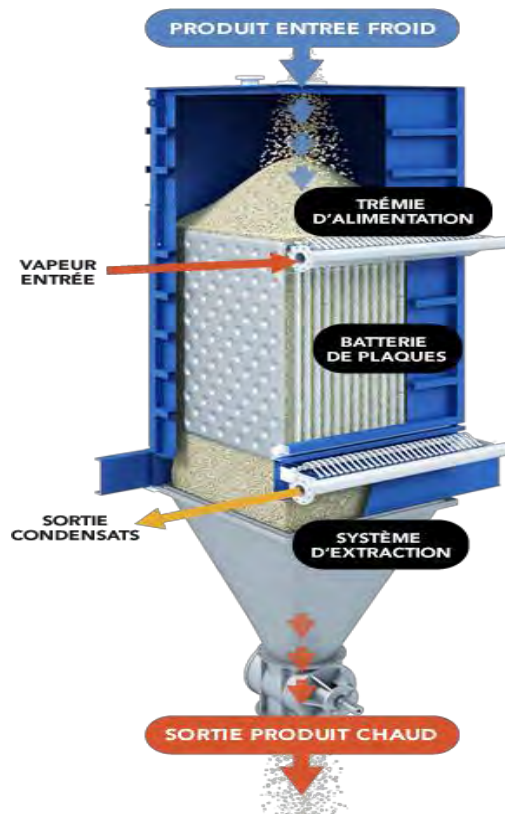


Figure 6 : dessin 3D d'un échangeur Solex (source : Solex)

Les graines entrent à une température de 20°C pour être préchauffées à 50°C environ. Le Solex remplace le précuiseur (physiquement). Cependant, l'énergie utilisée à deux sources : la récupération de chaleur et la vapeur. La récupération de chaleur peut être faite sur les condensats de cuisson (condensat de vapeur de la cuisson) et les buées de cuisson. La vapeur est principalement utilisée lors du démarrage de l'installation, quand le cuiseur (qui est la source d'énergie renouvelable) n'est pas encore en marche ou est en phase de démarrage. La part de vapeur pendant le « fonctionnement normal » dépend de quelles sources d'énergie sont récupérées (condensats et/ou buées). Carré (2012)<sup>1</sup> estime le gain de vapeur à 26 kg/tonne de graine alors qu'il faut 37kg de vapeur/tonne de graine en temps normal. Il resterait donc 11 kg de vapeur (solution sans récupération des buées).

Pour calculer les économies d'énergie réalisables par la mise en place de cette technologie, il faut connaître la puissance nécessaire pour chauffer les graines ( $P = mCp\Delta T$ ). Celle-ci induit un certain débit de vapeur dont la production dans la chaudière nécessite une puissance thermique apportée par la combustion du gaz naturel

<sup>1</sup> Carre P. Recovery of low temperature heat in oil mills. OCL 2012; 19(6): 324-331.



(rendement de 85 %). Nous disposons ici de données d'industriels concernant le débit de vapeur nécessaire au préchauffage d'une tonne de graine. Cette donnée nous évite de prendre certaines hypothèses qui peuvent amener à des écarts importants avec la réalité (Cp des graines, chaleur latente de vaporisation de l'eau qui dépend de la pression et température qui ne sont pas connues ici).

Le besoin pour le préchauffage des graines est de 37 kg de vapeur par tonne de graine. Si la récupération de chaleur permet de couvrir l'ensemble des besoins de préchauffage, les économies en gaz et financières sont les suivantes :

Débit de graine	Débit de vapeur nécessaire	Gaz économisé			Réduction émissions CO <sub>2</sub>	Investissement	TRI
		tonnes/h	tonnes/h	MW			
0,1	0,004	0,003	28	972 €	6		
1	0,037	0,035	278	9 718 €	57		
50	1,850	1,735	13882	485 884 €	2860		
77	2,849	2,672	21379	748 261 €	4404	2 500 000 €	3,3
100	3,700	3,471	27765	971 768 €	5720		
150	5,550	5,206	41647	1 457 652 €	8579		

Tableau 9 : ITERG, analyse économique mise en place de la solution SOLEX

**N'ayant pas de débit du besoin (graine)** , nous avons pris les débits situés dans la gamme du fournisseur de la solution Solex : 100 à 150 000 kg/h.

#### COMPARAISON SOLEX AVEC PRÉ-CUISEUR GAZ

##### Pré-cuiseur gaz :

La récupération des condensats de cuisson avec l'échangeur Solex permet une économie de vapeur de 26 kg/t de graine est possible par rapport à un pré-cuiseur classique à gaz. Les calculs d'économies de gaz et donc d'économies financières sont présentés dans le tableau suivant.

Débit de graine	Débit de vapeur nécessaire	Gain de vapeur	Gaz économisé			Réduction émissions CO <sub>2</sub>	Investissement	TRI
			tonnes/h	tonnes/h	tonnes/h			
0,1	0,004	0,003	0,002	20	683 €	4		
1	0,037	0,026	0,024	195	6 829 €	40		
50	1,850	1,300	1,219	9755	341 432 €	2010		
77	2,849	2,002	1,878	15023	525 805 €	3095	2 500 000 €	4,8
100	3,700	2,600	2,439	19510	682 864 €	4019		
150	5,550	3,900	3,658	29266	1 024 296 €	6029		

Tableau 10 : ITERG, analyse économique de la mise en place de la solution SOLEX / pré-cuiseur gaz

Ce calcul ne tient pas en compte les consommations d'électricité qui peuvent être différentes entre le pré-cuiseur à gaz classique et le solex. Ces consommations sont négligeable fassent aux consommations de vapeur.

Aucune valeur n'est fournie pour une solution qui permettrait de récupérer les condensats de vapeur et les buées de cuisson. Aucune simulation d'économies financière n'est réalisée.

## COMMENTAIRES

La mise en place de l'échangeur Solex a été identifiée sur 3 sites, pour la précuisson du colza.

Lorsque les condensats et les buées des cuiseurs sont valorisés en tant que vapeur de chauffe pour le préchauffage des graines, les économies de vapeurs permettent de s'approcher d'un TRI de 3 ans (tableau 9) (nous disposons du montant de l'investissement que pour une valeur de débit de graine, dimensionnant l'échangeur).

Par rapport à un pré-cuiseur à gaz, le TRI de la mise en place de l'échangeur solex est de 4,8 ans pour le cas où nous disposons de l'investissement (tableau 10). Cette valeur élevée peut freiner les industriels à investir dans le cadre d'un changement de matériel.

## RÉCUPERATION SUR TAR POUR PRÉCHAUFFAGE EAU APPOINT CHAUDIÈRE

### Technologie identifiée : échangeur seul ou échangeur + PAC

#### Situation initiale :

Plusieurs TAR sont utilisées sur les sites de production d'huile, notamment pour refroidir les huiles raffinées après désodorisation et avant stockage. Un système de récupération de chaleur pourrait être mis en place pour préchauffer l'eau d'appoint de la chaudière. La source de chaleur (TAR) et le besoin (chaudière) sont en fonctionnement en même temps sur les sites de production d'huile.

N'ayant pas les températures de régime de la TAR, nous prendrons pour l'eau un régime classique : 32 °C pour l'aller et 28 °C pour le retour.

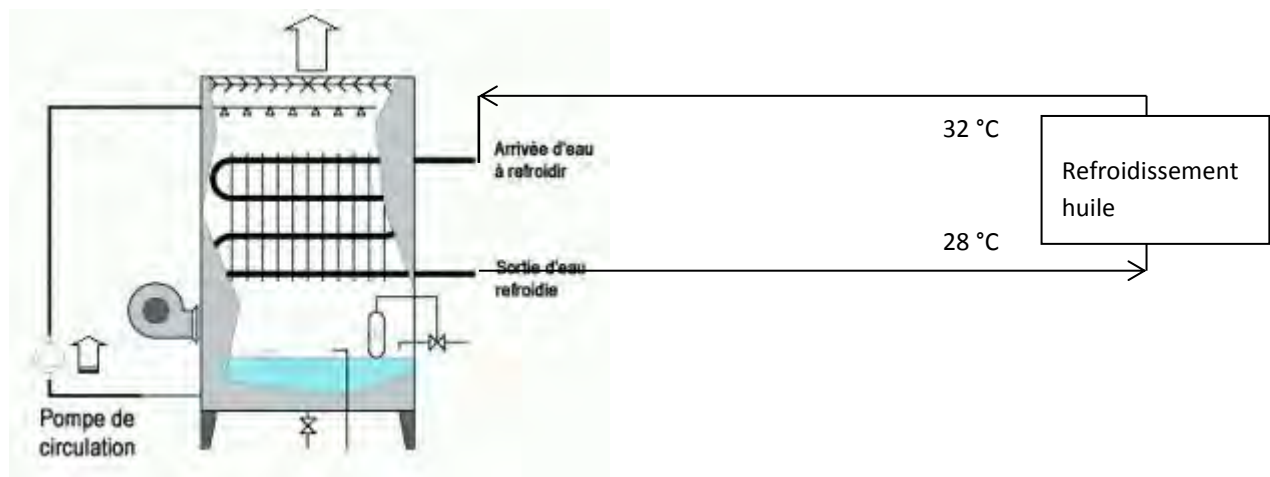


Figure 7 : schéma de principe de la récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint Chaudière : situation initiale

La puissance de refroidissement nécessaire n'est pas donnée. Elle n'est cependant pas indispensable pour calculer les économies d'énergie. En effet, celles-ci sont liées à la puissance du besoin à chauffer (eau appoint chaudière).

#### Solution de récupération :

Il serait possible de récupérer de l'énergie sur les TAR pour le préchauffage de l'eau d'appoint des chaudières. Deux solutions ont été envisagées :

- un système de récupération avec un échangeur seul ;
- un système de récupération avec un échangeur couplé à une pompe à chaleur (PAC).

**Note importante :** les industriels ont souvent mis en place un économiseur sur les fumées de chaudière qui permet le préchauffage de l'eau d'appoint. Un condenseur sur les fumées est une autre solution de récupération permettant de préchauffer l'eau d'appoint de la chaudière. Cette technologie est à mettre en place en priorité, avant de regarder le potentiel d'un échangeur ou PAC sur une TAR, car elle énergétiquement plus intéressante. Cependant cette solution s'avère rentable quand le taux de retour de condensat du procédé est faible (< 20 %). On retrouve cette valeur dans des procédés très spécifiques, dans l'industrie en général, le taux de retour de condensat est en moyenne autour de 70 %. En effet, un taux de retour de condensat fort entraîne une température élevée de l'eau dans la bûche alimentaire. De ce fait, peu d'énergie est nécessaire pour maintenir cette bûche à la température souhaitée. Dans ce cas, un système de récupération de chaleur ne permet pas de faire de grandes économies d'énergie et est donc difficile à rentabiliser.

#### ECHANGEUR SEUL

L'eau d'appoint de la chaudière est préchauffée par un échange avec l'eau de la TAR.

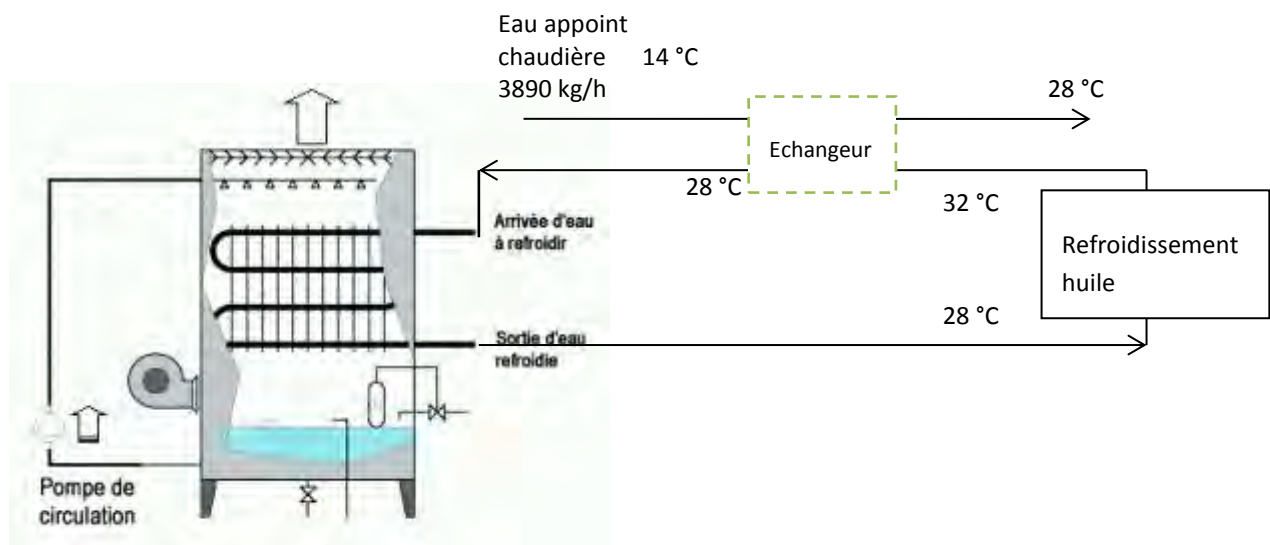


Figure 8 : schéma de principe de la récupération sur TAR avec échangeur pour préchauffage eau appoint Chaudière

En dimensionnant l'échangeur de manière à s'approcher d'une efficacité de 80 % (valeur usuelle), on peut calculer les températures de sortie des deux fluides de l'échangeur, ainsi que l'écart moyen de température, qui va permettre de calculer la surface d'échange nécessaire et le coût.

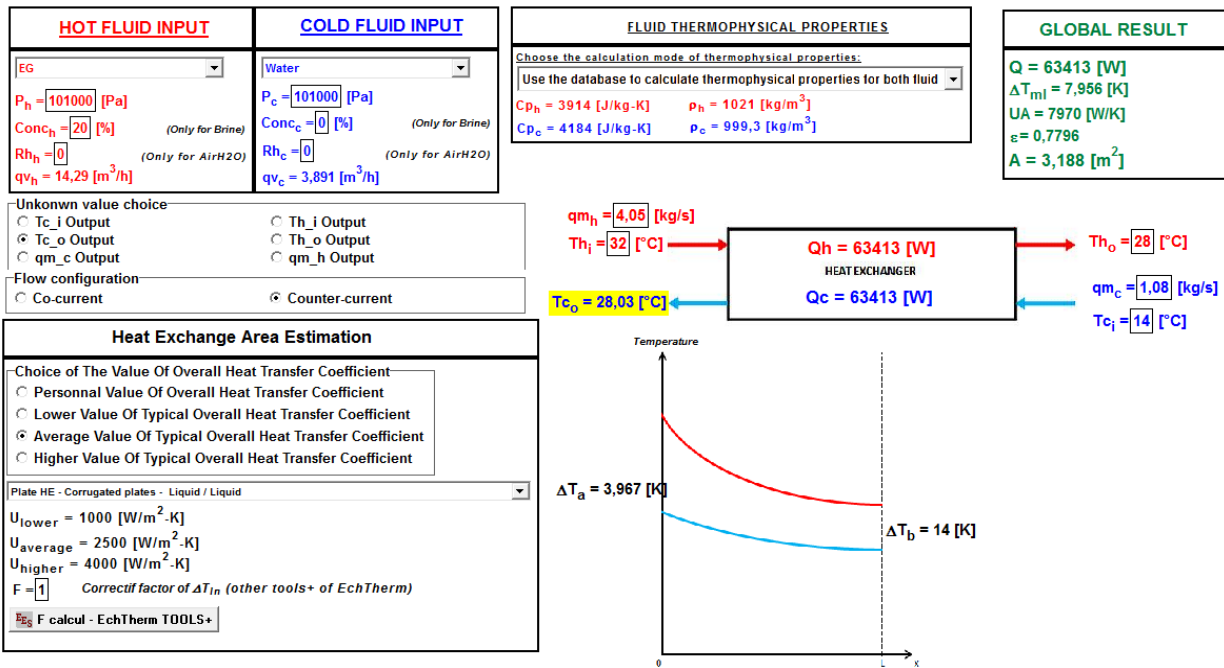


Figure 9 : Iterg, récupération sur TAR, calcul de l'échangeur

Les échangeurs eau-eau à plaques sont très performants. Le coefficient d'échange moyen est de 2500 W/m<sup>2</sup>.°C. Une surface d'échange de 3,2 m<sup>2</sup> est nécessaire. Celle-ci nous permet de calculer le coût d'investissement. Un échangeur en plaques et joints est envisageable car les pressions et températures sont basses. Si une étanchéité parfaite entre les deux fluides est exigée par l'exploitant, un échangeur à plaques soudées (plus coûteux) ou brasées est recommandé.

