

## Organic Rankine Cycle

RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE POUR LA  
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DANS L'INDUSTRIE ET  
APPLICATIONS EN ÉNERGIE RENOUVELABLE



Wallonie



économisons  
l'énergie



Source : Enertime

**CE QUE  
VOUS DEVEZ  
SAVOIR SUR LA  
RÉCUPÉRATION  
DE CHALEUR  
FATALE ...**

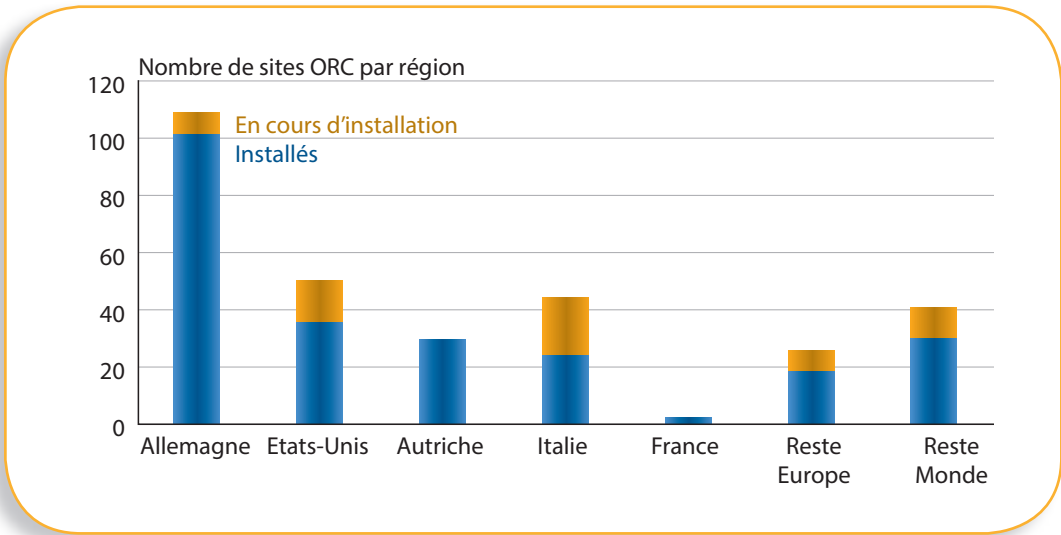
## Introduction

Ce cahier est le prolongement du cahier technique « Les récupérations de chaleur dans le process » qui abordait essentiellement les récupérations de chaleur pour des besoins en chaleur. Nous aborderons ici la récupération de chaleur pour la production d'électricité, optimisation qui peut avoir tout son sens dans certains cas, et notamment grâce au développement actuel de la technologie ORC (Organic Rankine Cycle). Cette technologie permet par ailleurs la valorisation électrique (et éventuellement thermique) d'autres sources de chaleur renouvelables comme la biomasse, le solaire à concentration et la géothermie.

### Développement des ORC

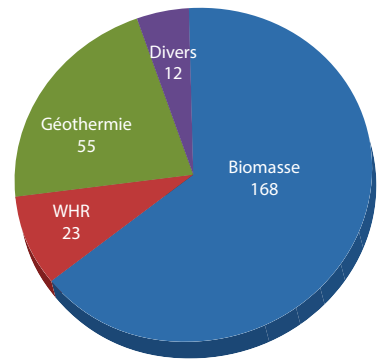
Après les premiers développements vers 1960, le marché des ORCs croît de façon exponentielle depuis les années 1980. De nombreux nouveaux fabricants d'ORC sont apparus sur le marché depuis les années 2005, avec de nouveaux produits et de nouvelles solutions.

De nombreuses installations ORC ont ainsi été mises en œuvre ces dernières années dans certains pays européens (Italie, Allemagne, France etc...). La puissance nette installée au niveau mondial est estimée à 1.8 GWe (mars 2014).



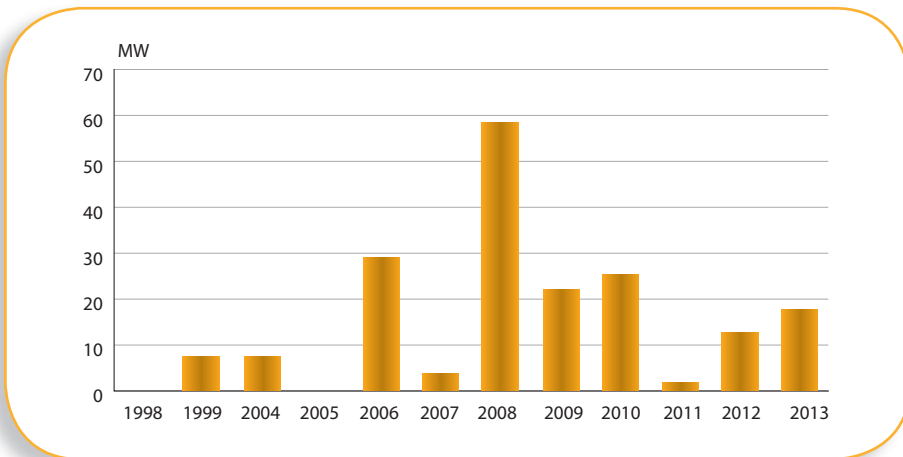
Répartition des références ORC par pays en 2009. Source : [www.cycle-organique-rankine.com](http://www.cycle-organique-rankine.com)

En termes de nombre d'installations, on distingue 3 marchés principaux : la géothermie, la cogénération biomasse et la récupération de chaleur. En 2009, près de 70% des systèmes ORC installés ou en cours de construction se trouvaient en Europe alors que 42% de la puissance installée était localisée aux USA (principalement des centrales géothermiques) (Enertime, 2013). Actuellement, le marché de la géothermie affiche la plus grande puissance installée cumulée (les centrales géothermiques sont caractérisées par des puissances allant de 10 MWe à près de 100 MWe). Toutefois, les ORC équipant des centrales de cogénération biomasse représentent les installations les plus nombreuses. Cela est surtout lié à une volonté politique promouvant les installations biomasse (via l'octroi de tarifs de rachat de l'électricité attractifs) en Allemagne, Italie et Autriche. Les différents fournisseurs sur le marché voient également le potentiel important existant dans l'industrie en termes de récupération de chaleur fatale. Le fournisseur Enertime cite ainsi « Rien qu'en France plus de 50MWe pourraient être installés dans les aciéries et plus de 15MWe dans les cimenteries (Source Société Française de Chimie, 2005) ».



Nombre de références dans le monde en fonction de la source de chaleur en 2009. Source : [www.cycle-organique-rankine.com](http://www.cycle-organique-rankine.com)

Un potentiel à partir d'énergie fatale existe aussi dans l'industrie wallonne !