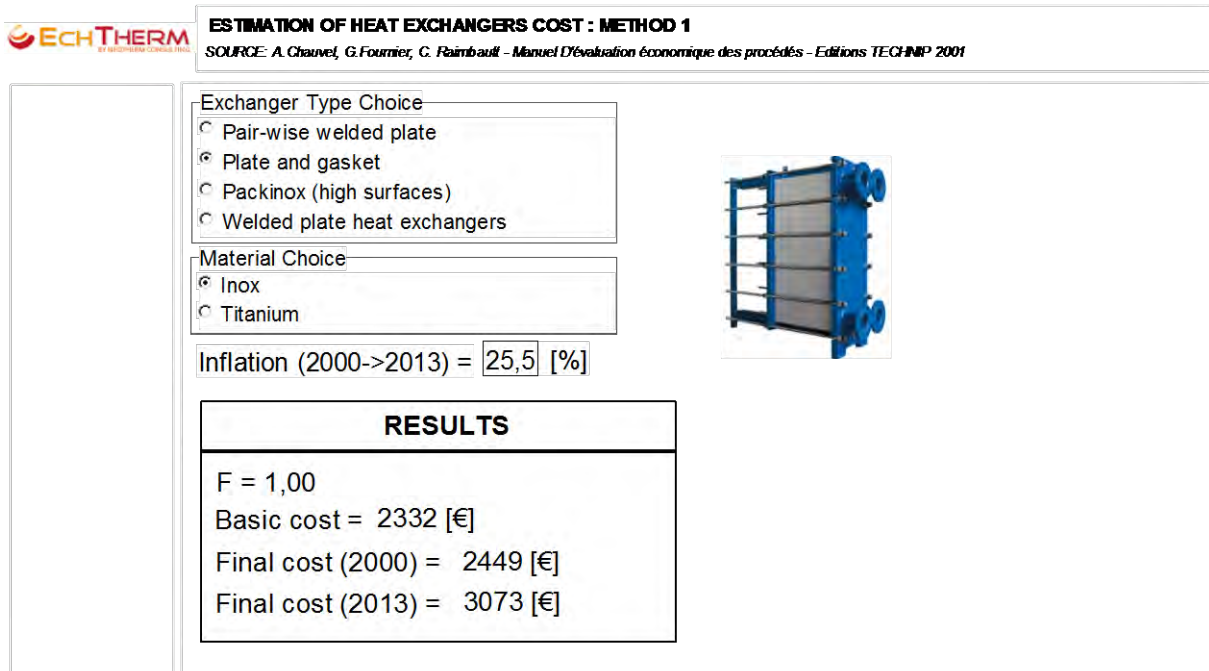


Figure 10 : Iterg, récupération sur TAR, calcul du coût de l'échangeur

Un coût très proche est obtenu avec la méthode matches <http://www.matche.com/equipcost/Exchanger.html>

En ajoutant un coût d'installation de 50 % de l'investissement, **un total de 4 609 € est obtenu.**

<b>Investissement Echangeur</b>
<b>4 609 €</b>

Tableau 11 : ITERG, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière : investissement échangeur

Les économies d'énergie et CO<sub>2</sub> sont présentées dans le tableau suivant :

Nb heures fonctionnement (heures / an)	Economie d'énergie (GWh/an)			Emissions de CO <sub>2</sub> évitées (tonnes / an)
	Echangeur	Réduction conso TAR	Total	
<b>8 000</b>	<b>0,60</b>	<b>0,01</b>	<b>0,61</b>	<b>123</b>

Tableau 12 : ITERG, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière : économies énergie et CO<sub>2</sub>

Les économies financières réalisées ainsi que le temps de retour sur investissement sont présentés dans le tableau suivant :

Economies (€/an)			TRI brut (ans)
Echangeur	Réduction conso TAR	Total	
<b>20 885 €</b>	<b>894 €</b>	<b>21 779 €</b>	<b>0,2</b>

Tableau 13 : ITERG, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière : résultats économiques

## ECHANGEUR + PAC

L'eau d'appoint de la chaudière est dans un premier temps préchauffée par un échange avec l'eau des TAR. Ensuite, une PAC continue la chauffe pour monter jusqu'à 45 et 55 °C. La solution envisageable est présentée sur le schéma de principe suivant :

Eau appoint  
chaudière 14 °C  
3890 kg/h



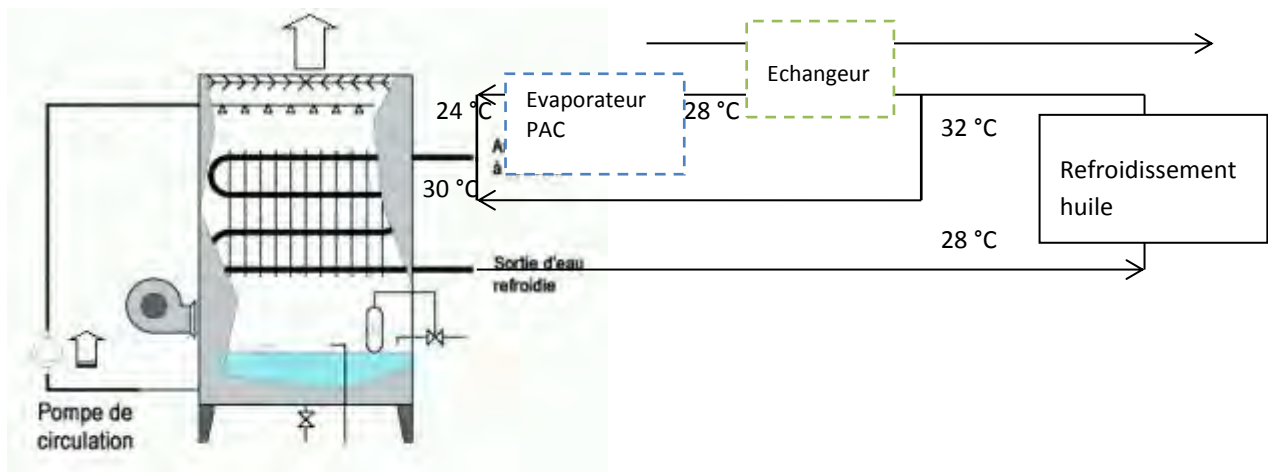


Figure 11 : schéma de principe de la récupération sur TAR avec PAC + échangeur pour préchauffage eau appoint Chaudière

La température en entrée de la TAR est forcément plus froide dans la solution avec échangeur ou échangeur + PAC. Cette température dépend de la proportion du débit qui est by-passé pour alimenter la ligne de récupération. Plus ce débit est important, plus la température en entrée de la TAR sera basse. Cette proportion dépend bien sur de la puissance nécessaire du besoin à chauffer.

Ne disposant pas de la puissance initiale à évacuer par la TAR (et donc du débit d'eau glycolée), nous faisons l'hypothèse que l'eau après mélange est à une température de 30 °C. La TAR est ainsi « soulagée ». La puissance thermique à évacuer en moins est la somme de la puissance de l'échangeur et de la puissance absorbée à l'évaporateur de la PAC, entraînant des réductions de sa consommation électrique (23 kWe/MWth évacués pour une TAR humide) et en eau.

#### PAC :

En calculant le COP dans la configuration présentée sur la figure 13 et en disposant du coût des énergies (électricité et gaz) et le coût de maintenance de la PAC, nous pouvons calculer son coût d'exploitation. La différence de ce coût avec celui de la chaudière donne les économies annuelles réalisées. A partir de ce résultat nous pouvons calculer le TRI si nous avons le coût d'investissement de la PAC. Le TRI calculé dans un premier temps et le TRI de l'investissement de la PAC, en considérant que l'échangeur qui permet de monter l'eau de 14 à 28 °C est déjà en place.

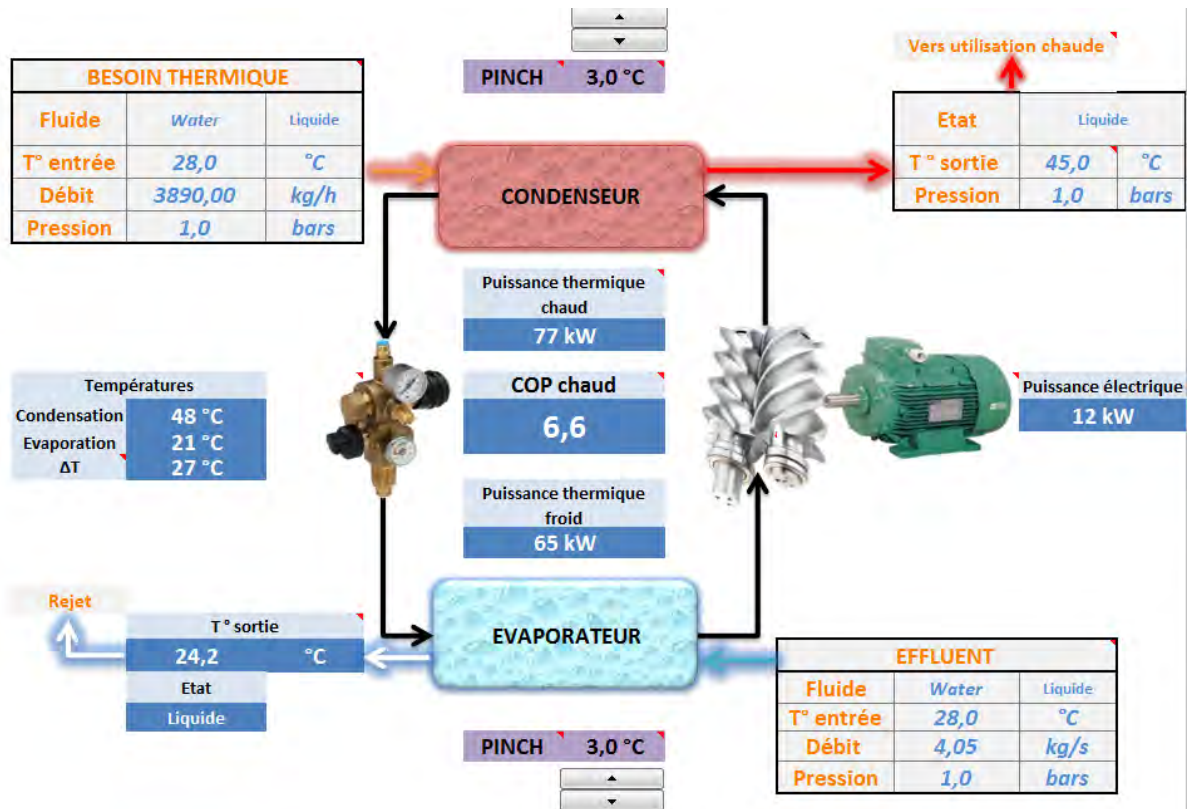


Figure 12 : Iteq, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière : COP de la PAC

Le tableau suivant présente les paramètres d'entrée qui vont servir à calculer le TRI (les coûts d'installation et de maintenance sont exprimés en % du coût d'investissement de la PAC seule).

Température sortie eau chaude	COP	Puissance chaud (kWth)	Puissance récupérée (froid) (kWth)	Investissement PAC
45 °C	6,6	77	65	57 180 €
55 °C	4,7	122	96	84 664 €

Tableau 14 : Iteq, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC : investissement

Les économies d'énergie sont présentées dans le tableau suivant :

Nb heures fonctionnement (heures / an)	Température sortie eau chaude	Economies d'énergie PAC (GWh / an)			Economies d'énergie TAR (GWh / an)			Emissions de CO <sub>2</sub> évitées (tonnes/an)
		Finale	Primaire	Fossile primaire	Finale	Primaire	Fossile primaire	
8 000	45 °C	0,63	0,48	0,70	0,01	0,03	0,003	145
	55 °C	0,94	0,61	1,09	0,02	0,05	0,005	226

Tableau 15 : Iterg, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC : économies d'énergie et CO<sub>2</sub>

Ayant le COP, le coût des énergies (électricité et gaz) et le coût de maintenance de la PAC, nous pouvons calculer son coût d'exploitation. La différence de ce coût avec celui de la chaudière donne les économies annuelles réalisées. A partir de ce résultat nous pouvons calculer le TRI.

	Economies (€/an)			
Température sortie eau chaude	PAC	TAR	Total	TRI brut (ans)
45 °C	18 271 €	918 €	19 189 €	3,0
55 °C	24 624 €	1353 €	25 977 €	3,3

Tableau 16 : Iterg, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC : résultats économiques

Le TRI de la mise en place de cette solution de valorisation est supérieur à 3 ans, ce qui peut rebuter certains industriels. Cependant, l'investissement initial peut être diminué par une prime CEE. Il existe une fiche standard (n° IND-BA-12, voir description en annexe). Le calcul est basé sur l'énergie récupérée par la PAC.

Puissance thermique récupérée (kW)	Mode de fonctionnement du site	Type d'utilisation
65	3x8h sans arrêt le weekend	Process

Tableau 17 : Iterg, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC : paramètres pour fiche CEE

Les GWh cumac réalisés et la prime associée sont présentés dans le tableau suivant. Si on déduit cette prime de l'investissement initial (en pratique la prime sera versée à l'industriel quelques mois après l'installation de la solution), le temps de retour sur investissement diminue :

Température sortie eau chaude	Energie économisée (GWh cumac) IND-BA-12		2 €/MWh cumac	3 €/MWh cumac	4 €/MWh cumac
45 °C	3,0	Prime CEE	6 005 €	9 007 €	12 010 €
		TRI (ans)	2,8	2,6	2,5
55 °C	4,4	Prime CEE	8828 €	13242 €	17655 €
		TRI (ans)	3,1	2,9	2,7

Tableau 18 : Iterg, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC : TRI avec prime CEE

Avec la prime CEE, le TRI passe généralement en dessous des 3 ans.

Les COP des PAC sont très bons. Le temps de retour sur investissement reste tout de même élevé (supérieurs à 3 ans sans prime CEE). Cela est essentiellement lié aux faibles puissances thermiques en jeu dans le cas étudié, qui ne permettent pas de faire de fortes économies d'énergie. Cependant, le projet est éligible au fonds chaleur. Celui-ci permet une couverture de l'investissement de 20 à 40 %.

## ECHANGEUR + PAC



Les mêmes calculs effectués pour l'échangeur et la PAC précédemment sont réalisés pour le couplage échangeur plus PAC.

Température sortie PAC	COP	Puissance chaud (kWth)	Investissement PAC	Investissement échangeur	Investissement total
45 °C	6,6	77	57 180 €	4 609 €	61 789 €
55 °C	4,7	122	84 664 €	4 609 €	89 273 €

Tableau 19 : Iterg, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC + échangeur : investissement

Nb heures fonctionnement (heures / an)	Température sortie PAC	Economies d'énergie PAC+ échangeur + TAR (GWh/an)			Emissions de CO <sub>2</sub> évitées (tonnes / an)
		Finale	Primaire	Fossile primaire	
8000					
	45 °C	1,25	1,14	1,31	268
	55 °C	1,57	1,29	1,70	348

Tableau 20 : Iterg, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC + échangeur : économies d'énergie et CO<sub>2</sub>

Température sortie	Economies (€/an)			TRI brut (ans)
	PAC + échangeur	TAR	Total	
45 °C	39 156 €	1806 €	40 962 €	1,5
55 °C	45 509 €	2247 €	47 756 €	1,9

Tableau 21 : Iterg, récupération sur TAR pour préchauffage eau appoint chaudière avec PAC + échangeur : résultats économiques

Les TRI de la solution PAC + échangeur sont inférieurs à 3 ans. Cette solution est donc jugée rentable. De plus la faisabilité technique est réelle, étant donné que la nature des flux en jeu, les niveaux de température et de puissance permettent l'utilisation de produits standards avec une intégration simple.

#### OFFRE PAC

Les pompes à chaleur proposées dans les solutions précédentes sont des **produits standards**. Il existe des produits disponibles sur le marché, chez différents constructeurs : Johnson Control, Clauger, etc.

## ALCOOL (UNGDA)

Le tableau suivant présente les couples rejets/besoins à étudier pour le secteur de l'alcool :

Process	Atelier (préciser si process ou utilité)	Rejet/Ressource	Besoin	Technologie identifiée	T initiale rejet	T finale rejet	T initiale besoin	T finale besoin	Fluide	Débit
					°C	°C	°C	°C		Kg/h
<b>Rectification</b>	Process	Vapeurs alcooliques	Vapeur	<b>PAC</b>	93	*		115	vapeur eau	4 000

Tableau 22 : pistes prioritaires UNGDA

Les vapeurs alcooliques produites par la distillation doivent être condensées pour les stocker sous forme liquide. La puissance thermique dégagée par cette condensation peut être valorisée. Via une PAC, cette énergie est récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui sera envoyée en bas de la colonne de distillation pour le chauffage.

Calcul du COP :

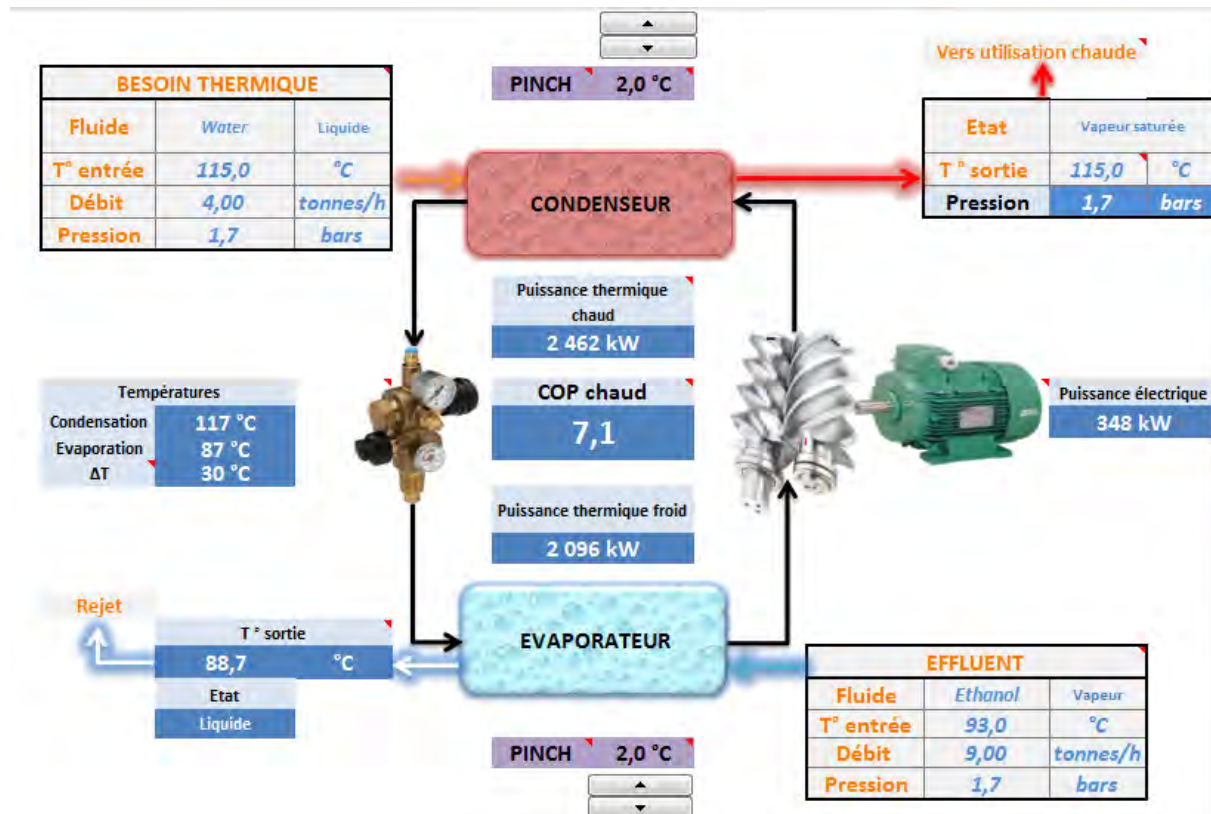


Figure 13 : UNGDA, PAC sur colonne de distillation – calcul du COP

Il est possible dans le condenseur de produire la vapeur directement mais en pratique, on va plutôt avoir un condenseur qui chauffe de l'eau jusqu'à 118 °C, sous pression pour rester à l'état liquide, puis envoyée dans un ballon flash d'où sortira la vapeur (quelques % du débit d'eau). L'eau liquide restante est renvoyée à l'entrée du condenseur. Dans les deux cas, la puissance thermique nécessaire est la même.