Puissance installée dans le monde d'équipements ORC « Récupération de chaleur ». Source : Enertime

## Organic Rankine Cycle

Le premier chapitre de ce cahier fait ainsi un focus sur cette technologie de récupération de chaleur fatale, l'ORC. Les points suivants seront ainsi traités :

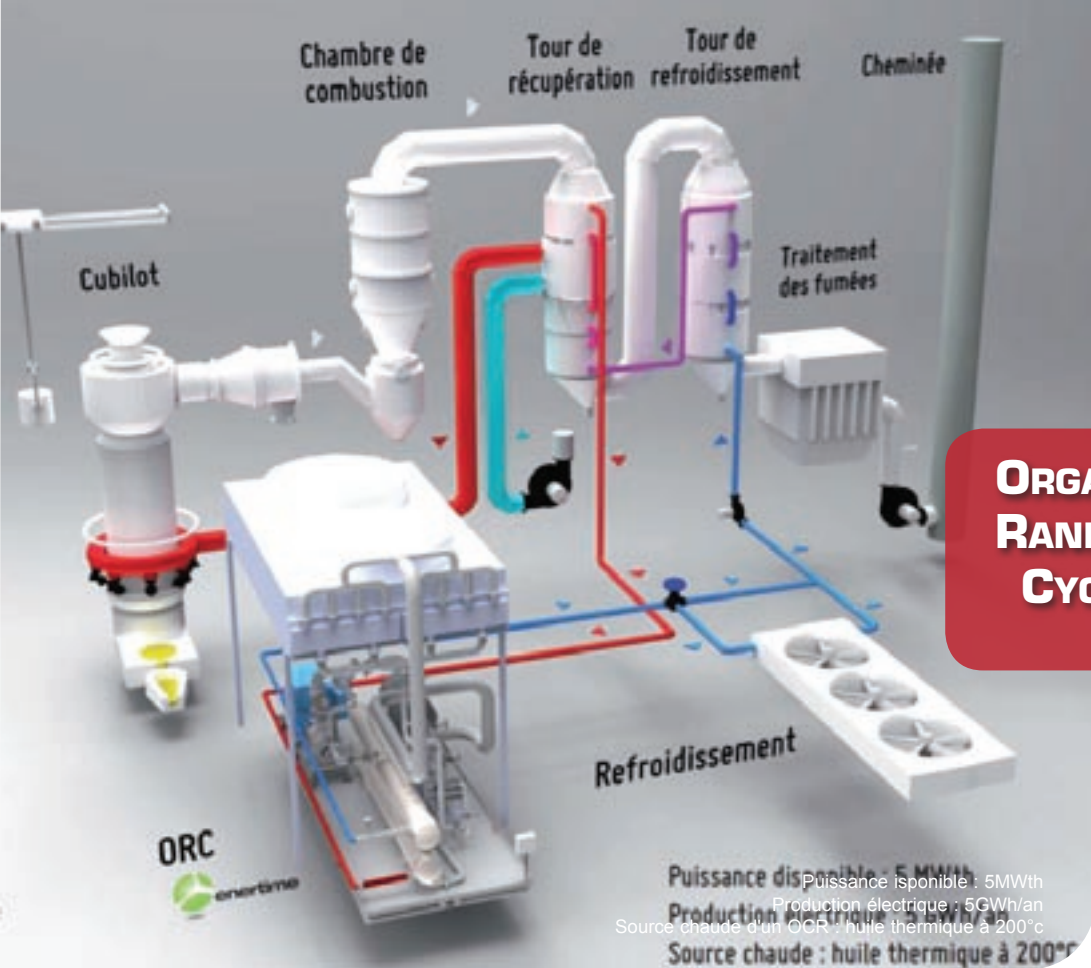
- Son principe de fonctionnement
- Son couplage à la source de chaleur et au système de refroidissement
- Ses éléments constitutifs
- Ses applications : outre la valorisation de la chaleur fatale, l'ORC permet l'exploitation de différentes sources d'énergie renouvelables (biomasse, géothermie, énergie solaire)

## Récupération de Chaleur fatale pour la production d'électricité dans l'industrie wallonne

Le deuxième chapitre traitera de la récupération de chaleur fatale, en présentant notamment les résultats de l'étude financée par la DGO4 et menée par l'ICEDD concernant l'élaboration du potentiel de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité dans l'industrie wallonne. Ce chapitre traite ainsi des points suivants :

- Les applications en industrie ;
- Le potentiel qualitatif (sectoriel) et quantitatif ;
- Les différentes technologies possibles.





# ORGANIC RANKINE CYCLE

Schéma d'un ORC. Source : Enertime

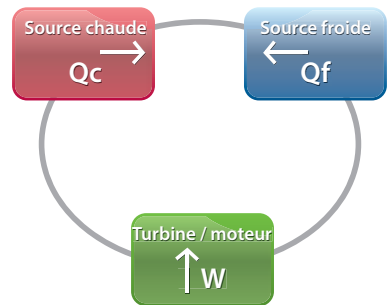
## Organic Rankine Cycle

### Le principe de fonctionnement

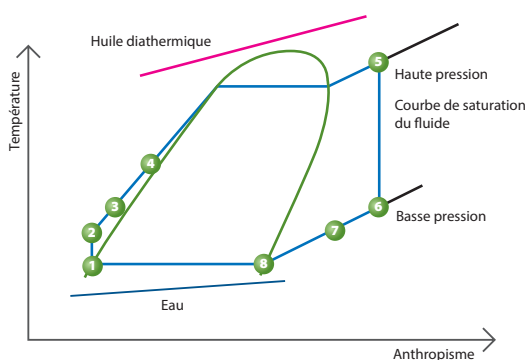
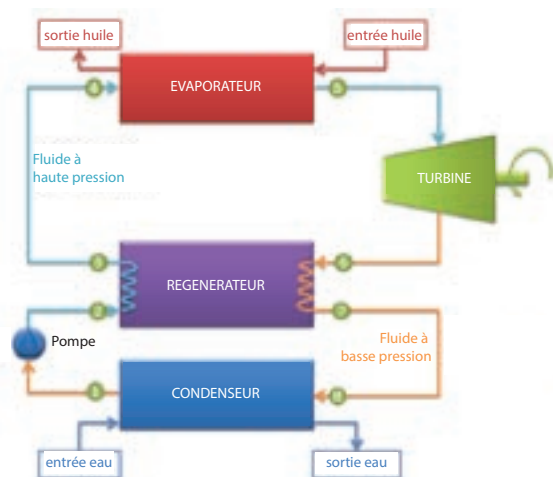
Le principe de base d'un ORC est celui d'une machine ditherme qui consiste à récupérer l'énergie thermique d'un fluide chaud en le refroidissant et de convertir une partie de cette énergie en énergie mécanique (et ensuite en électricité). Le rendement de conversion d'une machine ditherme, défini par le rapport de l'énergie électrique produite sur la quantité d'énergie thermique cédée par le fluide chaud, est limité par le second principe de la Thermodynamique au rendement de Carnot. Ce rendement de Carnot, égal au rapport de la différence de température entre la source chaude et l'environnement et de la température de la source chaude, augmente avec la température de la source chaude.

Les cycles Organiques de Rankine (ORC) sont basés sur le cycle de Rankine « classique » à la différence que le fluide de travail est non pas l'eau, mais bien un fluide organique (par exemple, un réfrigérant ou un hydrocarbure) caractérisé par température d'ébullition inférieure (à la même pression).

L'avantage des cycles ORC par rapport aux cycles de Rankine à eau dits « classiques » est de permettre une conception plus simple de la chaudière et de sa régulation lorsque le niveau de température de la source chaude est faible. Typiquement, la technologie ORC permet actuellement de récupérer la chaleur de sources chaudes dont la température est comprise entre 90°C et 300°C (seuils technico-économique car en théorie, l'ORC pourrait également récupérer la chaleur d'une source chaude à 28°C...). Pour un cycle à eau, ce seuil de rentabilité se trouve au delà des 400°C.



Principe cycle machine ditherme. Source : wikipedia



Cycle ORC. Source : openeering

## Cycle de Rankine

Un fluide de travail initialement à l'état liquide et à haute pression est chauffé (jusqu'à la température de vaporisation), vaporisé et éventuellement surchauffé grâce à une source chaude (évaporateur). La vapeur produite est ensuite détendue dans une turbine pour produire de l'énergie mécanique, puis ensuite de l'énergie électrique grâce à un alternateur. En sortie de turbine, le fluide à basse pression est éventuellement refroidi (jusqu'à la température de condensation), condensé et sous-refroidi (condenseur). La pompe véhicule le fluide à l'état liquide entre la sortie du condenseur (basse pression) et l'entrée de l'évaporateur (haute pression).