Le débit de vapeur alcoolique est ajusté de manière à ce que la température de ces vapeurs en sortie de l'évaporateur reste élevée. En effet, plus cette température est basse, plus la température d'évaporation du fluide frigorigène est basse et moins le COP est bon. On se limite donc à exploiter la chaleur latente des vapeurs alcooliques et à éviter d'aller dans la partie sensible. **La chaleur latente de l'alcool étant environ deux fois plus petite que celle de l'eau, on peut produire un débit de vapeur deux fois plus petit que celui de l'alcool en restant sur le plateau de changement de phase.**

La PAC préconisée ici n'est pour l'instant pas un produit catalogue. L'investissement est alors très difficile à chiffrer précisément. Un coût d'installation supérieur au coût d'installation de PAC standards est pris.

Fonctionnement (heures/an)	Coût installation (%)	Coût total
8 000	100	1 200 398 €

Tableau 23 : UNGDA, récupération sur vapeurs alcooliques pour production vapeur avec PAC : paramètres

Economies d'énergie (GWh / an)			CO <sub>2</sub> (tonnes / an)
Finale	Primaire	Fossile primaire	Emissions de CO <sub>2</sub> évitées
20,39	15,99	22,46	4 615

Tableau 24 : UNGDA, récupération sur vapeurs alcooliques pour production vapeur avec PAC : économies énergie et CO<sub>2</sub>

Economies (€/an)	TRI brut (ans)
602 379 €	2,0

Tableau 25 : UNGDA, récupération sur vapeurs alcooliques pour production vapeur avec PAC : résultats économiques

Le TRI est ici à titre indicatif et ne doit pas être pris comme valeur définitive. En effet, la PAC préconisée ici n'est pas un produit standard. Le coût d'investissement a été évalué mais il peut être très éloigné.

Comme nous l'avons déjà souligné, le COP va fortement varier avec le débit de vapeur alcoolique, impactant alors le TRI. Le tableau suivant présente les économies annuelles et les TRI de la PAC avec des débits d'éthanol allant de 6 à 9 tonnes / h.

Débit de vapeur produite	Débit de vapeur alcoolique	COP	Economies	TRI
	(tonnes / h)	[-]	€/an	ans
4	6	3,0	312 583 €	3,8
	7	3,8	420 223 €	2,9
	8	5,0	516 467 €	2,3
	9	7,1	602 379 €	2,0

Tableau 26 : UNGDA, récupération sur vapeurs alcooliques pour production vapeur avec PAC : variation du TRI avec le débit d'éthanol

La mise en place d'une PAC sur la colonne de distillation permet des économies annuelles d'énergie et financières très importantes. Ces économies permettent de rentabiliser l'investissement en moins de 3 ans quand la source de chaleur (condensation des vapeurs alcooliques) a un débit au moins 60 % supérieur au besoin (vapeur).

## PRODUITS LAITIERS (ACTALIA)

Le tableau suivant présente les pistes prioritaires retenues par le centre technique.

Process	Atelier	Rejet	Besoin	Technologie récupération	T° Besoin entrée/sortie
Laiteries	Utilités	Groupe froid / Tour aéro réfrigérante	Eau chaude sanitaire Préchauffage lait	<b>échangeur de chaleur avant entrée TAR humide</b>	Eau : 14 / 50 °C
		Chaudière vapeur	chauffage eau en entrée de chaudière	<b>échangeur thermique (économiseur)</b>	
		Chaudière à eau chaude surchauffée	chauffage eau en entrée / ou production d'eau chaude sanitaire	<b>économiseur</b>	
		Air comprimé	chauffage des locaux (5 mois / an)	<b>Gainage compresseur</b>	

Tableau 27 : pistes prioritaires actalia

### RECUPERATION SUR GROUPES FROIDS

L'objectif est de récupérer de la chaleur sur les condenseurs groupes froids (eau glacée et eau glycolée) pour la production d'eaux chaudes sanitaires (ECS) à 50°C.

#### DONNEES D'ENTREE

##### Production d'Eau Glacée pour le traitement du lait

Deux compresseurs à NH<sub>3</sub> de 55 kW, soit 110 kW qui fonctionnent à 17,5 bars.

- un compresseur de 1980 ayant les caractéristiques suivantes : 18 bars/274 m<sup>3</sup>/h pour maintenir le bac à eau glacée de 15 t de glace à 0°C avec une herse où circule le NH<sub>3</sub> (détente).
- un compresseur de 2000 : ayant les caractéristiques suivantes : 22 bars/283 m<sup>3</sup>/h

Ces deux compresseurs sont dédiés à la production d'eau glacée pour le traitement du lait (2 pasteurisateurs pour le lait, 1 pasteurisateur pour la crème + 1 échangeur sérum).

Le temps de fonctionnement des compresseurs est de 16 à 17h/j.

Le refroidissement des condenseurs est assuré par **2 TAR humides**

**Nous ne disposons pas du besoin en eau chaude sanitaire. L'énergie valorisée sera alors supposée égale à l'énergie rejetée par le groupe froid. Cette hypothèse entraîne une forte surestimation de l'énergie économisée, à moins que ne soit mis en place un système de stockage permettant d'accumuler l'énergie lorsque la puissance thermique du besoin est inférieure à la puissance thermique récupérée. Sinon, la chaleur excédentaire peut servir au préchauffage de l'eau d'appoint chaudière.**

## RÉCUPERATION SUR GROUPE FROID POUR LA PRODUCTION D'ÉCS

Il existe deux possibilités de produire de l'eau chaude sanitaire en récupérant la chaleur dégagée par un groupe froid :

- PAC et échangeur sur le circuit de refroidissement (amont TAR),
- Echange direct sur la désurchauffe des vapeurs du fluide frigorigène.

### Calcul des puissances et débits en jeu :

Ayant la puissance des compresseurs des groupes froids (110 kW), on peut calculer la puissance thermique dégagée au niveau des condenseurs et ainsi déduire le débit d'eau glycolée de refroidissement nécessaire, qui sera la source froide de la PAC.

Le régime d'eau glacée est fixé à 2 °C pour l'aller, 4 °C pour le retour (voir annexe : schéma eau glacée en laiterie)

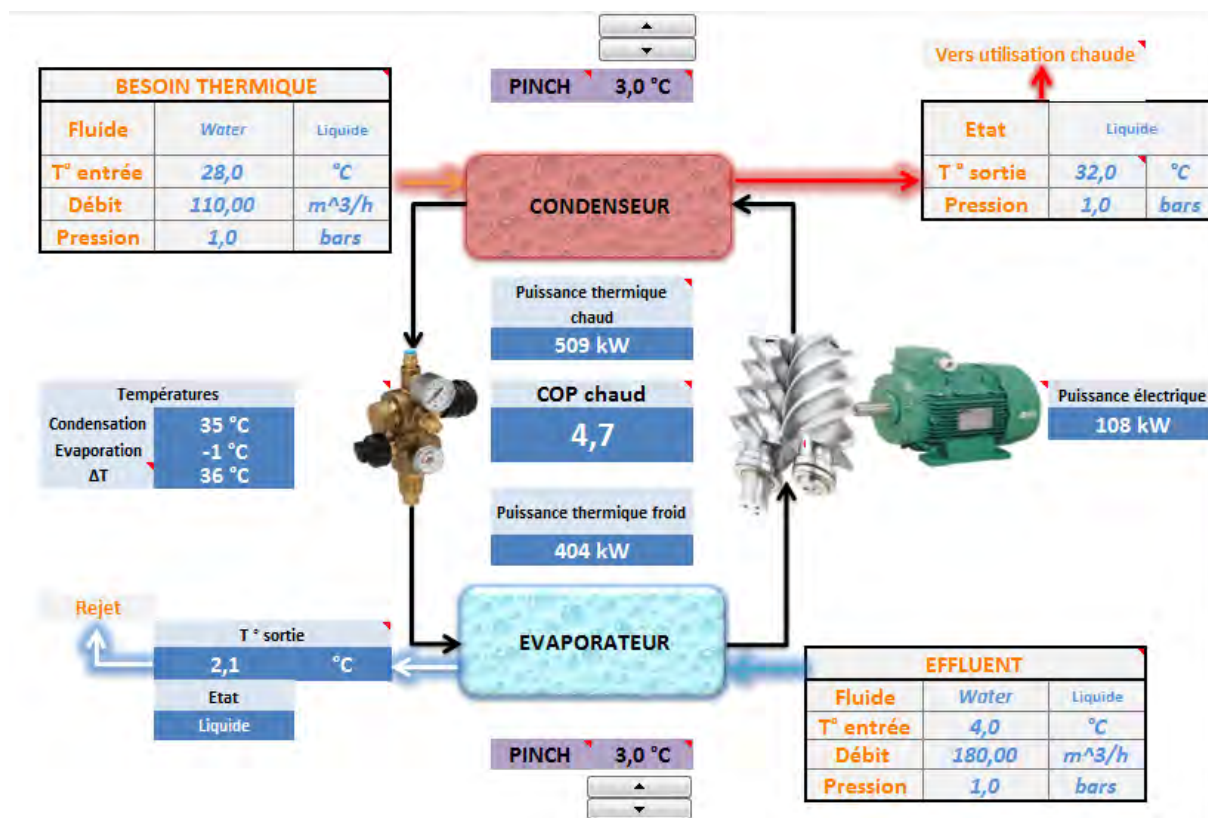
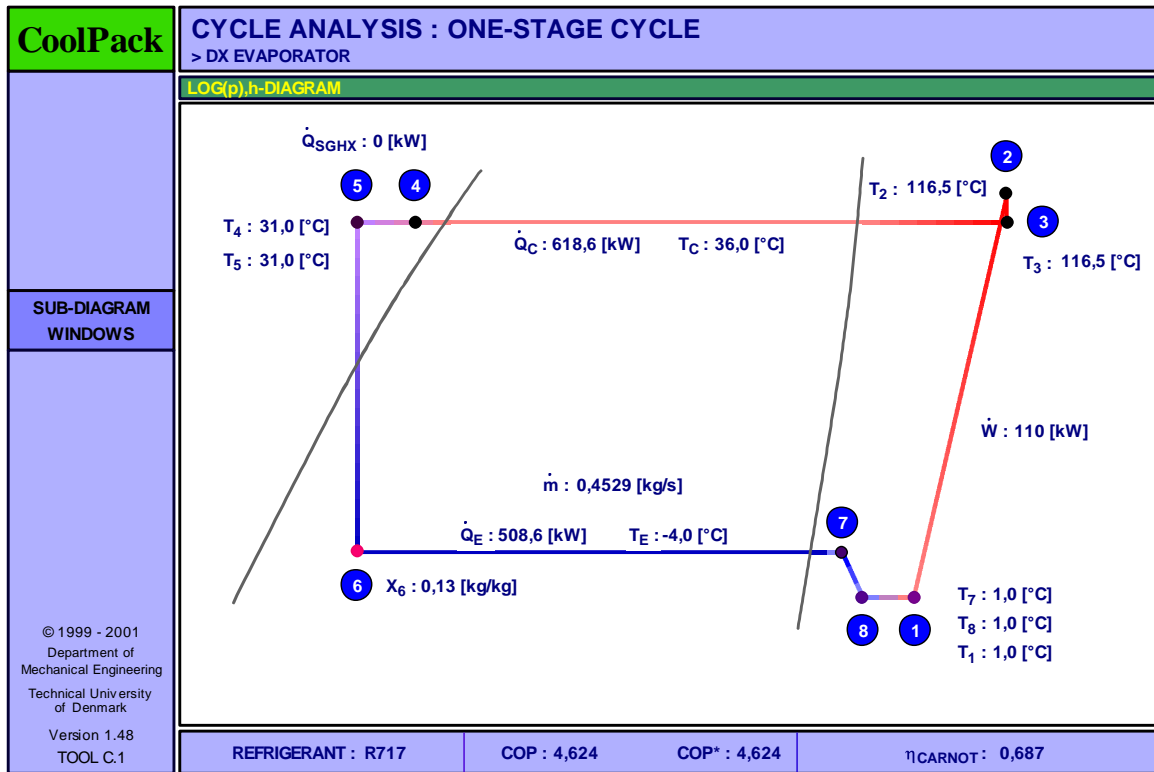


Figure 14 : Actalia, récupération sur groupes froids, simulation du groupe froid de production d'eau glacée

Avec un régime de température 32-28 °C, le débit d'eau nécessaire pour évacuer la puissance thermique du condenseur est de **110 m<sup>3</sup>/h**. La mise en place d'une PAC va changer ce régime. L'eau va en effet arriver plus froide dans la TAR. Dans un premier temps, il sera fixé à 32 – 24 °C.

La simulation du groupe froid permet de déterminer la température de l'ammoniac en sortie du compresseur, le débit massique ainsi que la puissance de désurchauffe.



**AUXILIARY**

**VOLUMETRIC EFFICIENCY**

Volumetric efficiency  $\eta_{\text{VOL}}$  [-]   $\eta_{\text{VOL}}$  : 0,800 [-]  $\dot{V}_S$  : 557,00 [m<sup>3</sup>/h]  $\dot{V}_D$  : 696,2 [m<sup>3</sup>/h]  
 $\dot{V}_S$  can be chosen as input in the cycle specification window.

**UTILIZATION OF DISCHARGE GAS SUPERHEAT FOR HEATING OF WATER**

Temperature increase  $\Delta T_{\text{WATER}}$  [K]   $\Delta T_{\text{WATER}}$  : 40 [K]  $\dot{V}_{\text{WATER}}$  : 2,206 [m<sup>3</sup>/h]  $\dot{Q}_{\text{DSH}}$  : 101,7 [kW]  
 $T_{\text{DL,OUT}}$  : 116,5 [°C]  $T_C$  : 36,0 [°C]

Water in the desuperheating heat exchanger can only be heated to discharge temperature  $T_{\text{DL,OUT}}$ .  
 $\dot{Q}_C$  in the main diagram window includes both the heat load for both desuperheating and condensing of the refrigerant.

**ENERGY CONSUMPTION**

Hours of operation [h] :  Energy consumption : 660000 [kWh]

**PIPE DIMENSIONS**

PIPE SECTION	VELOCITY	PIPE DIAMETER (Internal)	Condition corresponds to
	[m/s]	[mm]	
Suction line	<input type="text" value="10,0"/>	140,4	State Point #1
Discharge line	<input type="text" value="12,0"/>	78,8	State Point #2
Liquid line	<input type="text" value="0,6"/>	40,2	State Point #5

		COP : 4,624	COP* : 4,624
--	--	-------------	--------------

Figure 15 : Actalia, récupération sur groupes froids, simulation du groupe froid de production d'eau glacée

Une puissance de **110 kWth** est disponible sur le désurchauffeur, récupérable pour chauffer de l'eau.

### PAC SUR LE CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT (AMONT TAR)

Cette configuration est la même que celle étudiée pour le préchauffage d'eau de chaudière dans la piste de l'ITERG.

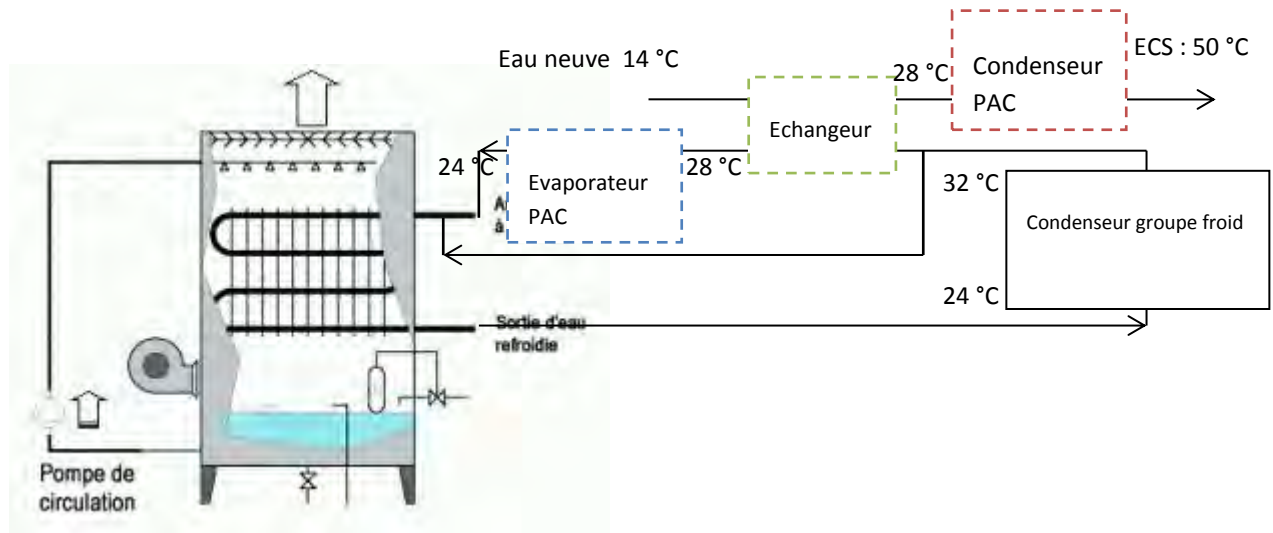


Figure 16 : ACTALIA, groupe froid avec refroidissement du condenseur par TAR Humide et circuit intermédiaire d'eau glycolée

### ECHANGEUR SEUL

Calcul puissance, surface d'échange et température de sortie eau :

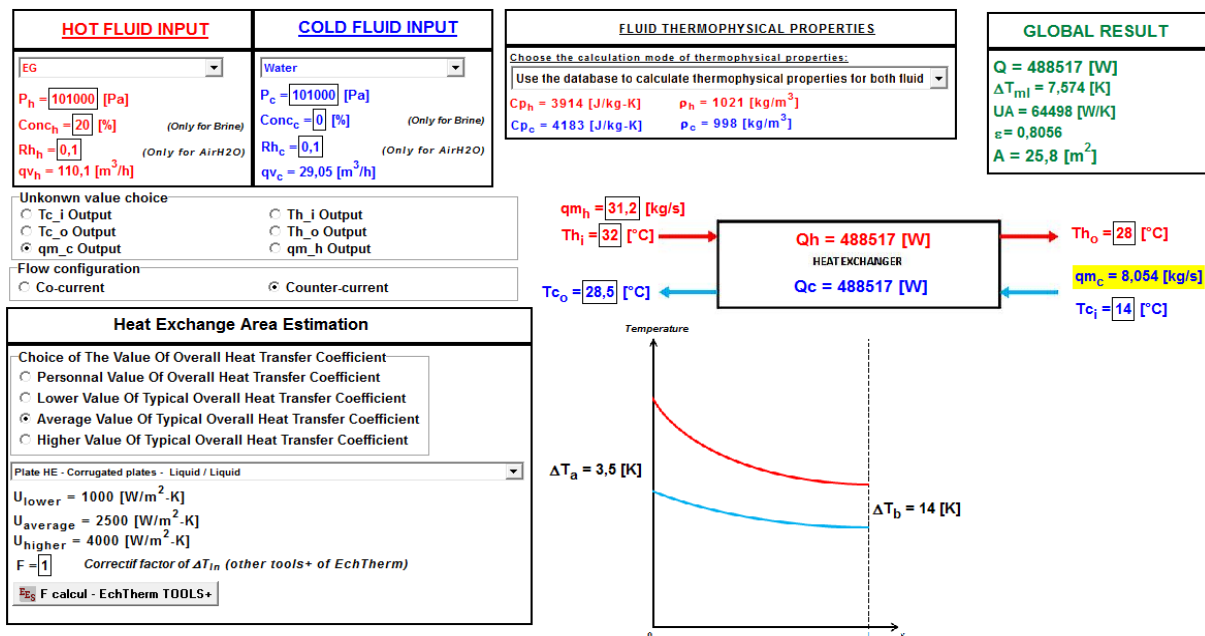


Figure 17 : ACTALIA, récupération sur TAR groupe froid calcul de l'échangeur



**Coût :**


Un échangeur en plaques et joints est envisageable car les pressions et températures sont basses. Cependant, une meilleure étanchéité est possible avec des plaques soudées ou à double parois. Cette étanchéité peut s'avérer indispensable dans un système de production d'eau chaude sanitaire. Le coût de ces deux types d'échangeur, varient fortement.

**ECH THERM** ESTIMATION OF HEAT EXCHANGERS COST : METHOD 1  
SOURCE: A. Chauvel, G. Fournier, C. Raimbault - Manuel D'évaluation économique des procédés - Editions TECHNIP 2001

Exchanger Type Choice  
 Pair-wise welded plate  
 Plate and gasket  
 Packinox (high surfaces)  
 Welded plate heat exchangers

Material Choice  
 Inox  
 Titanium

Inflation (2000->2013) = 25,5 [%]



**RESULTS**


F = 1,00  
Basic cost = 17717 [€]  
Final cost (2000) = 18602 [€]  
Final cost (2013) = 23346 [€]

**ECH THERM** ESTIMATION OF HEAT EXCHANGERS COST : METHOD 1  
SOURCE: A. Chauvel, G. Fournier, C. Raimbault - Manuel D'évaluation économique des procédés - Editions TECHNIP 2001

Exchanger Type Choice  
 Pair-wise welded plate  
 Plate and gasket  
 Packinox (high surfaces)  
 Welded plate heat exchangers

Material Choice  
 Inox  
 Titanium

Inflation (2000->2013) = 25,5 [%]



**RESULTS**

F = 1,00  
Basic cost = 4742 [€]  
Final cost (2000) = 4979 [€]  
Final cost (2013) = 6249 [€]

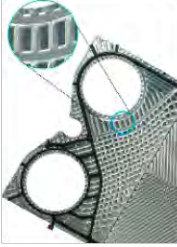
<p>Exchanger Type Choice</p> <p><input checked="" type="radio"/> Pair-wise welded plate</p> <p><input type="radio"/> Plate and gasket</p> <p><input type="radio"/> Packinox (high surfaces)</p> <p><input type="radio"/> Welded plate heat exchangers</p> <p>Material Choice</p> <p><input checked="" type="radio"/> Inox</p> <p><input type="radio"/> Titanium</p> <p>Inflation (2000-&gt;2013) = <input type="text" value="25,5"/> [%]</p>	 <p>The product side is sealed by laser-weldings around the flow channels and with ring gaskets in the port areas. The flow channels of the service side are sealed by elastomer gaskets, whereas the ports are laser-welded.</p>
<p><b>RESULTS</b></p> <p>F = 1,00</p> <p>Basic cost = 9396 [€]</p> <p>Final cost (2000) = 9866 [€]</p> <p>Final cost (2013) = 12382 [€]</p>	

Figure 18 : ACTALIA, coût de l'échangeur : plaques soudées, plaques et joints et double parois

Les coûts présentés ci-dessus sont les coûts d'achat. L'investissement total doit comprendre un coût d'installation supplémentaire de 50 % du coût d'achat.

Les tableaux suivants présentent les résultats de l'analyse technico-économique.

<b>Investissement Echangeur</b>	
<b>Plaques soudées</b>	<b>35 169 €</b>
<b>Plaques et joints</b>	<b>9 374 €</b>
<b>Plaques double parois</b>	<b>18 573 €</b>

Tableau 28 : ACTALIA, récupération sur TAR pour production ECS, échangeur seul: investissement

Les économies d'énergie et CO<sub>2</sub> sont présentées dans le tableau suivant :

<b>Nb heures fonctionnement (heures / an)</b>	<b>Economie d'énergie (GWh/an)</b>			<b>Emissions de CO<sub>2</sub> évitées (tonnes / an)</b>
	<b>Echangeur</b>	<b>Réduction conso TAR</b>	<b>Total</b>	
<b>6 000</b>	<b>3,45</b>	<b>0,07</b>	<b>3,52</b>	<b>710</b>

 Tableau 29 : ACTALIA, récupération sur TAR pour production ECS, échangeur seul : économies énergie et CO<sub>2</sub>

Les besoins en ECS ne sont pas disponibles. Il est alors considéré que toute la chaleur produite grâce à l'échangeur et la PAC est valorisée, ce qui amène à des économies d'énergie surestimées. Cependant, on peut considérer que l'excédent de chaleur est utilisée pour préchauffer l'eau d'appoint de la chaudière.

Les économies financières réalisées ainsi que le temps de retour sur investissement sont présentés dans le tableau suivant :

Economies (€/an)			TRI brut (ans)	
Echangeur	Réduction conso TAR	Total		
120 692 €	5 159 €	125 851 €	Plaques soudées	0,28
			Plaques et joints	0,07
			Plaques double parois	0,15

Tableau 30 : ACTALIA, récupération sur TAR pour production ECS, échangeur seul : résultats économiques

PAC

Calcul du COP :

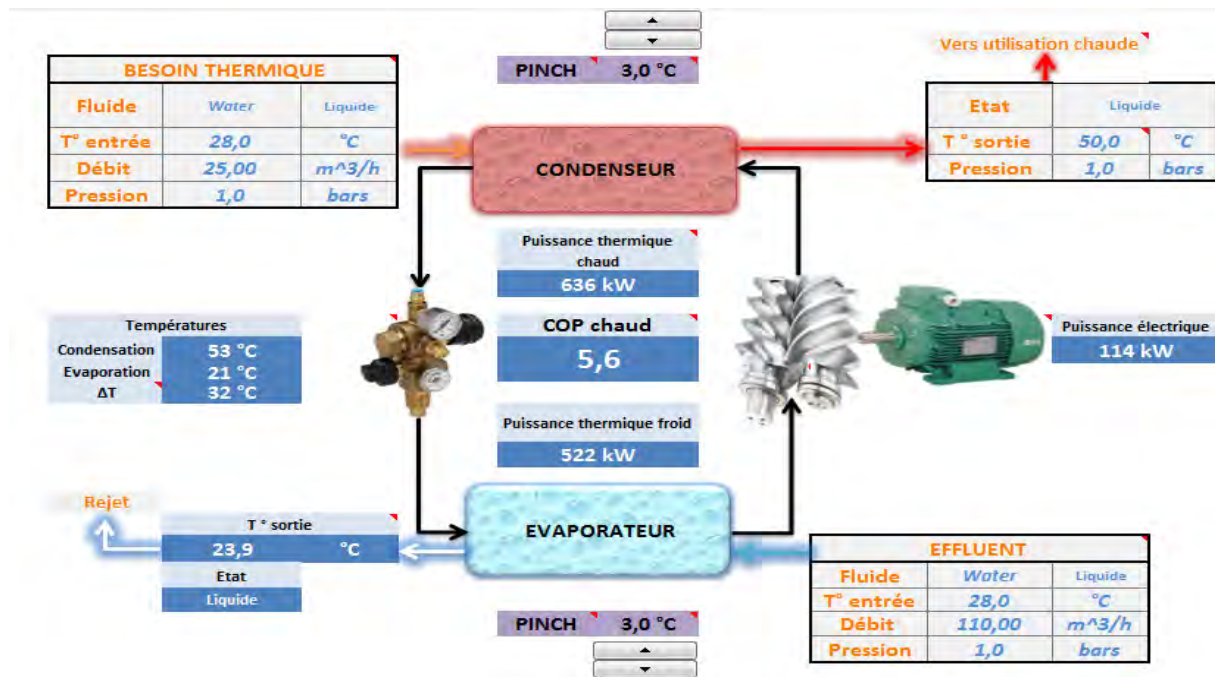


Figure 19 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C : COP de la PAC

<b>Investissement total</b>
<b>326 742 €</b>

Tableau 31 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : investissement

Nb heures fonctionnement	Economies d'énergie PAC (GWh / an)			Economies d'énergie TAR (GWh / an)			Emissions de CO <sub>2</sub> évitées (tonnes / an)
	Finale	Primaire	Fossile primaire	Finale	Primaire	Fossile primaire	
6 000	3,810	2,730	4,310	0,074	0,190	0,019	890

Tableau 32 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : économies d'énergie

Ayant le COP, le coût des énergies (électricité et gaz) et le coût de maintenance de la PAC, nous pouvons calculer son coût d'exploitation. La différence de ce coût avec celui de la chaudière donne les économies annuelles réalisées. A partir de ce résultat nous pouvons calculer le TRI.

Economies (€/an)			TRI brut (ans)
PAC	TAR	Total	
105 931 €	5513 €	111 444 €	2,9

Tableau 33 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : TRI

Le TRI étant très légèrement inférieur à 3 ans, nous calculons tout de même la prime CEE possible, dont les paramètres d'entrée sont présentés dans le tableau suivant :

Puissance thermique récupérée (kW)	Mode de fonctionnement du site	Type d'utilisation
522	3x8h sans arrêt le weekend	Confort

Tableau 34 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : paramètres fiche CEE

Energie économisée (GWh cumac) IND-BA-12	12,7		
	2 €/MWh cumac	3 €/MWh cumac	4 €/MWh cumac
Prime CEE	25 364 €	38 045 €	50 727 €
TRI (ans)	2,7	2,6	2,5

Tableau 35 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : TRI avec prime CEE

## ECHANGEUR + PAC

Investissement PAC	Investissement échangeur		Investissement total
326 742 €	Plaques soudées	35 169 €	361 911 €
	Plaques et joints	9 374 €	336 116 €
	Plaques double parois	18 573 €	345 315 €

Tableau 36 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : paramètres

Nb heures fonctionnement (heures / an)	Economies d'énergie PAC+ échangeur + TAR (GWh/an)			Emissions de CO <sub>2</sub> évitées (tonnes/an)
	Finale	Primaire	Fossile primaire	
6000	7,40	6,55	7,79	1 600

Tableau 37 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : économies d'énergie

Economies (€/an)			TRI brut (ans)	
PAC + échangeur	TAR	Total		
226 623 €	10 672 €	237 295 €	Plaques soudées	1,50
			Plaques et joints	1,40
			Plaques double parois	1,45

Tableau 38 : Actalia, récupération sur TAR pour production ECS à 50 °C avec PAC : TRI

## ECHANGE DIRECT SUR LA DESURCHAUFFE

L'ammoniac est un fluide frigorigène qui présente la particularité de surchauffer beaucoup lors de sa compression. La puissance de désurchauffe représente 10 % de la puissance totale de refroidissement (désurchauffe – condensation – sous-refroidissement). La température peut aller jusqu'à 100 °C en sortie du compresseur, même si la condensation est autour de 30 °C. Cette puissance peut donc être exploitée pour produire de l'eau chaude à une température supérieure à la température de condensation de l'ammoniac.

Des solutions existent pour valoriser cette désurchauffe, comme le système Ecolacteo.

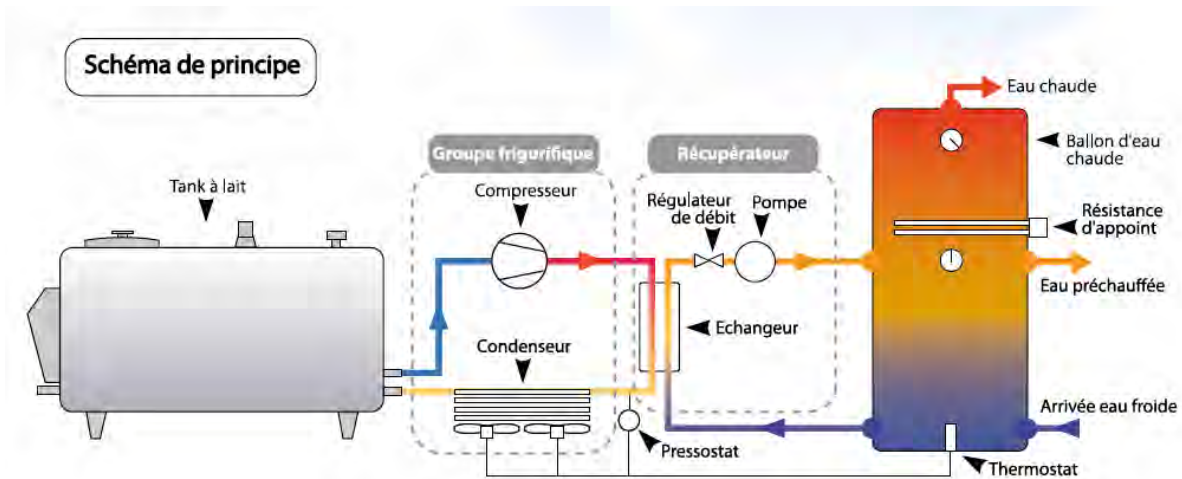


Figure 20 : schéma de principe de la solution Ecolacteo

Les récupérateurs de chaleur sont principalement évalués au regard de leur performance énergétique sur l'eau chaude sanitaire. D'autres critères permettent d'apprécier les matériels dans leur globalité : l'impact sur les consommations électriques du groupe froid, la modification de la charge en fluide frigorigène ou encore la facilité d'installation. Par soucis de concision, ces critères ne seront pas évalués ici. Ils sont à regarder de près dans une étude plus approfondie.