Un module ORC comprend 4 composants principaux : un évaporateur, une machine de détente, un condenseur et une pompe. En sortie de pompe, en l'absence de récupérateur sur le cycle, le fluide organique à l'état liquide à haute pression est dirigé vers l'évaporateur. Le fluide y est réchauffé jusqu'à la température d'ébullition, vaporisé et éventuellement surchauffé. La vapeur du fluide organique produite dans l'évaporateur (grâce à la chaleur cédée par la source chaude) est ensuite détendue dans la turbine pour produire de l'électricité. En fonction de la nature du fluide, en fin de détente, le fluide est soit à l'état de vapeur surchauffée (fluide sec) ou à l'état diphasique (fluide humide). Dans le cas de l'utilisation d'un fluide sec (type de fluide généralement utilisé), la détente dans la turbine ORC se fait en permanence à l'état de vapeur et il n'y a donc pas, à l'inverse du cycle de Rankine « classique » (utilisant l'eau, un fluide humide, comme fluide de travail), apparition de gouttelettes entraînant une érosion de la turbine. Cela permet ainsi de réduire les coûts de maintenance. De plus, en présence d'un fluide sec, il est possible de récupérer une partie de l'énergie thermique (sensible) de la vapeur de fluide organique et d'augmenter ainsi le rendement du cycle en préchauffant le fluide organique en sortie de pompe à travers un échangeur de chaleur appelé « récupérateur » ou « régénérateur » (cf. graphique). A la sortie du récupérateur, la vapeur passe alors dans le condenseur.

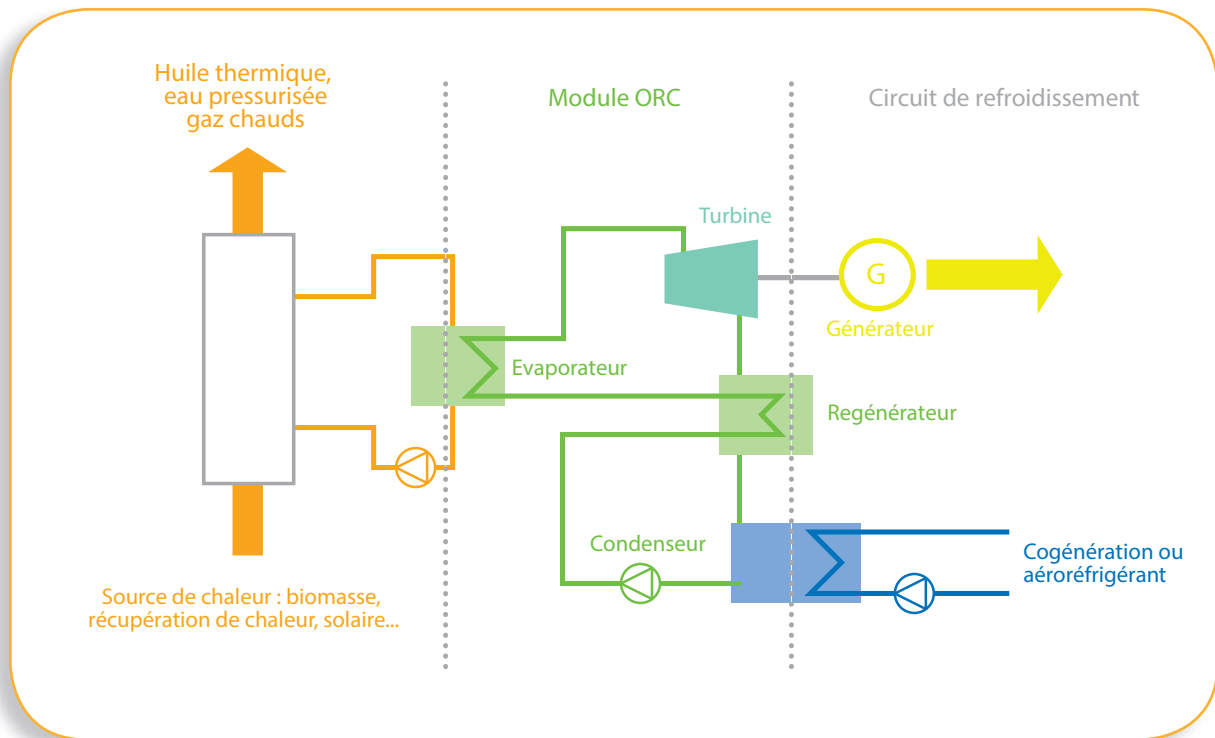
Dans le condenseur, le fluide est éventuellement refroidi jusqu'à la température de condensation (fluide sec), condensé et sous-refroidi. Notons que le sous-refroidissement peut être assuré par un échangeur spécialement dédié à cet effet. Le fluide à l'état liquide et à basse pression est ensuite amené à la haute pression au moyen de la pompe.

On l'a dit, le fluide utilisé est un fluide organique ; ce qui signifie un fluide issu de la chimie du carbone (chimie organique = chimie du carbone).

Le fluide organique utilisé est choisi notamment en fonction de la température de la source chaude. Il peut s'agir ainsi :

- De **réfrigérants**, tels que le HFC-134a (utilisé pour la récupération de chaleur à très basse température et la géothermie (sources chaudes <100°C)) ou le HFC-245fa (utilisé pour la récupération de chaleur à basse température (<170°C)) ;
- Des **hydrocarbures**, tels que le n-pentane (récupération de chaleur à basse température et centrales solaire (<170°C)) et le toluène (récupération de chaleur à haute température (<250°C)) ;
- Des **siloxanes** (chaînes carbonées possédant un ou plusieurs atomes de silicium), tels que l'OMTS (cogénération biomasse) (récupération de chaleur sur des sources typiquement entre 200 et 300°C).

À noter que le choix du fluide organique ne se fait pas uniquement en fonction de la température mais également en fonction d'une série d'autres paramètres à prendre en compte.



ORC : schéma de principe. Source : EnerTime

## Son couplage à la source de chaleur et au système de refroidissement

### La source de chaleur

L'évaporateur du cycle de Rankine peut être mis directement en contact avec la source de chaleur (« évaporation directe », c'est le cas notamment dans les centrales géothermiques) ou bien au travers d'une boucle « intermédiaire ». Cette boucle entre la source de chaleur et l'ORC est effectivement préconisée par la plupart des constructeurs d'ORC, en particulier si la source de chaleur est de type « fumées » ou si les niveaux de températures sont « trop élevés ». Cela est notamment dû au type de fluide organique utilisé ; la stabilité chimique du fluide peut être détériorée à haute température. Cette boucle est constituée d'un échangeur de chaleur additionnel et d'un fluide caloporteur. Ce fluide est généralement une huile minérale ou synthétique qui présente l'avantage de rester à l'état liquide à haute température et sous de faibles pressions. Dans certains cas, de l'eau sous pression peut être utilisée. L'utilisation d'un échangeur de chaleur intermédiaire et d'une pompe de circulation additionnelle se fait au détriment de l'efficacité globale du système. Dans le cas d'une centrale de cogénération biomasse, cette boucle intermédiaire permet de faciliter la conception de la chaudière, celle-ci étant dimensionnée pour réchauffer un fluide à basse pression. La conception de la chaudière d'un ORC est donc beaucoup plus simple que celle d'un cycle de Rankine classique pour lequel le dimensionnement doit répondre à des contraintes mécaniques et en température (vapeur à haute pression et haute température). En outre, l'utilisation d'une boucle intermédiaire améliore la capacité du système à gérer les brusques fluctuations possibles de la source de chaleur.

Si la source de chaleur est de l'huile thermique ou de l'eau chaude, ce circuit intermédiaire caloporteur peut être évité et l'échange entre l'évaporateur du module ORC et la source chaude peut être direct.

## Le circuit de refroidissement

Un circuit de refroidissement est nécessaire pour condenser (et éventuellement pré-refroidir et sous-refroidir) le fluide organique dans un module ORC.

La température du circuit de refroidissement est une donnée critique pour l'efficacité de l'installation : plus elle est basse, meilleur est le rendement. En effet, pour rappel, le rendement de Carnot est  $1 - T_f/T_c$  (température du puits froid sur la température de la source chaude).  $T_f$  devra donc être le plus bas possible ; et  $T_c$  le plus élevé possible (En pratique, le rendement dépend évidemment aussi de toute une série d'autres paramètres comme le type de fluide organique etc...). Dans le cas d'un condenseur refroidi à air, en considérant une température extérieure de 20°C, la température de condensation sera de l'ordre de 30°C. Par contre, si l'on souhaite travailler en mode cogénération et récupérer la chaleur du circuit de refroidissement, il faudra « remonter » la température de ce circuit vers 80-90°C. En cogénération, le rendement du module ORC est plus faible, mais le rendement global est plus élevé.

La technologie de refroidissement est aussi un paramètre important : un système de condensation à air (aérocondenseur ou encore aéroréfrigérant sec) consomme plus d'électricité qu'un système utilisant de l'eau (tour de refroidissement ou circuit d'eau ouvert (rivière, eau de puits...)). Etant donné les faibles rendements de conversion des modules ORC, la quantité de chaleur dissipée au condenseur est importante et il faut donc porter une attention particulière aux consommations des auxiliaires. Le système de condensation à air est évidemment par ailleurs dépendant de la température extérieure et peut donc ne pas être efficace en saison chaude. La disponibilité en eau du site d'implantation, permettant d'utiliser un système de refroidissement par eau, est donc également un élément important et permettant d'améliorer éventuellement l'efficacité de l'installation.

## **Les éléments constitutifs**

### **Les échangeurs de chaleur**

Un ORC comprend au moins deux échangeurs de chaleur (un évaporateur et un condenseur). Toutefois des échangeurs additionnels peuvent être utilisés au sein même de l'ORC, tels que le récupérateur ou le sous-refroidisseur. D'autres échangeurs peuvent également être utilisés également utilisés au niveau de la source et du puits de chaleur et parcourus par les fluides secondaires.

Il existe différents types d'échangeurs variant selon la forme, la compacité, les matériaux, la configuration des écoulements (contre-courant, co-courant, courants croisés, etc.) , ...

On peut citer les échangeurs à plaques, les échangeurs tubulaires, les échangeurs à tubes en U, .... Selon le type d'application, l'un ou l'autre sera privilégié.

Les échangeurs de chaleur doivent présenter les caractéristiques suivantes :

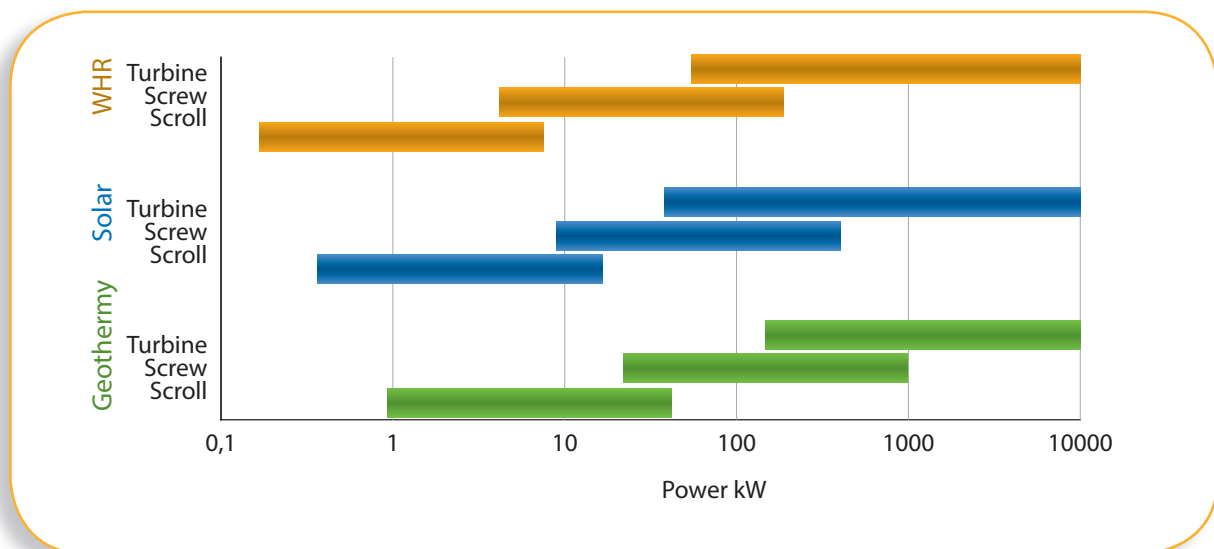
- Important coefficient de transfert de chaleur global, ce qui permet de minimiser toutes les différences de température entre la source chaude et le fluide travail et entre la source froide et le fluide de travail.
- Faibles pertes de charges, afin de limiter les consommations des auxiliaires (pompes et ventilateurs)



Dans le cas de récupération de chaleur sur des fumées, il est évident d'opter pour des échangeurs conçus pour supporter poussières et éléments oxydants. Les échangeurs à plaques et joints semblent connaître une limitation quant à leur utilisation dans des milieux « chargés » en particules. Une solution, pour ce cas des fumées encrassées, pourra être des échangeurs à tubes lisses, avec système de nettoyage. Notons qu'on trouve généralement des filtres sur les cheminées et qu'il peut alors être plus intéressant de placer le récupérateur en aval du filtre puisqu'on se retrouve alors avec des fumées « propres ». Dans le cas de fumées contenant du soufre, on veillera à ne pas descendre sous le point de rosée acide (100 – 180 °C selon les cas) afin d'éviter tout risque de corrosion.

### La machine de détente

La machine de détente est un élément important de l'ORC étant donné que son efficacité influence fortement la performance du système global. On distingue les machines volumétriques des turbomachines. Les premières sont mieux adaptées que les dernières à la gestion des plus faibles débits. Elles seront donc utilisées dans des systèmes ORC caractérisés par de plus faibles puissances installées. Parmi les machines volumétriques, on retrouve principalement des expandeurs à vis et dans une moindre mesure des expandeurs à spirales ou à piston. Quant aux turbomachines, elles peuvent être axiales ou radiales.



Optimum operating map for 3 expander technologies and 3 target applications (Purdue)

### La pompe

La pompe est un autre élément important de l'ORC. Contrairement aux systèmes fonctionnant avec l'eau comme fluide de travail, la consommation de la pompe d'un ORC peut représenter une fraction non négligeable de la puissance produite par la turbine. On veillera donc à utiliser une pompe présentant un rendement acceptable. D'autre part, la pompe joue un rôle essentiel dans le contrôle de l'ORC en dehors de son point de fonctionnement nominal en permettant d'ajuster le débit de fluide au travers du système. Finalement, on devra veiller à maintenir un NPSH suffisant en entrée de pompe afin d'éviter tout risque de cavitation.

## Puissance-Rendement

Lorsqu'un cycle ORC est utilisé en récupération de chaleur fatale, la différence entre la température du fluide chaud et le puits froid (l'environnement) est relativement faible, ce qui a pour conséquence de limiter le rendement de Carnot. Par exemple, un module ORC fonctionnant à basse température entre une source chaude à 150°C et un puits froid à 30°C (l'air) possède une efficacité d'environ 12% en production d'électricité (notons que le rendement de Carnot entre ces niveaux de température est de 28%). Autre exemple, le module ORCHID d'Enertime alimenté par une source chaude à 200°C et refroidi à 15°C, aura un rendement de 16%.