### Calcul de l'échangeur :

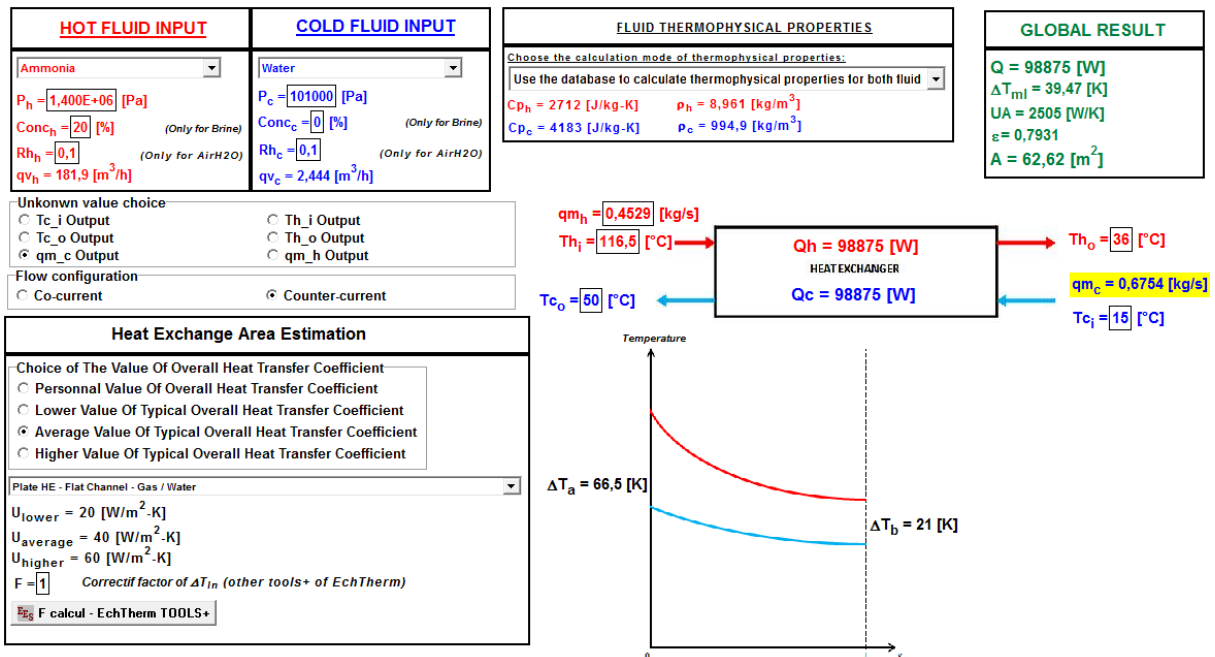


Figure 21 : ACTALIA, récupération sur désurchauffe groupe froid, calcul de l'échangeur

L'investissement de la solution concerne seulement l'échangeur récupérateur. Nous considérons donc que le système d'eau chaude sanitaire (ballon, tuyauterie, etc) est déjà en place, la production d'eau chaude par la récupération vient juste en complément de ce système.

Le tableau suivant présente les résultats de l'analyse technico-économique.

Puissance désurchauffe	T° entrée eau	T° sortie eau	delta T°	Débit eau		Surface d'échange	Technologie	Coût échangeur	Coût installation	Coût total	Conso chaleur	Conso gaz	Economies	TRI
				kg/s	m <sup>3</sup> /h									
98,9	10	50	40	0,59	2,13	57,32	Plaques et joints	12 912 €	50	19 368 €	593 400	698 118	24 434 €	0,79
		60	50	0,47	1,70	62,90		13 738 €		20 607 €				0,84
	15	50	35	0,68	2,43	62,62		13 697 €		20 546 €				0,84
		60	45	0,53	1,89	68,91		14 607 €		21 911 €				0,90
98,9	10	50	40	0,59	2,13	57,32	Plaques soudées	52 175 €	50	78 263 €	593 400	698 118	24 434 €	3,20
		60	50	0,47	1,70	62,90		56 388 €		84 582 €				3,46
	15	50	35	0,68	2,43	62,62		56 176 €		84 264 €				3,45
		60	45	0,53	1,89	68,91		60 951 €		91 427 €				3,74

Tableau 39 : ACTALIA, étude récupération directe sur le désurchauffeur du groupe froid : résultats économiques

En fonction de la technologie de l'échangeur récupérateur (plaques et joints ou plaques soudées), l'investissement, et donc le TRI varie fortement. Il reste tout de même proche des 3 ans, avec des économies annuelles d'environ 25 000 €.

Rappelons que cette technique de récupération n'est a priori pertinente, que sur des groupes froids fonctionnant à l'ammoniac car ce fluide a la particularité d'avoir une part importante (20 %) de désurchauffe dans le refroidissement total (désurchauffe, condensation, sous-refroidissement)

Par ailleurs, l'étanchéité de l'échangeur récupérateur doit être regardée de très près.



## FABRICANTS

Il existe sur le marché plusieurs produits standards. Le tableau suivant présente les fabricants de récupérateurs de chaleur sur groupes froids :

Récupérateurs de chaleur évalués			Système de régulation de la température de l'eau	Présence d'un circulateur	Système de pilotage de la mise en marche des ventilateurs
Marque	Modèle	Dimensions			
Récupérateurs de chaleur à plaques (externes)					
<b>ECOLACTEO</b>	ECOLACTEO AERO	20 plaques	Vanne thermostatique placée en aval	oui	Thermostat
<b>GEA</b>	OPTICOOL 10	10 plaques	Calorstat placé en aval	oui	Pressostat
<b>GEA</b>	OPTICOOL 10 R	10 plaques	Vanne thermostatique mélangeuse placée en amont	oui	Pressostat
<b>SERAP</b>	SERATEMP SP 03	24 plaques	Calorstat placé en aval	oui	Pressostat
Récupérateurs de chaleur internes (échangeur intégré à la paroi d'une cuve)					
<b>BOUMATIC</b>	THERMASTOR II-80	Cuve de 300 l	/	non	Pressostat

Tableau 40 : fabricants de récupérateurs sur désurchauffe groupes froids

## RECUPERATION SUR COMPRESSEURS D'AIR

### GENERALITES

Les compresseurs dégagent beaucoup de chaleur, Cette énergie calorifique peut être employée efficacement dans des installations telles que le chauffage ou les systèmes de ventilation.

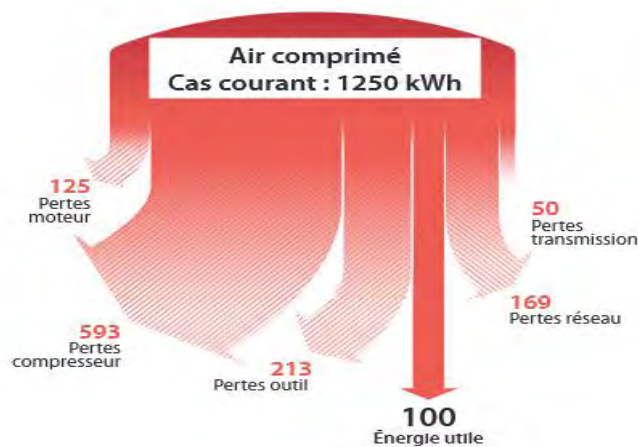


Figure 22 : répartition des puissances dans un compresseur d'air



## PRODUCTION D'AIR CHAUD

Sur les compresseurs à vis refroidis par air et par huile ou par fluide, la formule de récupération de calories la plus simple consiste à réutiliser directement l'air de refroidissement réchauffé par le compresseur. L'air chaud est canalisé vers les zones nécessitant un apport calorifique. Cet air chaud peut naturellement être utilisé pour d'autres usages tels que les processus de séchage, les dispositifs de fermeture de porte ou le préchauffage de l'air de combustion.

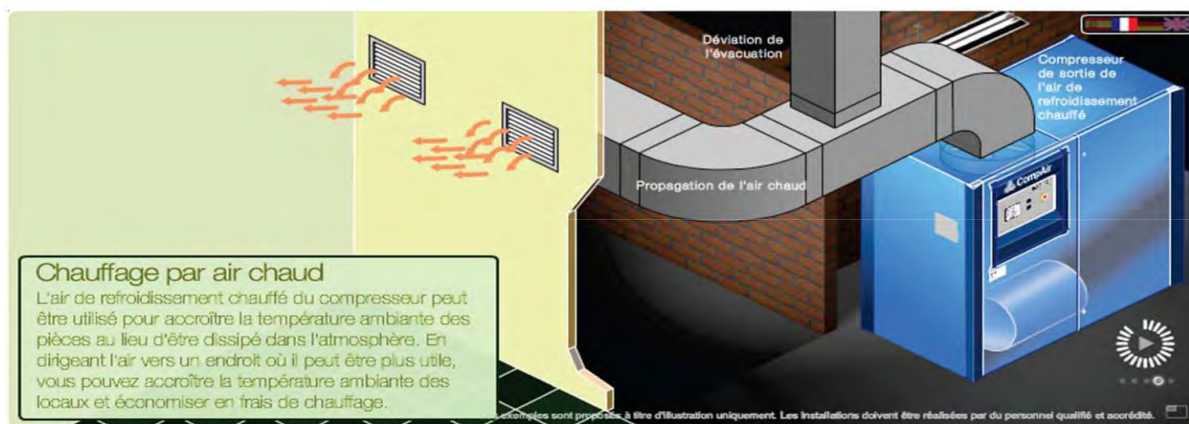


Figure 23 : Récupération calories par gainage permettant le chauffage de locaux (crédit : compair)

Des registres ou dispositifs à volets à commande manuelle ou automatique évacuent l'air chaud vers l'extérieur lorsqu'il ne doit pas être utilisé. Une régulation thermostatique des registres permet d'adapter exactement le débit d'air chaud nécessaire pour obtenir des températures toujours constantes.

Cette formule permet de réutiliser jusqu'à 94 % de la puissance électrique absorbée par un compresseur à vis. Elle peut s'avérer tout aussi rentable avec des compresseurs de petite taille, car l'énergie calorifique produite par un compresseur de 18,5 kW suffit déjà pour le chauffage d'une maison familiale.

## PRODUCTION D'EAU CHAUDE

La récupération peut permettre de produire de l'eau chaude sanitaire, de l'eau de chauffage ou de l'eau pour process.

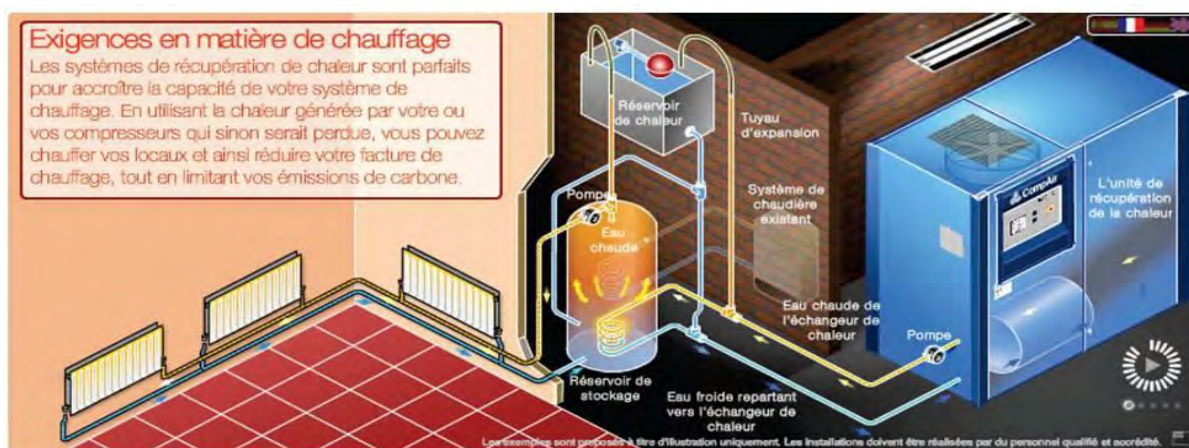


Figure 24 : Récupération calories de l'huile avec un échangeur à plaques double parois INOX et motopompe de circulation (crédit : compair)

L'installation d'un échangeur de chaleur sur le circuit de fluide des compresseurs à vis à refroidissement par air ou par eau permet de produire de l'eau pour des usages divers. Un échangeur de chaleur à plaques ou un échangeur de chaleur de sécurité sera utilisé, selon l'usage prévu de l'eau chaude : alimentation d'un réseau de chauffage central ou à usage sanitaire ou processus de fabrication ou de nettoyage de pièces.

Ces échangeurs de chaleur permettent de produire de l'eau chaude jusqu'à 70 °C. Les frais d'investissement de ce mode de récupération de calories avec des compresseurs à partir de 18,5 kW peuvent être amortis en l'espace de 2 ans, à condition toutefois d'une planification dans les règles

Technologie / Refroidissement	Compresseurs lubrifiés	Compresseurs exempts d'huile
Par AIR	Récupération de l'air chaud par gainage au refoulement, pour le chauffage de locaux Saisonnalité : 6 à 8 mois Potentiel : 94%*	Récupération de l'air chaud par gainage au refoulement, pour le chauffage de locaux Saisonnalité : 6 à 8 mois Potentiel : 94%*
Par EAU	Récupération d'eau chaude jusqu'à 70°C par l'installation d'un kit standard de récupération de chaleur sur le compresseur Saisonnalité : 12 mois Potentiel : 70%*	Récupération d'eau chaude jusqu'à 90°C par l'installation d'un échangeur de chaleur sur la boucle d'eau de refroidissement Saisonnalité : 12 mois Potentiel : 94%*

Tableau 41 : comparaisons des récupérations sur compresseurs d'air comprimé

## ETUDE DE CAS

### DONNEES D'ENTREE :

Zone climatique site : H1

3 compresseurs refroidis par air :

- 2 Roller 40 de 30 à 35 kW
- 1 C337 à 30 kW

Consommation d'air comprimé du site en période de pointe : 350 m<sup>3</sup>/h. Talon de consommation hors fabrication : 3m<sup>3</sup>/min (pour les buses en affinage, les vannes en traitement du lait).

### ANALYSE

La chaleur récupérée ne peut être valorisée que lorsqu'il y a des besoins de chauffage. Ceux-ci existent généralement entre 5 et 7 mois dans l'année. De plus, les compresseurs dégagent beaucoup de chaleur, la puissance récupérable est souvent plus élevée que le besoin. Ce dernier dépend notamment du volume du local à chauffer, des déperditions, du taux de brassage.

Pour une répartition homogène de l'air chaud dans ce bâtiment, il est conseillé un taux de brassage (**B**) minimum par heure de :

- Bâtiment de - de 5000 M<sup>3</sup> : **B** = 3
- Bâtiment de + de 5000 M<sup>3</sup> : **B** = 2,5

Isolation du local	Coefficient K selon Volume		
	< 1 000 m <sup>3</sup>	1 000 à 5 000 m <sup>3</sup>	> 5 000 m <sup>3</sup>
Bonne (mûrs + plafond + portes isolés)	1,1	0,9	0,8
Moyenne (plafond ou mûrs isolés)	1,5	1,3	1,1
Faible (mûrs)	2	1,8	1,6
Inexistante (pas d'isolation)	2,4	2,2	2

Tableau 42 : coefficients d'isolation typiques

Le tableau suivant montre le calcul des puissances thermique nécessaire pour chauffer des locaux de différents volumes en fonction des températures extérieures et intérieures, pour une isolation moyenne :

Température extérieure	Température intérieure	Volume à chauffer	Coefficient d'isolation	Puissance thermique nécessaire	Débit d'air minimum
°C	°C	m <sup>3</sup>	W/m <sup>3</sup>	kW	m <sup>3</sup> /h
10	15	1 000	1,5	7,5	3 000
		2 000	1,3	13	6 000
		5 000	1,3	32,5	12 500
		10 000	1,1	55	25 000
	20	1 000	1,5	15	3 000
		2 000	1,3	26	6 000
		5 000	1,3	65	12 500
		10 000	1,1	99	25 000

Tableau 43 : exemple calcul de puissance de chauffage et débit d'air nécessaire pour le chauffage de locaux

Les puissances et les débits d'air nécessaires sont à comparer aux puissances disponibles (récupérées) et aux débits d'air associés, dépendant de la température de sortie (soufflage).

Nous fixons une efficacité de récupération de 90 %.

Puissance compresseur	Efficacité récupération	Puissance thermique récupérée	T° air neuf	T° air sortie (soufflage)	Débit d'air
kWe	%	kW	°C	°C	m <sup>3</sup> /h
110	90	99	10	30	16 200
				40	10 800
				50	8 100
			5	30	12 960
				40	9 257
				50	7 200

Tableau 44 : paramètres puissance disponible et débits d'air

En fonction des volumes des locaux à chauffer et des températures, seulement une partie de la puissance dégagée par le compresseur peut être valorisée (% de valorisation dans les tableaux suivants).

Les économies d'énergie et financières de la récupération de chaleur sur le compresseur sont calculées par rapport à un chauffage gaz et électrique, dont les rendements sont présentés dans le tableau suivant :

Coût elec	Coût gaz	Rendement chauffage		
€/MWh	€/MWh	Mazout	chaudière HR	78 %
75	35	Gaz naturel	chaudière HR	77 %
			chaudière modulante	83 %
			chauffage urbain	58 %
		Électricité	direct	93 %
			mixte (accu+direct)	86 %
		Pompe à chaleur	eau/eau	216 %

Tableau 45 : rendements des différents types de chauffage

Un rendement de 83 % est pris pour le chauffage gaz et 93 % pour le chauffage électrique.