Le rendement va augmenter si la température de la source chaude augmente ou si la température du puits froid diminue. Ce rendement peut ainsi tout de même monter jusqu'à environ 24% pour les machines actuelles !

Dans le même ordre d'idée, si on souhaite travailler avec une source chaude à basse température (95°C), il est nécessaire d'avoir une source froide à basse température, c'est-à-dire typiquement un circuit d'eau froide à 15°C (rivière etc...). Si une telle source n'est pas disponible, il faudra travailler avec des aérorefrigérants. Le rendement est tout de même encore actuellement assez faible pour ces températures de source chaude.

En termes de puissance, les plus petits modules disponibles tournent autour de quelques kWe, les plus gros pouvant atteindre plusieurs dizaines de MWe (plus de détail au niveau des équipements disponibles sur le marché ci-dessous).

En fonctionnement, le module peut travailler en variation de charge. En-dessous d'une certaine charge le module s'arrête alors. Le taux de charge minimal varie fortement d'une machine à l'autre, et dépend généralement des paramètres de la machine de détente. Pour donner un exemple, nous citerons que le taux de charge minimale pour les installations réalisées par Enertime est de 10%.

## Les applications

La technologie de l'ORC peut être appliquée à la récupération de chaleur industrielle, mais également au renouvelable : solaire thermique, géothermie et biomasse. De manière générale, elle peut être utilisée pour des applications à « basse » température (soit en-dessous de 200°C).

### Récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité

Cette application a fait l'objet du deuxième chapitre de ce cahier.

Après renouvelable

### ORC et Solaire thermique

Les centrales solaires à concentration constituent en une centaine de miroirs concentrant les rayons du soleil vers un « collecteur ». Cela permet d'avoir une température de fluide caloporteur entre 100 et 1000°C.

Le système de génération de puissance le plus utilisé est le cycle de Rankine vapeur traditionnel, ou autrement dit la turbine vapeur. Toutefois, la turbine nécessite des températures élevées (l'efficacité diminue si la température descend en-dessous de 300°C) et l'investissement turbine est important. Le champ solaire doit donc être obligatoirement de taille importante. Pour des champs solaires plus petits ou à plus faible ensoleillement, la température du collecteur est plus faible (en-dessous de 300°C donc), l'ORC peut être utilisé pour produire de l'électricité. Ce type plus petit de centrale solaire à concentration pourrait être envisagé en France ou en Belgique...



Projet de géothermie profonde à Soultz-Sous-Forêts (Alsace)

## ORC et Géothermie

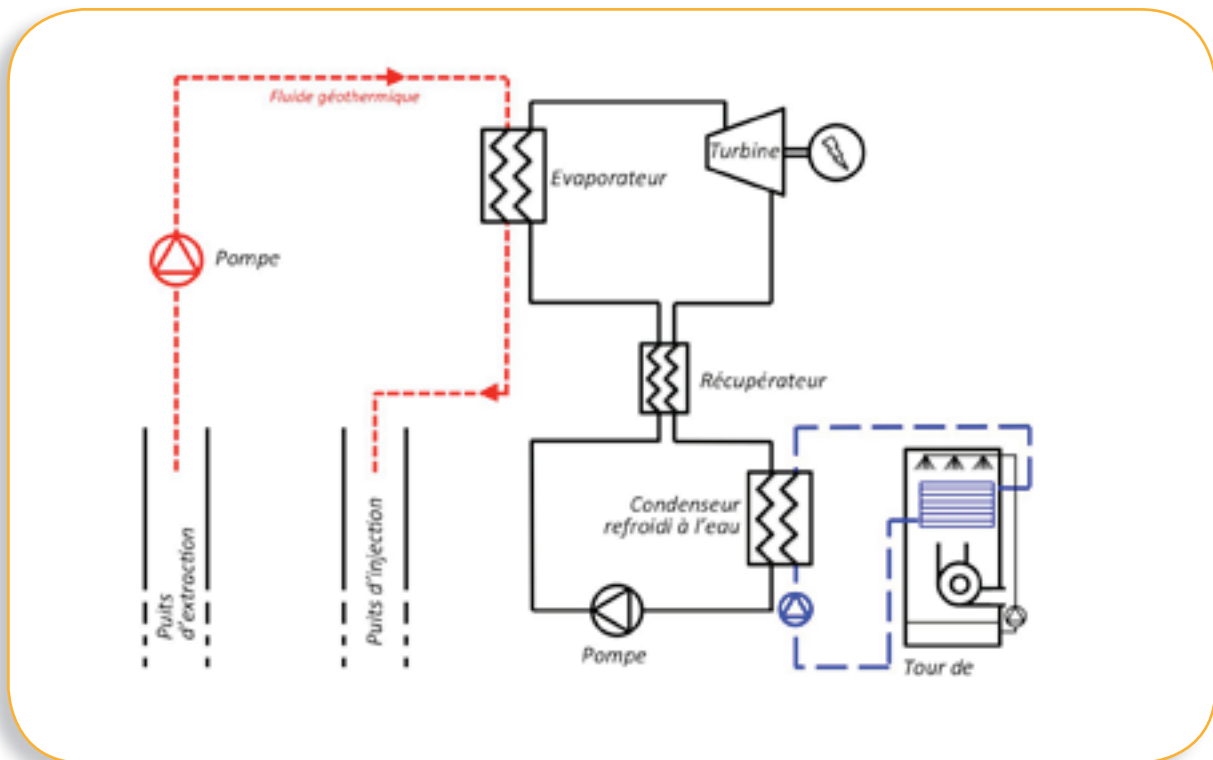
On distingue trois catégories de réservoirs géothermiques, en fonction de leurs niveaux de température :

- Très basse énergie (max 40°C) : les applications sont le chauffage des bâtiments par échange direct ou pompe à chaleur ;
- Basse énergie (entre 50°C et 80°C) : les applications sont le chauffage par géothermie profonde, typiquement pour l'alimentation d'un chauffage urbain ;
- Haute énergie (dès 100°C et jusque 200 et 250°C) : les applications sont ici la production d'électricité.

Par ailleurs, on peut également classer les réservoirs géothermiques en fonction de l'état du fluide géothermique : liquide pressurisé, mélange liquide/vapeur ou vapeur surchauffée (vapeur « sèche »).

Afin de valoriser cette chaleur, il existe plusieurs types de centrale notamment en fonction de la température et de l'état du fluide géothermique.

- Centrale à cycle direct : utilisée dans le cas où le fluide géothermique est de la vapeur « sèche » (elle est au-dessus du point de saturation et ne contient plus de gouttelettes d'eau). Cette vapeur est directement envoyée dans une turbine. Cette turbine pourra également être à condensation ou à contre-pression. Dans ce dernier cas de figure, la vapeur en sortie turbine pourra être récupérée chez un utilisateur de chaleur et on aura donc une cogénération.
- Centrale à cycle indirect à condensation : utilisée dans le cas où la vapeur est trop corrosive. Cette vapeur transmet alors sa chaleur à de l'eau douce qui sera envoyée dans la turbine.
- Centrales à cycle à vaporisation (centrales à simple flash ou double flash) permettent d'exploiter les sites où le fluide géothermique se présente sous forme de liquide pressurisé ou de mélange liquide-vapeur. C'est aujourd'hui le type de centrale le plus employé. Le fluide géothermique commence alors par être détendu dans une chambre à pression inférieure à celle du puits, ce qui permet d'en vaporiser une partie, qui est ensuite détendue dans une turbine. La phase liquide est quant à elle renvoyée vers le puits de réinjection.



Centrale à cycle binaire. Source : Thermodynamics and Energetics Laboratory Ulg – V.Lemort

- **Cycles de Kalina** : peut être utilisé alternativement à la centrale binaire. Le fluide de travail est un système « eau-ammoniac ».
- **Cycles combinés ou mixtes** : association d'une centrale direct ou à flash avec un ORC afin d'augmenter le rendement de récupération de l'énergie par rapport au rendement du cycle direct ou à flash. Le cycle ORC peut valoriser la chaleur du fluide géothermique à l'état liquide avant réinjection dans le sol.
- **Centrales à cycle binaire** : utilisées dans le cadre où le fluide géothermique est à plus basse température (entre 90 et 150°C) ou s'il présente une faible fraction de vapeur. On récupère alors la chaleur de ce fluide dans un ORC (grâce au fluide organique donc). Cette technologie est commercialement développée depuis le début des années 1980

(Pour des raisons environnementales, le fluide géothermique doit généralement être réinjecté dans le réservoir après utilisation, mais ce n'est pas toujours le cas).

Le condenseur de l'ORC est généralement refroidi à l'eau. La boucle d'eau est ensuite refroidie au moyen d'une tour de refroidissement ou d'un aérocondenseur. En présence de réservoirs géothermiques à haute température, il est possible de travailler en mode cogénération (par exemple en produisant de l'eau chaude au condenseur à 60°C, au détriment du rendement de l'ORC). L'utilisation d'un récupérateur sur le cycle peut être nécessaire pour éviter tout risque de précipitation de solutés au sein du fluide géothermique.



Low-Bin, low temperature prototype. Source : geoelec.eu

## Projet Low-Bin

Le projet européen Low-Bin débuté en 2003 vise à produire de l'électricité à partir de sources de chaleur à très basse température (moins de 100°C). Le consortium comprend des universitaires et scientifiques de différents pays européens et le constructeur italien Turboden.

Le module ORC développé au cours de ce projet utilise un réfrigérant appelé R134a dont les caractéristiques permettent la valorisation de sources à très basse température. Le prototype d'une puissance de 200kW est installé à Simbach-Brunau (à la frontière de

Par ailleurs, la géothermie, en combinaison avec l'ORC, est un domaine de recherche & développement. Citons ainsi 2 projets de ce type :

- Soultz-Sous-Forêts (Alsace)
- Low-Bin

## Projet Soultz-Sous-Forêts (Alsace)

Développement de la géothermie de type roches fracturées. Le principe vise à extraire la chaleur contenue dans les roches profondes (entre 3000 et 6000 m) par une circulation d'eau à travers les roches. L'eau ressort du puits à une température comprise entre 150 et 180°C. Un module ORC de 1,5 MWe, utilisant l'isobutane permet ensuite de valoriser cette chaleur.



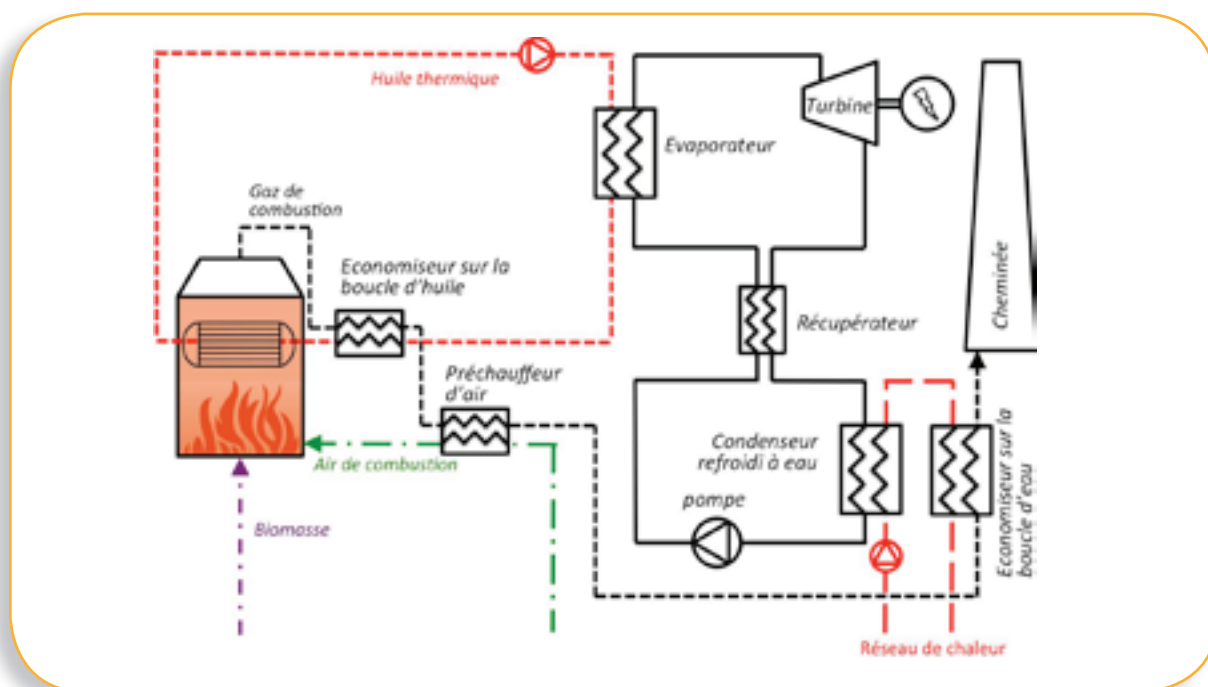
## ORC et Biomasse

**C'est la source de chaleur la plus répandue alimentant à ce jour les ORC au point de vue nombre d'installations.**

La biomasse est brûlée dans une chaudière à huile thermique. Cette huile à 320-330°C alimente ensuite un module ORC pour la production d'électricité. De manière à augmenter l'efficacité globale de la centrale de cogénération, un économiseur sur l'huile, un préchauffeur de l'air de combustion et un économiseur sur l'eau peuvent être utilisés.

Le fluide organique de l'ORC évolue lui entre des températures d'évaporation et de condensation respectivement de l'ordre de 280°C et de 120°C. Cela permet de produire au condenseur une eau chaude à 90°C qui peut donc également être valorisée à son tour (dans un réseau de chauffage urbain p.ex). On parle à ce moment de production combinée de chaleur et d'électricité ou plus simplement de cogénération.

Une centrale ORC à biomasse peut ainsi produire uniquement de l'électricité ou être à cogénération si on valorise la chaleur. Notons que dans la majorité des cas, de manière à maximiser la rentabilité économique de la centrale, celle-ci est pilotée sur la demande de chaleur (Moro, Pinamonti and Reini, 2008).



ORC et biomasse – source Thermodynamics and Energetics Laboratory Ulg – V.Lemort (voir image dans dossier source)

Cette technologie est toutefois évidemment en concurrence avec les centrales thermiques avec turbine à vapeur pour les applications de grandes puissances. Mais la centrale à ORC permet de rendre également possible la cogénération biomasse de petite puissance.

La biomasse, elle, peut être par exemple du bois ou des déchets verts. Ce type de centrale fonctionnant en mode cogénération est ainsi un exemple de production d'énergie pour les éco-quartiers.

D'un point de vue environnemental, l'installation de petites centrales biomasse est très intéressante car cela permet de réduire le rayon de collecte du combustible (et donc de diminuer le nombre de kilomètres parcourus par les camions).

Rappelons toutefois qu'il est nécessaire, au stade du projet, de mener préalablement une réflexion sur la priorité de l'utilisation de la ressource biomasse (ne brûlons pas le bois qui peut être utilisé comme matière première...).



Ecobloc type V sur une série de 5 fours à étage (puissance = 180 kW/four). Récupération de chaleur perdue des fours de cuisson. Source : ecopole.over-blog

## RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE

### Récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité

#### Les applications en industrie (en bref)

La chaleur fatale est, au sens premier, un rejet d'énergie thermique non récupéré.