T° air extérieur	Température intérieure	Volume à chauffer	Coefficient d'isolation	Puissance thermique valorisée	Débit d'air minimum	Valorisation	Saisonnalité	Nombre d'heures	Energie valorisée	Economie / chauffage élec	Economie / chauffage gaz	Investissement max pour TRI < 3 ans	
°C	°C	m <sup>3</sup>	W/m <sup>3</sup>	kW	m <sup>3</sup> /h	%	mois	heures/an	MWh/an	€/an	€/an	elec	gaz
10	15	1 000	1,5	7,5	3 000	8 %	5	3720	28	2250	1177	6 750 €	3 530 €
		2 000	1,3	13	6 000	13 %			48	3900	2039	11 700 €	6 118 €
		5 000	1,3	32,5	12 500	33 %			121	9750	5098	29 250 €	15 295 €
		10 000	1,1	55	25 000	56 %			205	16500	8628	49 500 €	25 883 €
	20	1 000	1,5	15	3 000	15 %			56	4500	2353	13 500 €	7 059 €
		2 000	1,3	26	6 000	26 %			97	7800	4079	23 400 €	12 236 €
		5 000	1,3	65	12 500	66 %			242	19500	10196	58 500 €	30 589 €
		10 000	1,1	99	25 000	100 %			368	29700	15530	89 100 €	46 590 €
5	15	1 000	1,5	15	3 000	15 %	56	4500	2353	13 500 €	7 059 €		
		2 000	1,3	26	6 000	26 %	97	7800	4079	23 400 €	12 236 €		
		5 000	1,3	65	12 500	66 %	242	19500	10196	58 500 €	30 589 €		
		10 000	1,1	99	25 000	100 %	368	29700	15530	89 100 €	46 590 €		
	20	1 000	1,5	22,5	3 000	23 %	84	6750	3530	20 250 €	10 589 €		
		2 000	1,3	39	6 000	39 %	145	11700	6118	35 100 €	18 353 €		
		5 000	1,3	97,5	12 500	98 %	363	29250	15295	87 750 €	45 884 €		
		10 000	1,1	99	25 000	100 %	368	29700	15530	89 100 €	46 590 €		

Tableau 46 : calcul économies pour un chauffage d'une durée de 5 mois

T° air extérieur	Température intérieure	Volume à chauffer	Coefficient d'isolation	Puissance thermique valorisée	Débit d'air minimum	Valorisation	Saisonnalité	Nombre d'heures	Energie valorisée	Economie / chauffage élec	Economie / chauffage gaz	Investissement max pour TRI < 3 ans	
°C	°C	m <sup>3</sup>	w/m <sup>3</sup>	kW	m <sup>3</sup> /h	%	mois	heures/an	MWh/an	€/an	€/an	elec	gaz
10	15	1 000	1,5	7,5	3 000	8 %	6	4464	33	2700	1412	8 100 €	4 235 €
		2 000	1,3	13	6 000	13 %			58	4680	2447	14 040 €	7 341 €
		5 000	1,3	32,5	12 500	33 %			145	11700	6118	35 100 €	18 353 €
		10 000	1,1	55	25 000	56 %			246	19800	10353	59 400 €	31 060 €
	20	1 000	1,5	15	3 000	15 %			67	5400	2824	16 200 €	8 471 €
		2 000	1,3	26	6 000	26 %			116	9360	4894	28 080 €	14 683 €
		5 000	1,3	65	12 500	66 %			290	23400	12236	70 200 €	36 707 €
		10 000	1,1	99	25 000	100 %			442	35640	18636	106 920 €	55 908 €
5	15	1 000	1,5	15	3 000	15 %			67	5400	2824	16 200 €	8 471 €
		2 000	1,3	26	6 000	26 %			116	9360	4894	28 080 €	14 683 €
		5 000	1,3	65	12 500	66 %			290	23400	12236	70 200 €	36 707 €
		10 000	1,1	99	25 000	100 %			442	35640	18636	106 920 €	55 908 €
	20	1 000	1,5	22,5	3 000	23 %			100	8100	4235	24 300 €	12 706 €
		2 000	1,3	39	6 000	39 %			174	14040	7341	42 120 €	22 024 €
		5 000	1,3	97,5	12 500	98 %			435	35100	18353	105 300 €	55 060 €
		10 000	1,1	99	25 000	100 %			442	35640	18636	106 920 €	55 908 €

Tableau 47 : calcul économies pour un chauffage d'une durée de 6 mois

T° air extérieur	Température intérieure	Volume à chauffer	Coefficient d'isolation	Puissance thermique valorisée	Débit d'air minimum	Valorisation	Saisonnalité	Nombre d'heures	Energie valorisée	Economie / chauffage élec	Economie / chauffage gaz	Investissement max pour TRI < 3 ans	
°C	°C	m³	W/m³	kW	m³/h	%	mois	heures/an	MWh/an	€/an	€/an	elec	gaz
10	15	1 000	1,5	7,5	3 000	8 %	7	5208	39	3150	1647	9 450 €	4 941 €
		2 000	1,3	13	6 000	13 %			68	5460	2855	16 380 €	8 565 €
		5 000	1,3	32,5	12 500	33 %			169	13650	7137	40 950 €	21 412 €
		10 000	1,1	55	25 000	56 %			286	23100	12079	69 300 €	36 236 €
	20	1 000	1,5	15	3 000	15 %			78	6300	3294	18 900 €	9 883 €
		2 000	1,3	26	6 000	26 %			135	10920	5710	32 760 €	17 130 €
		5 000	1,3	65	12 500	66 %			339	27300	14275	81 900 €	42 825 €
		10 000	1,1	99	25 000	100 %			516	41580	21742	124 740 €	65 225 €
5	15	1 000	1,5	15	3 000	15 %			78	6300	3294	18 900 €	9 883 €
		2 000	1,3	26	6 000	26 %			135	10920	5710	32 760 €	17 130 €
		5 000	1,3	65	12 500	66 %			339	27300	14275	81 900 €	42 825 €
		10 000	1,1	99	25 000	100 %			516	41580	21742	124 740 €	65 225 €
	20	1 000	1,5	22,5	3 000	23 %			117	9450	4941	28 350 €	14 824 €
		2 000	1,3	39	6 000	39 %			203	16380	8565	49 140 €	25 695 €
		5 000	1,3	97,5	12 500	98 %			508	40950	21412	122 850 €	64 237 €
		10 000	1,1	99	25 000	100 %			516	41580	21742	124 740 €	65 225 €

Tableau 48 : calcul économies pour un chauffage d'une durée de 7 mois

L'investissement maximum pour que la solution présente un TRI inférieur à 3 ans semble réaliste. Les modifications à faire pour mettre en place la valorisation de la chaleur consiste essentiellement à mettre en place des gaines d'air. La faisabilité technique est réelle.

Le calcul de la prime CEE dépend de la puissance du compresseur, du mode de fonctionnement du site, et de la zone climatique (voir annexe sur la fiche CEE).

<b>CEE (fiche IND-UT-09)</b>				
<b>Mode de fonctionnement du site</b>	<b>kWh cumac</b>	<b>Prime CEE (2€ /MWh cumac)</b>	<b>Prime CEE (3€ /MWh cumac)</b>	<b>Prime CEE (4€ /MWh cumac)</b>
<b>1x8h</b>	<b>605000</b>	<b>1 210 €</b>	<b>1 815 €</b>	<b>2 420 €</b>
<b>2x8h</b>	<b>1452000</b>	<b>2 904 €</b>	<b>4 356 €</b>	<b>5 808 €</b>
<b>3x8h avec arrêt le weekend</b>	<b>1881000</b>	<b>3 762 €</b>	<b>5 643 €</b>	<b>7 524 €</b>
<b>3x8h sans arrêt le weekend</b>	<b>2541000</b>	<b>5 082 €</b>	<b>7 623 €</b>	<b>10 164 €</b>

Tableau 49 : prime CEE récupération chaleur sur compresseur air comprimé

## ECONOMISEUR SUR CHAUDIERES

Un économiseur sans condensation (température des gaz de carneau au-dessus de la température de condensation des gaz) augmente l'efficacité globale de 2 % à 4 %. Un économiseur avec condensation peut ainsi augmenter l'efficacité de la chaudière de 10 % à 15 %.

Une réduction de 22 °C de la température des fumées en passant par l'économiseur ou un préchauffeur, mène à une réduction de 1 % sur la consommation de combustible.

Les économies d'énergie réelles générées par un économiseur proviennent de la chute de température des gaz de combustion circulant dans l'économiseur, multipliée par leur débit massique. La température des gaz de combustion d'une chaudière classique sans condensation est de **135°C**. Un économiseur de taille appropriée fera chuter la température des gaz de combustion à **~70°C** et en transférant la chaleur absorbée dans l'eau en circulation.



**Sans CEE :**

Puissance (kW)	Economie d'énergie à 4,7 % de gain (kWh)	Economie	Coût de l'économiseur posé	TRI (ans)
1 000	90 475	2 714 €	20 000 €	7,37
2 000	180 950	5 429 €	20 000 €	3,68
4 536	410 395	12 312 €	21 200 €	1,72
7 560	683 991	20 520 €	23 200 €	1,13
11 340	1 025 987	30 780 €	30 400 €	0,99
15 120	1 367 982	41 039 €	38 600 €	0,94
18 900	1 709 978	51 299 €	40 000 €	0,78

Tableau 50 : Actalia, étude économique économiseur (sans CEE) (source : EDF et CEREN)

La durée annuelle de fonctionnement d'une chaudière est en moyenne de 5000 h et sa charge de 40 %. Le prix du combustible utilisé est celui du gaz naturel à **30 €/MWh**. Le tableau confirme, sur la base des données disponibles, que pour une puissance de chaudière inférieure à 2MW la mise en place d'un économiseur n'est pas rentable.

**Avec CEE :**

La mise en place d'un économiseur sur chaudière peut être subventionnée par une prime CEE en utilisant la fiche standard UND-IT-04 (voir annexe).

Seules les chaudières à gaz sont éligibles aux CEE. Seules les chaudières d'une puissance comprise entre 1 et 10 MW sont éligibles aux CEE.

Puissance (kW)	MWh cumac	Prime CEE (2,50 €/MWh cumac)	Coût investissement aidé	TRI aidé (ans)
1000	565	1412	18 588 €	6,85
2000	1129	2824	17 176 €	3,16
4536	2562	6404	14 796 €	1,2
7560	4269	10674	12 526 €	0,61
11340	6404	16011	14 389 €	0,47
15120	8539	21347	17 253 €	0,42
18900	10674	26684	13 316 €	0,26

Tableau 51 : Actalia, étude économique économiseur (avec CEE) (source : EDF et CEREN)

Une aide de 2,5€/MWhcumac ne modifie pas le seuil de rentabilité de 2MW.

## CONSERVES (CTCPA)

Le tableau suivant présente les couples rejets/besoins à étudier pour le secteur des conserves :

Process	Rejet/Ressource	Tinitiale du rejet	Tfinale du rejet	Besoin	Technologie identifiée	Tinitiale du besoin	Tfinale du besoin	Fluide	Nature fluide	Débit	Puissance moyenne	Fonctionnement annuel
		°C	°C			°C	°C			kg/h	kW	semaines
<b>autoclavage</b>	chaleur contenue dans l'eau lors du refroidissement via échangeur	78	12	préchauffage de l'eau des autoclaves/ECS	échangeur à plaques+ cuves tampons	>12	55 (ECS) à 95 (autoclave)	eau	eau propre	1715	165	5000 h/an

Tableau 52 : pistes prioritaires pour les conserves

## AUTOCLAVAGE

Si on veut produire de l'ECS à partir d'une eau froide à environ 12 °C, il n'est pas conseillé de descendre la température de l'eau de refroidissement (chaleur fatale) jusqu'à 12°C. La surface d'échange nécessaire serait trop grande et le coût trop élevé. Une efficacité de 80 % donne une eau en sortie à 25 °C. Pour la descendre à 12°C, il faudrait une surface d'échange de 1000 m<sup>2</sup>. Ici, elle est de 1,954 m<sup>2</sup> avec un échangeur à plaques corruguées.

### Calcul de l'échangeur : puissance thermique, surface d'échange

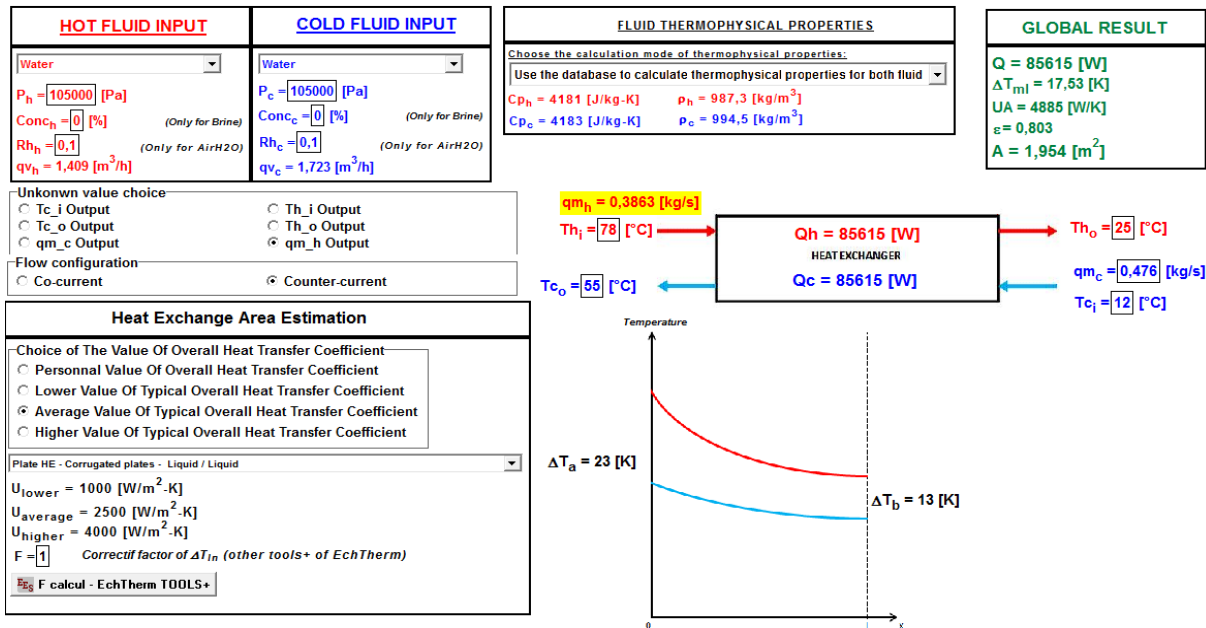
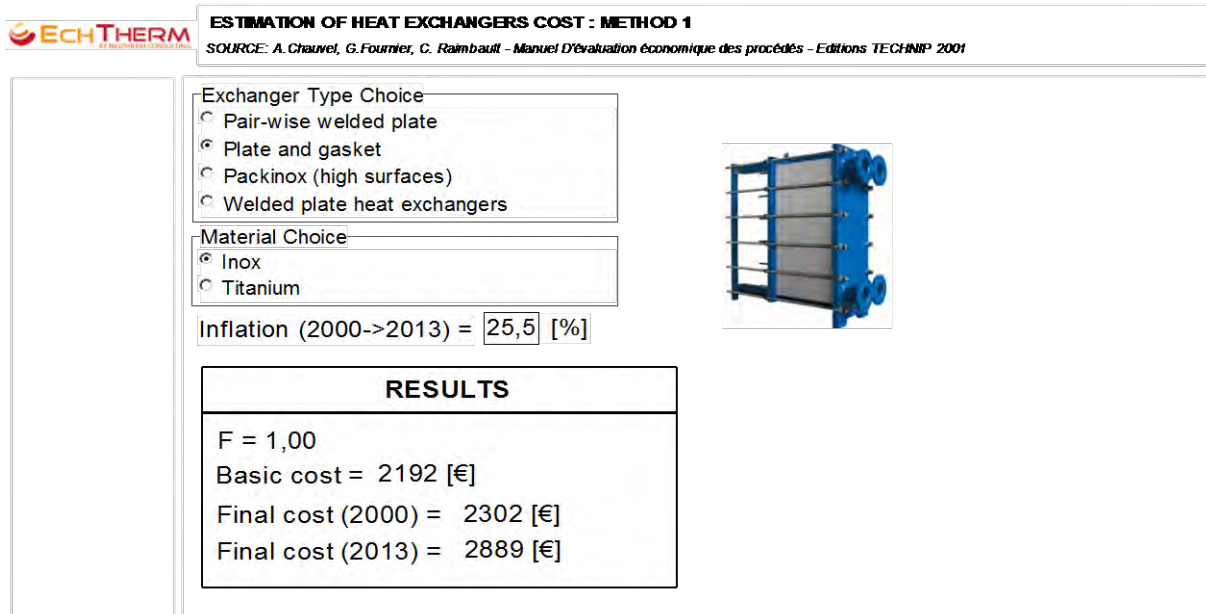


Figure 25 : CONSERVE, calcul échangeur récupérateur sur eau de refroidissement autoclave

### Calcul du coût de l'échangeur :



Exchanger Type Choice <input type="radio"/> Pair-wise welded plate <input type="radio"/> Plate and gasket <input type="radio"/> Packinox (high surfaces) <input checked="" type="radio"/> Welded plate heat exchangers	
Material Choice <input checked="" type="radio"/> Inox <input type="radio"/> Titanium	
Inflation (2000->2013) = 25,5 [%]	
<b>RESULTS</b>	
F = 1,00 Basic cost = 7446 [€] Final cost (2000) = 7819 [€] Final cost (2013) = 9812 [€]	

Figure 26 : CONSERVE, calcul de coût échangeur récupérateur sur eau de refroidissement autoclave, plaques et joints et plaques soudées

Au coût d'achat de l'échangeur est ajouté un coût d'installation, pris à 50 % du coût d'achat.

Investissement Echangeur	
Plaques soudées	14 718 €
Plaques et joints	4 334 €

Tableau 53 : CONSERVE, récupération sur eau de refroidissement autoclave : investissement échangeurs

Les économies d'énergie et CO<sub>2</sub> sont présentées dans le tableau suivant :

Nb heures fonctionnement (heures / an)	Economie d'énergie (GWh/an)	Emissions de CO2 évitées (tonnes / an)
5000	0,504	104

Tableau 54 : CONSERVE, récupération sur eau de refroidissement autoclave, économies d'énergie et CO2

Les économies financières réalisées ainsi que le temps de retour sur investissement sont présentés dans le tableau suivant :

Economies (€/an)	TRI brut (ans)	
17 627 €	Plaques soudées	0,83
	Plaques et joints	0,25

Tableau 55 : CONSERVE, récupération sur eau de refroidissement autoclave, résultats économiques

Dans un premier temps, il est important de formuler la remarque suivante : de nombreux sites de production du secteur de l'agroalimentaire ont été construits à une époque où l'énergie était bon marché. Ce contexte a amené les industriels à concevoir des procédés peu coûteux à l'investissement au détriment des coûts d'exploitation (à imputer en grande partie aux coûts énergétiques). Par exemple, il est courant de voir sur site industriel des ballons de stockage maintenus en température par de l'eau chaude ou de la vapeur ayant une température supérieure de plusieurs dizaines de degrés. Cela entraîne des surcoûts énergétiques. Il est donc important, avant de regarder les solutions possibles de récupération d'énergie, de vérifier si une amélioration ou remplacement des équipements en place ne permettrait pas de réduire les consommations énergétiques.

**La récupération de chaleur en amont des tours aéro-réfrigérantes de refroidissement de process ou de condenseurs de groupes froids, pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire ou d'eau d'appoint de chaudière est une solution énergétiquement et économiquement pertinente, d'autant plus qu'il existe une fiche CEE standard permettant une prime à l'investissement.** Cette récupération est souvent simple à mettre en place surtout dans le cas de TAR fonctionnant avec une boucle d'eau fermée. Les échanges liquides/liquides en jeu permettent d'atteindre des grands coefficients d'échange et donc des surfaces et des coûts d'échangeur abordables, d'autant plus que les conditions de température et de pression permettent souvent l'utilisation d'échangeurs à plaques et joints, très efficaces, compacts et présentant une facilité de nettoyage particulièrement appréciée dans le secteur de l'agro-alimentaire. La récupération de chaleur en amont d'une TAR permet par ailleurs de soulager celle-ci. Sa consommation électrique (pompe, ventilateurs) est moindre, entraînant des économies d'énergie et financières non négligeables (5 %), qui s'ajoutent aux économies générées par l'échangeur (50 %) et la PAC (45 %). La récupération de chaleur pour le préchauffage d'eau d'appoint de chaudière est à privilégier par rapport à un besoin d'eau chaude sanitaire, car ce dernier est généralement beaucoup plus faible que la chaleur récupérée, ne permettant pas ainsi de valoriser toute l'énergie.

La récupération directe sur la désurchauffe du fluide frigorigène d'un groupe froid pour la production d'eau chaude sanitaire est aussi pertinente. A la récupération d'énergie s'ajoute l'impact sur les performances et le fonctionnement du groupe froid : diminution des consommations électriques, modification de la charge en fluide frigorigène. Cependant, ce type de récupération se limite à des machines utilisant l'ammoniac.

Dans le cas de récupération de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire, la réglementation peut imposer d'avoir une étanchéité parfaite entre l'eau sanitaire et le fluide sur lequel la chaleur est récupérée. Cette étanchéité peut être assurée avec des technologies d'échangeur spécifiques (plaques soudées, double parois) ou avec des circuits intermédiaires. Ces deux possibilités entraînent des surcoûts.

La récupération de chaleur sur les compresseurs d'air, pour du chauffage de locaux est intéressante même pour un besoin de chauffage 5 mois dans l'année. Si les locaux à chauffer sont proches de l'atelier où se situe le compresseur, l'investissement nécessaire pour le gainage sera rapidement rentabilisé.

Les PAC sur colonnes de distillation, permettant de produire de la vapeur en utilisant comme source froide la condensation des vapeurs alcooliques peuvent amener à des économies d'énergie et financières très importantes, car ce sont souvent des opérations de fortes puissances gourmandes en énergie. La production de vapeur par PAC n'est cependant pour l'instant pas un système se basant sur des produits standards, l'investissement et donc le TRI sont difficilement évaluables.

La faisabilité technique des solutions PAC et/ou échangeur sur TAR, échangeur désurchauffe groupes froids, ainsi que la récupération sur compresseur d'air est réelle, avec des produits standards disponibles sur le

marché, et des aspects réglementaires et de sécurité maîtrisables. Ces solutions sont transposables dans la plupart des secteurs de l'industrie agro-alimentaire. La faisabilité technique de la solution PAC sur colonne de distillation est quant à elle plus délicate et reste à confirmer.

## LES SYSTÈMES DE REFROIDISSEMENT

Dans de nombreux cas, la récupération de chaleur se situe en amont d'un système de refroidissement nécessaire au process. Il est important d'avoir une vue d'ensemble sur ces systèmes : technologie, pincement, régime de température et puissance typique. Le tableau suivant regroupe ces informations pour les différents types de système de refroidissement rencontrés en milieu industriel :

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

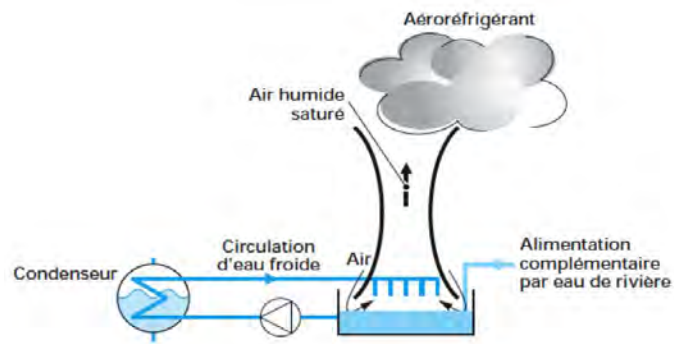
Notes:

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

Tableau 56 : caractéristiques techniques et thermodynamiques des différents systèmes de refroidissement industriel (centrales électriques exclues) (BREF, commission européenne)

Dans les secteurs représentés dans le projet VAREDIA, on va souvent retrouver des systèmes de refroidissement direct à eau, des aéroréfrigérants ou aéro condenseurs humide et sec.

### Aéro-réfrigérants humides à convection naturelle (boucle semi-fermée eau-air) :



Les aéro-réfrigérants humides à convection naturelle sont des boucles semi-fermées utilisant l'eau et l'air : l'eau sortant de l'échangeur refroidisseur (condenseur sur le schéma) se dirige vers une tour de refroidissement où elle est pulvérisée, refroidie par l'air puis réutilisée. Les besoins en eau y sont alors moins importants que dans le cas précédent, tout en proposant des performances thermodynamiques similaires. L'inconvénient majeur reste l'encombrement de ce type d'installation dont la hauteur des tours de refroidissement varie entre 50 et 220 m de haut pour des diamètres pouvant aller jusqu'à 200 m. On peut également noter une certaine dépendance géographique des performances de la tour de refroidissement (fonction de la température et l'humidité relative de l'air) et la nécessité d'un appoint d'eau causée par de légères pertes d'eau dans l'air. Ces technologies sont généralement utilisées pour dissiper des puissances thermiques supérieures à 100 MW<sub>th</sub>.

### Aéro-réfrigérant humide à convection forcée (a) :

Le principe de fonctionnement de cette catégorie reste le même que celui expliqué précédemment. Une telle technologie est plus adaptée aux faibles puissances thermiques à dissiper tout en réduisant la taille des tours de refroidissement en assurant la convection de l'air par l'intermédiaire de ventilateurs. L'encombrement est donc réduit mais une consommation électrique supplémentaire vient s'ajouter au bilan du cycle.

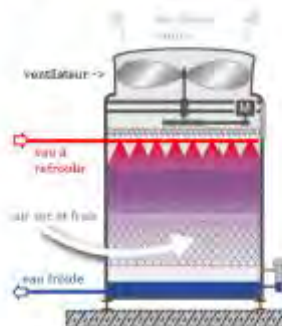




Figure 27 : aéro-réfrigérant humide (a) et aéro-condenseur sec (b)

### Aéro-condenseur sec (b) :

Cette dernière catégorie utilise l'air comme fluide de refroidissement directement à travers l'échangeur refroidisseur. Un volume d'air est brassé dans le condenseur du cycle vapeur afin de condenser le fluide moteur. Ce type de technologie présente l'avantage de s'affranchir du besoin en eau mais sera moins efficace qu'un système à eau (capacité calorifique, pincement. . .) et verra ses performances dépendre fortement de l'emplacement géographique considéré (température et humidité relative de l'air). Généralement, ces systèmes sont encombrants et entraînent une consommation auxiliaire assez importante lorsque de nombreux ventilateurs sont requis.

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

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

Tableau 3.2 : Exemple d'une comparaison de la demande énergétique annuelle directe et indirecte spécifique de plusieurs systèmes de refroidissement, et des conséquences pour les émissions de CO<sub>2</sub> par MW<sub>th</sub> [tm059, Paping, 1995]

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

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

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

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

Système de refroidissement	Utilisation moyenne d'eau [m <sup>3</sup> /h/MW <sub>th</sub> ]	Utilisation relative d'eau [%] <sup>1</sup>
Système à passage unique – direct	86	100
Système à passage unique – indirect	86	100
Tour de refroidissement ouverte par voie humide - direct	2	2,3
Tour de refroidissement ouverte par voie humide - indirect	2	2,3
Tour de refroidissement ouverte (hybride) par voie humide/sèche	0,5	0,6
Tour de refroidissement par voie humide en circuit fermé	variable	Variable
Tour de refroidissement par air sec en circuit fermé	0	0
Tour de refroidissement par voie humide/sèche en circuit fermé	1,5	1,7
<sup>1)</sup> hypothèse : capacité de refroidissement $\Delta T$ 10 K tour de refroidissement ouverte par voie humide : cycles de concentration entre 2 et 4 refroidissement ouvert par voie humide/sèche : 75 % fonctionnement par voie sèche Tour hybride en circuit fermé : fonctionnement par voie sèche allant de 0 à 25 %		

Le tableau suivant présente les avantages et inconvénients des échangeurs à plaques et joints et échangeurs soudés ou brasés :

Plaques			
Plaques et joints		Plaques soudées ou brasées	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- très bon coefficients de transferts thermiques</li> <li>- facilement démontable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pressions modérées<sup>1</sup></li> <li>- pressions différentielles entre les deux fluides modérées<sup>1</sup></li> <li>- températures assez faibles<sup>1</sup></li> <li>- problème d'étanchéité<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- domaine d'utilisation en terme de pression et température plus large que plaques et joints</li> <li>- étanchéité satisfaisante</li> <li>- plus compacts que tubes/calandre</li> <li>- pertes de charges moindre que tubes/calandres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- difficile à nettoyer (non adaptés aux fluides encrassants)</li> <li>- tensions mécaniques au sein du matériau<sup>3</sup></li> </ul>

Tableau 4-13. Avantages et inconvénients des échangeurs à plaques.

<sup>1</sup> Le point faible de ces échangeurs est effectivement la tenue des joints sous forte pression et dont la nature (téflon, élastomères divers...) est sensible à la température.

<sup>2</sup> non adaptés à l'échange entre deux fluides chimiquement incompatibles.

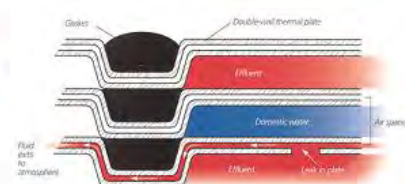
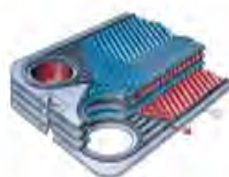
<sup>3</sup> Les plaques étant mécaniquement déformées, il apparait des tensions impliquant des risques importants de corrosion.

Les échangeurs à plaques brasées ont été conçus pour supporter des pressions et des températures élevées. Les échangeurs à plaques soudées sont utilisés pour traiter des pressions et des températures encore plus fortes.

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 ailetés	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 ? -

Plaqué à double paroi

Composée de plaques comprimées simultanément et soudées au laser sur le port, cette plaque est conçue pour les applications nécessitant une fiabilité totale contre le brassage. La défaillance d'une plaque entraîne une détection externe sans fuite interne. La seconde paroi assure une double barrière entre les fluides, répondant aux normes sanitaires locales.



## Condenseur d'un groupe froid



### Présentation de l'équipement

L'installation de réfrigération vise à retirer la chaleur d'un espace que l'on souhaite maintenir à une température inférieure à celle de l'air ambiant, et à rejeter cette chaleur. Un groupe froid est constitué des quatre éléments suivants :

- un évaporateur, à basse pression, où le réfrigérant capte la chaleur de la zone froide pour se vaporiser,
- un compresseur, qui amène la vapeur du réfrigérant à haute pression et provoque son échauffement,
- un condenseur, dans lequel le réfrigérant cède de la chaleur en se condensant,
- un détendeur, qui ramène le réfrigérant liquide à la pression d'entrée de l'évaporateur.

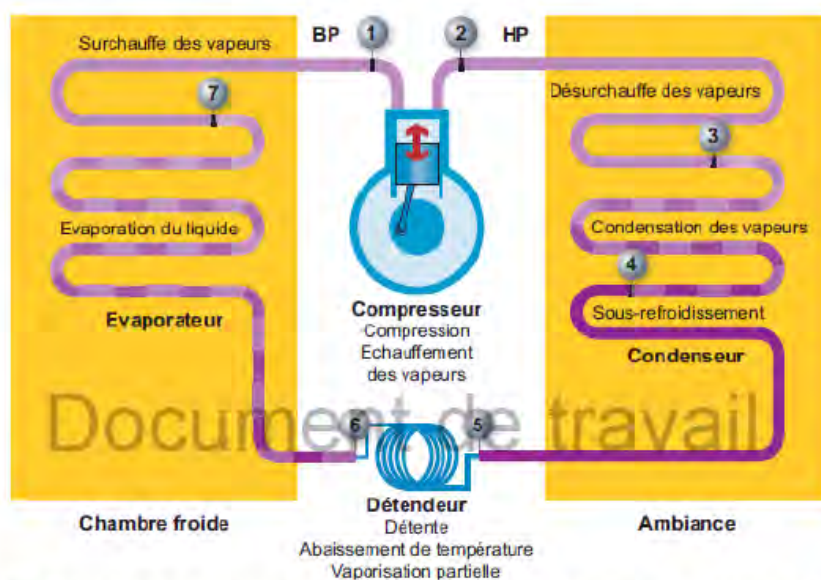


Figure 4 : Eléments d'un groupe froid (Source : CD Rom Energie +, <http://energie.wallonie.be>)

Il est possible de récupérer de la chaleur en sortie de compresseur :

- dans la partie du condenseur appelée « zone de désurchauffe ». La température du fluide réfrigérant y diminue progressivement avant d'atteindre la phase de liquéfaction. Le fluide peut atteindre une température de 110 à 120°C et permettre de produire de l'eau chaude à 70°C.
- lors de la phase de liquéfaction, de la chaleur est également rejetée, à une température plus faible (45 à 50°C). Le fluide de refroidissement du condenseur peut être de l'air ou de l'eau.



## Compresseur d'un groupe froid



### Présentation de l'équipement

L'installation de réfrigération vise à retirer la chaleur d'un espace que l'on souhaite maintenir à une température inférieure à celle de l'air ambiant, et à rejeter cette chaleur. Un groupe froid est constitué des quatre éléments suivants :

- un évaporateur, à basse pression, où le réfrigérant capte la chaleur de la zone froide pour se vaporiser,
- un compresseur, qui amène la vapeur du réfrigérant à haute pression et provoque son échauffement,
- un condenseur, dans lequel le réfrigérant cède de la chaleur en se condensant,
- un détendeur, qui ramène le réfrigérant liquide à la pression d'entrée de l'évaporateur.

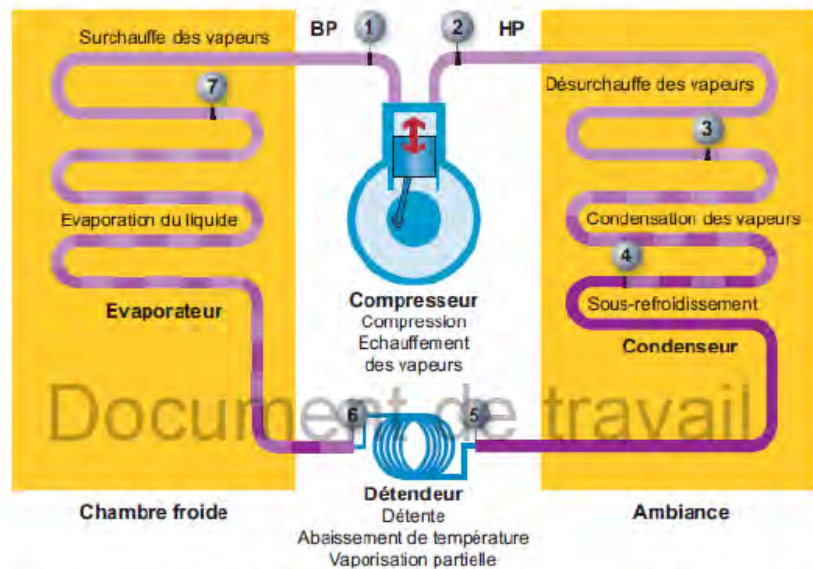


Figure 5 : Eléments d'un groupe froid (Source : CD Rom Energie +, <http://energie.wallonie.be>)

Il est possible de récupérer de la chaleur au niveau du compresseur :

- grâce aux calories contenues dans le fluide de refroidissement du compresseur (air, eau),
- lors du refroidissement de l'huile de lubrification d'un compresseur à vis. On peut ainsi produire de l'eau chaude à environ 60°C.