En théorie, la chaleur fatale peut être valorisée sous forme de :

- chaleur
- électricité
- de chaleur et d'électricité

De manière générale, vu les inévitables pertes de rendements et les investissements à consentir, nous considérons que la priorité est de récupérer directement la chaleur pour combler des besoins thermiques lorsque c'est possible.

Si cette possibilité n'existe pas, il existe deux autres possibilités de récupération, en fonction du niveau de température de la chaleur fatale :

- Pour la chaleur fatale à basse température ( $<90^{\circ}\text{C}$ ), on pourra envisager une récupération par transfert direct ou via une pompe à chaleur (permettant de rehausser le niveau de température du flux de chaleur fatale);
- Pour la chaleur fatale haute température ( $>90^{\circ}\text{C}$ ), on pourra envisager une récupération pour production d'électricité ;

C'est cette dernière possibilité qui est traitée ici.

La « chaleur fatale disponible pour la production d'électricité » généralement connue, et étudiée jusqu'à présent dans les entreprises (verreries, cimenteries et certaines entreprises chimiques), se situe aux niveaux suivants :

- Fours
- Process exothermiques



Dans les verreries et cimenteries, il est assez clair que les besoins en chaleur autres que pour les fours sont faibles. Ainsi, la chaleur récupérée en sortie de fours est une chaleur « excédentaire » et pourrait être utilisée pour la production d'électricité.

Toutefois, en entreprise, la chaleur fatale, telle qu'on l'entend au sens premier, peut provenir de nombreuses sources.

Vu le développement des technologies de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité de petite puissance, les sources de chaleur, pour ce cas, pourraient être par exemple :

- Cheminée de chaudière ;
- Cheminée de four (chaudière) d'huile thermique ;
- Les retours condensats ;
- Les retours d'eau à des températures supérieures à 95°C (brasseries p.ex,...) ;
- Au niveau des postes de détente de vapeur ,...

Ces différents cas de figure se retrouvent fréquemment dans de nombreuses entreprises. Il est évident que la récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité peut y être « concurrente » à la récupération de chaleur pour les besoins en chaleur. Plus on va vers les entreprises moins intensives en énergie, plus cette « concurrence » sera importante. En effet, les installations qui « émettent » de la chaleur fatale sont de plus petites tailles : la puissance thermique est donc plus faible et donc plus facile à valoriser sous forme de chaleur, étant donné que les besoins en chaleur seront plus du même ordre de grandeur que ces rejets en chaleur et que, par ailleurs, les niveaux de température des rejets seront typiquement aux alentours des 100-150°C, et donc directement utilisables dans un échangeur pour valorisation de la chaleur.





Toutefois, lorsqu'il y a concurrence entre la récupération sous forme de chaleur et d'électricité, et si les niveaux de température le permettent, il peut être possible d'envisager également le fonctionnement en mode « cogénération », donc la « production » de chaleur et d'électricité, pour optimiser les rendements de récupération. En effet, les équipements de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité peuvent fonctionner en mode cogénération si on récupère la chaleur en sortie de ces équipements (que ce soit ORC, cycle de Rankine classique/cycle vapeur, ou moteur vapeur) et si cette chaleur est à un niveau de température suffisamment élevé pour être valorisée.

Sur cette base, on se rend compte qu'une installation de récupération de chaleur fatale peut être installée dans de nombreuses entreprises, en pouvant fonctionner, dans certains cas, en « mode cogénération ».

#### Remarques sur le fonctionnement en « mode cogénération »

Les possibilités de fonctionnement en « mode cogénération » sont nombreuses :

1. Au niveau d'un équipement dont l'objectif est de récupérer de la chaleur fatale actuellement non récupérée, et cela afin de produire de l'électricité mais également de réutiliser la chaleur en sortie de cet équipement dans l'entreprise ; On peut faire remarquer ici que l'idée initiale peut être uniquement de récupérer la chaleur pour des besoins en chaleur, et que, lors d'un nouveau projet d'optimisation ou de rénovation, l'idée d'un équipement produisant simultanément de l'électricité peut être évaluée pour optimiser le rendement de récupération.
2. Dans le cadre du remplacement d'un équipement qui réalise actuellement de la récupération de chaleur pour des besoins en chaleur ;
3. Eventuellement derrière une installation classique de cogénération : soit p.ex. l'installation d'un ORC derrière un moteur cogénération au gaz ou derrière un cycle à vapeur.

## POTENTIEL DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR FATALE



Cimenterie Heidelberg. Source : proparco

### Le potentiel de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité dans l'industrie wallonne

Un potentiel qualitatif a été élaboré préalablement à la construction du potentiel quantitatif.

#### Evaluation qualitative du potentiel – analyse sectorielle

Une analyse du potentiel de récupération de chaleur fatale a été réalisée sectoriellement.

#### Ciment (fédération Febelcem)

Le secteur du ciment représente les industries de production du ciment, les « cimenteries ». Ces entreprises possèdent un ou plusieurs fours de cimenterie.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA, 2009), en 2006, l'industrie du ciment a été responsable de 8% de la consommation énergétique industrielle mondiale et de 26% de ses émissions directes de CO<sub>2</sub>. Dans le processus global, la production des clinkers est le poste le plus énergivore. D'un point de vue économique, l'énergie représente de 20 à 40% du coût de production total (IEA, 2009).

Où se situe cette chaleur fatale ? Elle est présente dans les fumées en sortie de ces fours (température pouvant varier entre environ 200 et 350°C en fonction des cimenteries). Toutefois, il y a déjà une récupération de chaleur en sortie du four pour le préchauffage de la matière et de l'air de combustion mais toute la chaleur n'est évidemment pas récupérée. Cette récupération existante est très variable d'une cimenterie à l'autre suivant les spécificités du processus de production (voie sèche, voie humide, type de ciment produit...). Par conséquent, cette variabilité n'a pas pu être prise en compte dans le cadre de l'extrapolation réalisée pour la construction du potentiel quantitatif..

Par ailleurs, notons que généralement, les nouvelles cimenteries sont directement équipées d'une récupération de chaleur pour production d'électricité.

encart exemple cimenterie Heidelberg

### Récupération ORC sur la cimenterie Heidelberg à Lengfurt (Allemagne).

En récupérant 8.2 MWth hors de l'air de refroidissement des clinkers disponible à 275°C, une huile thermique est chauffée à 230°C. Cette huile alimente un module ORC fonctionnant au pentane et produisant 1.3 MWe, ce qui représente 12% de la puissance électrique consommée par la centrale (Legmann, 2002).

### Verre (Fédération FIV)

La Fédération de l'Industrie du Verre regroupe les entreprises qui produisent ou transforment le verre (verre plat, verre creux, verres spéciaux), ce qui nécessite l'emploi de fours industriels. Ce secteur présente un potentiel important.

Où se situe la chaleur fatale ?

- Dans les entreprises de production de verre (de tout type), les fumées en sortie des fours contiennent de grandes quantités de chaleur, (température supérieures à 600°C) qui vont à l'atmosphère. Il faut noter la présence d'épurateurs de fumées qui nécessitent une température en particulier. La température des fumées en sortie de l'épurateur tourne aux environs de 200-300°C ; ce qui permet encore une récupération de chaleur intéressante.
- Dans les autres entreprises (transformation du verre), nous avons, pour la construction du potentiel quantitatif, supposé, en première approximation, qu'elles avaient des fours et donc des fumées contenant de la chaleur fatale (température d'environ 200°C également en sortie d'épurateur)..