## Gisement de chaleur fatale

Vecteur de chaleur fatale	Classe de température	Valorisation	Technique de récupération de la chaleur fatale
Eau de refroidissement	35-95°C	S- Eau chaude de nettoyage	Echangeur de chaleur
	35-95°C	S – Préchauffage de l'eau d'alimentation d'une chaudière	Echangeur de chaleur
	35-95°C	S – Chauffage des locaux	Echangeur de chaleur
	35-95°C	S – Chauffage de l'eau chaude sanitaire	Echangeur de chaleur
Air de refroidissement	35-80°C	S – Chauffage des locaux	Utilisation directe
	35-80°C	S – (Pré)chauffage de l'air nécessaire à un procédé (Ex : séchage, pasteurisation, bains de lubrification)	- Utilisation directe - Echangeur de chaleur
Huile de lubrification (compresseur à vis)	50°C-80°C	S – Chauffage de l'eau chaude	Echangeur de chaleur
	50°C-80°C	S – Chauffage de l'eau de nettoyage	Echangeur de chaleur
	50°C-80°C	S – Préchauffage de l'eau d'alimentation d'une chaudière	Echangeur de chaleur

*I = interne : valorisation dans le procédé qui a produit la chaleur fatale – S = sur site : valorisation sur le site industriel mais dans un procédé différent – E = externe : valorisation à l'extérieur du site*

## Secteurs concernés

- Industrie
  - . Industries agro-alimentaires (Préparation de produits à base de viande, industries du lait, etc.)
  - . Sidérurgie
  - . Industrie du papier et du carton
  - . Industrie de la fonte, de l'acier et des métaux
  - . Industrie chimique
  - . Industrie du verre
  - . Industrie du caoutchouc et du plastique
  - . Industrie de la céramique (briques, tuiles et produits en terre cuite)

### Sources :

(ICEDD & ECONOTEC pour le compte du Service Public de Wallonie, 2010)

(CEREN, 2010)

(Région Wallone & UCL)

### Présentation de l'équipement

L'air comprimé est un fluide largement utilisé en milieu industriel. Il peut être utilisé pour alimenter des outils pneumatiques, en tant que fluide de nettoyage à sec, etc.

L'air comprimé est produit grâce à des compresseurs, dont la puissance peut varier d'une dizaine de kW à 300kW. Il existe différents types de compresseurs :

- Compresseurs à vis (lubrifiées ou non) : les compresseurs à vis lubrifiées sont les plus répandus sur le marché de par leur robustesse, leur simplicité et leur coût d'investissement légèrement inférieur.
- Compresseurs à pistons,
- Compresseurs à palettes,
- Compresseurs centrifuges,
- Etc.



Figure 6 : Schéma d'un compresseur à vis à injection d'huile (source : « Compresseurs d'air », ADEME)

80 à 90% de l'énergie électrique utilisée pour faire fonctionner le compresseur est convertie sous forme de chaleur. 50 à 90% de cette chaleur fatale peut être récupérée et utilisée pour chauffer de l'air ou de l'eau.

## Gisement de chaleur fatale

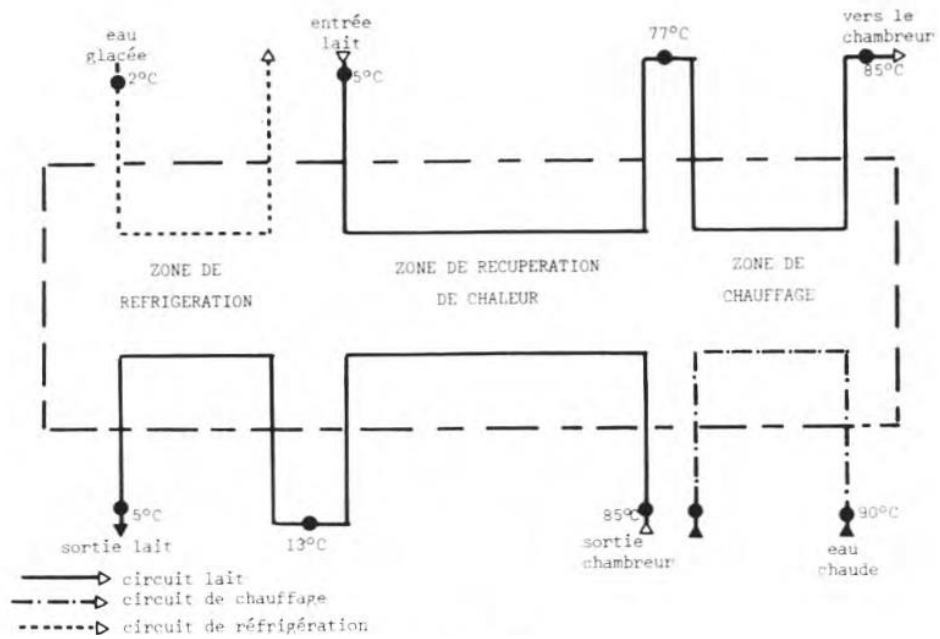
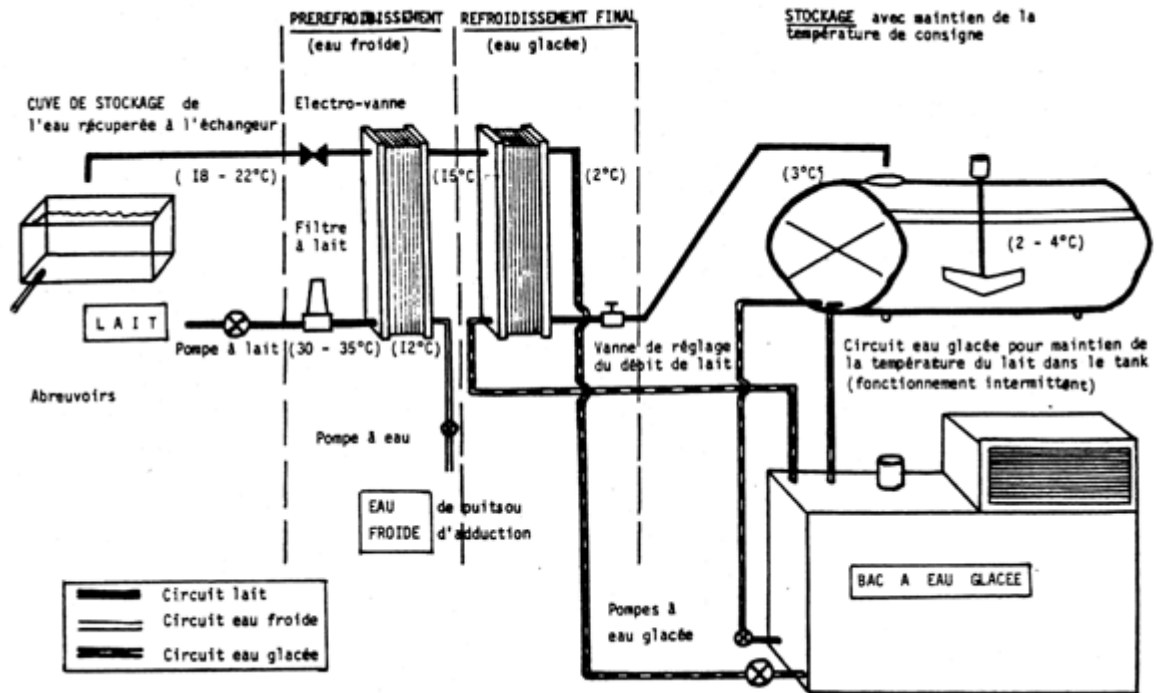
Vecteur de chaleur fatale	Classe de température	Valorisation	Technique de récupération de la chaleur fatale
Eau de refroidissement	35-95°C	S- Eau chaude de nettoyage	Echangeur de chaleur
	35-95°C	S – Préchauffage de l'eau d'alimentation d'une chaudière	Echangeur de chaleur
	35-95°C	S – Chauffage des locaux	Echangeur de chaleur
	35-95°C	S – Chauffage de l'eau chaude sanitaire	Echangeur de chaleur
Air de refroidissement	35-80°C	S – Chauffage des locaux	Utilisation directe
	35-80°C	S – (Pré)chauffage de l'air nécessaire à un procédé (Ex : séchage, pasteurisation, bains de lubrification)	- Utilisation directe - Echangeur de chaleur
Huile de lubrification (compresseur à vis)	> 100°C	S – Chauffage de l'eau chaude	Echangeur de chaleur
	> 100°C	S – Chauffage de l'eau de nettoyage	Echangeur de chaleur
	> 100°C	S – Préchauffage de l'eau d'alimentation d'une chaudière	Echangeur de chaleur

*I = interne : valorisation dans le procédé qui a produit la chaleur fatale – S = sur site : valorisation sur le site industriel mais dans un procédé différent – E = externe : valorisation à l'extérieur du site*

## Secteurs concernés

- Industries
  - . Industries agro-alimentaires (Brasseries, distillerie, transformation du café, fabrication de beurre, etc.)
  - . Sidérurgie
  - . Industrie de la fonte, de l'acier et des métaux
  - . Industrie de la céramique (briques, tuiles et produits en terre cuite)
  - . Industrie du verre
  - . Industrie chimique
  - . Industrie du caoutchouc et du plastique
  - . Industrie pharmaceutique
  - . Industrie du papier-carton







Certificats d'économies d'énergie

Opération n° IND-BA-12

## Système de récupération de chaleur sur une tour aéro-réfrigérante

### **1. Secteur d'application**

Industrie.

### **2. Dénomination**

Mise en place d'un système de récupération de chaleur en amont d'une tour aéro-réfrigérante (TAR) pour le chauffage ou le préchauffage d'eau chaude sanitaire, de fluides de process, d'eau de chauffage ou d'air.

### **3. Conditions pour la délivrance de certificats**

Les systèmes de refroidissement industriel concernés par cette fiche sont les suivants :

- TAR humide en circuit fermé ou ouvert (aussi appelée tour de refroidissement) ;
- TAR sèche en circuit fermé ou ouvert (aussi appelée aérocondenseur ou dry-cooler) ;
- TAR hybride (humide/sèche) en circuit fermé ou ouvert.

La puissance thermique évacuée à la tour doit être inférieure ou égale à 7 MW en particulier les TAR des centrales de production d'électricité sont exclues du domaine d'application.

La puissance thermique évacuée  $Q_{tar}$  (kW) est fournie par une note de calcul ou par la documentation technique du constructeur.

La puissance thermique récupérée  $Q_{recup}$  (kW) est fournie par une étude thermique de besoin d'énergie et de dimensionnement de l'échangeur, réalisée par un bureau d'étude ou un professionnel.

Le professionnel atteste que  $Q_{recup} < 0,7 * Q_{tar}$ .

Mise en place réalisée par un professionnel.

### **4. Durée de vie conventionnelle**

10 ans.



### 5. Montant de certificats en kWh cumac

		Régime de fonctionnement de l'installation <sup>(1)</sup>		Type d'utilisation <sup>(2)</sup>				
$Q_{\text{recup}}$ (kW)	X	1x8	0,25	X	Process	0,95	X	48 606
		2x8 avec arrêt le week-end	0,49		Confort	0,5		
		2x8 sans arrêt le week-end	0,67					
		3x8 avec arrêt le week-end	0,74		Mixte	0,85		
		3x8 sans arrêt le week-end	1					

$Q_{\text{recup}}$  est la puissance thermique récupérée en kW.

(1) Les régimes horaires mentionnés dans le tableau ci-dessus correspondent au fonctionnement de l'installation de récupération de chaleur et non pas au régime de travail du personnel.

(2) Le type d'utilisation correspond à celui de la chaleur valorisée récupérée sur la tour aérorefrigérante.



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° IND-UT-17

## Récupération de chaleur sur un groupe de production de froid

**1. Secteur d'application**

Industrie.

**2. Dénomination**

Mise en place d'un système de récupération de chaleur sur un groupe de production de froid afin de chauffer ou préchauffer de l'eau ou de l'air.

**3. Conditions pour la délivrance de certificats**

Mise en place réalisée par un professionnel.

**4. Durée de vie conventionnelle**

15 ans.

**5. Montant de certificats en kWh cumac**

L'installation est équipée d'un refroidisseur d'huile :

Récupération pour valorisation de la chaleur du condenseur :	$33\,100 \times P_{\text{compresseur(s)}}$
Récupération pour valorisation de la chaleur du désurchauffeur :	$5\,500 \times P_{\text{compresseur(s)}}$
Récupération pour valorisation de la chaleur du refroidisseur d'huile :	$5\,500 \times P_{\text{compresseur(s)}}$

L'installation n'est pas équipée d'un refroidisseur d'huile :

Récupération pour valorisation de la chaleur du condenseur :	$33\,100 \times P_{\text{compresseur(s)}}$
Récupération pour valorisation de la chaleur du désurchauffeur :	$11\,000 \times P_{\text{compresseur(s)}}$

$P_{\text{compresseur(s)}}$  est la puissance électrique indiquée sur la plaque du ou des compresseur(s) en kWél ou dans les données techniques du fabricant.

Si la chaleur est récupérée sur deux ou trois des organes du groupe froid, les certificats sont cumulables.



Certificats d'économies d'énergie

Opération n°IND-UT-03

## Récupérateur de chaleur sur un compresseur d'air comprimé

**1. Secteur d'application :**

Industrie.

**2. Dénomination :**

Installation d'un récupérateur de chaleur sur un compresseur d'air comprimé pour valorisation en procédé industriel (hors chauffage du bâtiment).

**3. Conditions pour la délivrance de certificats :**

Sans objet

**4. Durée de vie conventionnelle**

10 ans.

**5. Montant de certificats en kWh cumac**

Montant unitaire en kWh cumac/kW

**26 000 x P**

P = Puissance nominale du moteur

IS01-S – 17/10/06



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° IND-UT-09

**Récupérateur de chaleur sur un compresseur d'air comprimé pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire**

**1. Secteur d'application**

Industrie.

**2. Dénomination**

Installation d'un récupérateur de chaleur sur un compresseur d'air pour le chauffage de locaux ou la production d'eau chaude sanitaire sur un site industriel

**3. Conditions pour la délivrance de certificats**

Sans objet.

**4. Durée de vie conventionnelle**

10 ans.

**5. Montant de certificats en kWh cumac**

Réfrigérant	Mode de fonctionnement du site	Montant de certificats en kWh cumac				
		Puissance nominale du moteur (en kW)	Zone climatique			
			H1	H2	H3	
Récupération sur réfrigérant d'huile	1x8h	P	X	5 400	5 000	4 300
	2x8h			12 900	12 000	10 200
	3x8h avec arrêt le week-end			16 600	15 600	13 200
	3x8h sans arrêt le week-end			22 500	21 100	17 900
Récupération sur réfrigérant d'air	1x8h			5 500	5 200	4 400
	2x8h			13 200	12 400	10 500
	3x8h avec arrêt le week-end			17 100	16 000	13 600
	3x8h sans arrêt le week-end			23 100	21 700	18 400



France métropolitaine

**Départements en zone H1 :**

01	Ain	43	Haute Loire	71	Saône et Loire
02	Aisne	45	Loiret	73	Savoie
03	Allier	51	Marne	74	Haute Savoie
05	Hautes Alpes	52	Haute Marne	75	Paris
08	Ardennes	54	Meurthe et Moselle	76	Seine Maritime
10	Aube	55	Meuse	77	Seine et Marne
14	Calvados	57	Moselle	78	Yvelines
15	Cantal	58	Nièvre	80	Somme
19	Corrèze	59	Nord	87	Haute Vienne
21	Cote d'or	60	Oise	88	Vosges
23	Creuse	61	Orne	89	Yonne
25	Doubs	62	Pas de Calais	90	Territoire de Belfort
27	Eure	63	Puy de Dôme	91	Essonne
28	Eure et Loir	67	Bas Rhin	92	Hauts de Seine
38	Isère	68	Haut Rhin	93	Seine Saint Denis
39	Jura	69	Rhône	94	Val de Marne
42	Loire	70	Haute Saône	95	Val d'Oise



**Départements en zone H2 :**

04	Alpes Haute Provence	32	Gers	50	Manche
07	Ardèche	33	Gironde	53	Mayenne
09	Ariège	35	Ile et Vilaine	56	Morbihan
12	Aveyron	36	Indre	64	Pyrénées Atlantiques
16	Charente	37	Indre et Loire	65	Hautes Pyrénées
17	Charente Maritime	40	Landes	72	Sarthe
18	Cher	41	Loir et Cher	79	Deux Sèvres
22	Cotes d'Armor	44	Loire Atlantique	81	Tarn
24	Dordogne	46	Lot	82	Tarn et Garonne
26	Drome	47	Lot et Garonne	84	Vaucluse
29	Finistère	48	Lozère	85	Vendée
31	Haute Garonne	49	Maine et Loire	86	Vienne

**Départements en zone H3 :**

06	Alpes Maritimes	30	Gard
11	Aude	34	Hérault
13	Bouches Du Rhône	66	Pyrénées Orientales
20	Corse (I)	83	Var

(1) La Corse étant une zone non interconnectée au réseau métropolitain continental de transport d'électricité (ZNI), elle bénéficie d'un bonus : le montant des CEE est multiplié par deux (cf. ci-dessous)

DOM

971	Guadeloupe	974	Réunion
972	Martinique	976	Mayotte
973	Guyane	975	Saint-Pierre-et-Miquelon



Certificats d'économies d'énergie

Opération n° IND-UT-04

## Economiseur sur les effluents gazeux de chaudière de production de vapeur

### **1. Secteur d'application**

Industrie.

### **2. Dénomination**

Installation d'un économiseur sur les effluents gazeux de chaudières de production de vapeur de puissance comprise entre 1 et 10 MW alimentées au gaz naturel ou au GPL (hors chaudière de secours).

### **3. Conditions pour la délivrance de certificats**

Mise en place réalisée par un professionnel.

### **4. Durée de vie conventionnelle**

7 ans.

### **5. Montant de certificats en kWh cumac**

Combustible utilisé pour le fonctionnement de la chaudière	Mode de fonctionnement de « l'atelier » utilisateur de la vapeur produite par la chaudière				Puissance nominale de la chaudière en kW
	1x8	2x8, 6j/7	3x8 arrêt le week-end	3x8 sans arrêt le week-end	
Gaz naturel	240	540	660	960	X  P
GPL	250	570	690	1000	