### Brique/céramique (Fédérations FBB et FediCer)

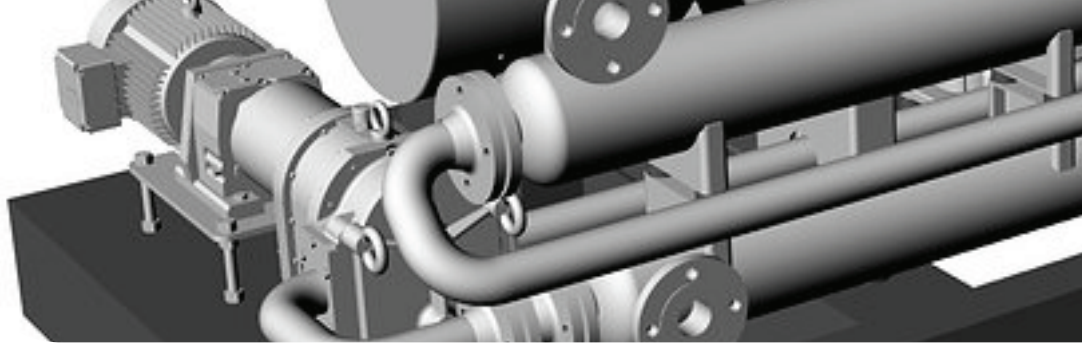
La production de brique et de céramique telle que la tuile nécessite l'emploi de fours. Néanmoins il a été constaté que les processus de production sont relativement différents d'une entreprise à l'autre notamment au niveau des étapes de séchage.

Où se situe la chaleur fatale ?

La chaleur fatale se situe au niveau des fumées en sortie de fours et au niveau des cheminées. Au sein de ces entreprises, il peut déjà y avoir une récupération de chaleur en sortie du four pour alimenter les séchoirs mais toute la chaleur n'est pas valorisée. La température des fumées après récupération pour Récupération de chaleur fatale est d'environ 200°C. Une limitation principale est induite par l'utilisation (obligatoire) de filtres sur les fumées tant au niveau de la briqueterie que de la tuilerie. Ainsi, en sortie de filtre, la température est typiquement de 175°C. Par ailleurs, la température minimale requise pour l'utilisation de filtres est de 130°C environ. Ainsi, une récupération peut être envisagée en amont du filtre sur un delta de température d'environ 200°C à 150°C, ou en aval du filtre sur un delta de température d'environ 175°C à 100°C.



Briqueterie de Ploegsteert. Source : energie.wallonie.be



### Sidérurgie (fédération GSV)

Vu les fermetures des phases à chauds de Charleroi et de Liège, le potentiel initialement repéré comme important s'est fortement réduit. La fédération pense qu'un potentiel non négligeable pour la filière reste de mise pour le domaine de la sidérurgie électrique, les températures en sortie de fours étant élevées (de l'ordre de 600°C pour certaines d'entre elles par exemple). Dans le cas de la sidérurgie « électrique », l'extrapolation pour la réalisation du potentiel « quantitatif » est faite à partir des consommations électriques et non combustibles.

Où se situe la chaleur fatale ?

Sur les fumées en sortie de fours voir au niveau des circuits de refroidissement alors sous forme d'eau chaude.

### Chimie (fédération essencia) :

Le secteur de la chimie est un secteur mixte dans le sens où il y aurait un potentiel dans certaines entreprises. Mais, de manière générale, c'est plutôt un secteur où les entreprises ont des besoins en chaleur et peuvent envisager une cogénération classique. Ainsi, les sous-secteurs de la pharmacie, films plastiques, savonneries ne présentent pas de potentiel. Pour les autres entreprises, une analyse cas par cas a été nécessaire.

Notons également que ce secteur compte de nombreuses entreprises de taille moyenne, que plusieurs d'entre elles réalisent déjà de la récupération de chaleur pour des besoins thermiques sur des process de taille moyenne. Il reste certainement encore un potentiel important en termes de récupération de chaleur pour des besoins thermiques et c'est également un secteur présentant des rejets importants de chaleur basse température (<90°C). Nous pensons ainsi qu'il y a un potentiel dans ce secteur pour la récupération de chaleur en mode « cogénération », ce qui n'a pas pu être quantifié dans cette étude.

Où se situe la chaleur fatale ?

On l'a dit, certaines entreprises présentent un potentiel en terme de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité : ce sont en général des entreprises possédant des processus avec réactions exothermiques (rejets en chaleur avec des températures aux environs généralement de 100-200°C).

### Fediex

Le secteur carrier (fédération Fediex) ne présente a priori pas de potentiel. Les entreprises « extractives » ont toutes un potentiel proche de zéro car il n'y a pas de sources de chaleur. Pour les entreprises préparant de l'asphalte ou des enrobés bitumeux, les sources de chaleur potentielles fonctionnent de manière intensive, à pleine puissance, mais de manière relativement discontinue dans le temps, ce qui conduit à une rentabilité financière défavorable dans la majorité des cas.

### Chaux et dolomies

La production de chaux et de dolomies nécessite une phase à chaud, les températures atteintes au sein des fours à chaux sont supérieures à 900°C pour la préparation de chaux et à 1400°C pour la dolomie.

Où se situe la chaleur fatale ?

La chaleur fatale se situe en sortie des fours au sein des deux processus de production de chaux ou dolomie.

### Alimentaire (fédération FEVIA)

Le secteur de l'alimentaire est un secteur mixte dans le sens où il y aurait un potentiel dans certaines entreprises. Ainsi, selon notre enquête, les sous-secteurs suivants sont ceux présentant un potentiel : les brasseries, les entreprises de transformation de la viande, les entreprises de transformation de la pomme de terre et les boulangeries.

Où se situe la chaleur fatale ?

Il s'agit généralement de la chaleur des fumées en sortie de fours (de cuisson etc...). Dans les brasseries par contre, il s'agit plutôt des excédents d'eau chaude. La température de ces rejets se situe donc typiquement aux alentours des 90 à 150°C.

Il est important de noter que les entreprises de ce secteur sont généralement des entreprises de taille moyenne et que les processus concernés sont plutôt de « petite taille » (plusieurs fours dans une entreprise etc...). Ne connaissant quasiment pas la filière de récupération étudiée ici, les entreprises n'ont pu communiquer des données de débit de fumées ou même de température de fumées. Plusieurs entreprises réalisent déjà de la récupération de chaleur pour des besoins en chaleur mais il reste certainement encore un potentiel important à ce niveau. C'est également un secteur présentant des rejets importants de chaleur basse température.

### Bois/Ameublement (fédération Fedustria)

A priori ici, le potentiel serait nul. Les entreprises du secteur n'ont pas de rejet de chaleur « fatale » mais ont des besoins de chaleur. L'entreprise la plus intensive en énergie possède une cogénération.

### Textile (fédération Fedustria)

Pour ce secteur, a priori, pour ce secteur, le potentiel est nul.

Toutefois, certaines entreprises possèdent des fours et il y a probablement encore un potentiel en termes de récupération de chaleur pour des besoins thermiques. De ce fait, il existe peut-être un potentiel en terme de récupération de chaleur pour la production d'électricité en mode « cogénération »

## Installation ORC dans une fonderie par Enertime

Parmi les systèmes en opération, on peut citer l'ORC installé par la société Enertime dans une fonderie pour valoriser la chaleur contenue dans les gaz en sortie d'un cubilot (Enertime, 2013; Gantiez et al., 2014). Initialement, les gaz chauds ( $\pm 850^{\circ}\text{C}$ ) étaient utilisés pour préchauffer l'air de combustion en entrée du cubilot ( $450^{\circ}\text{C}$ ). Ils étaient ensuite refroidis jusque  $180^{\circ}\text{C}$  au moyen d'une boucle d'huile et traités avant évacuation à la cheminée. La chaleur transférée à la boucle d'huile était ensuite dissipée au moyen d'une tour de refroidissement. Actuellement, en conditions de design, 5,6 MWth sont extraits hors des gaz de combustion ce qui permet de chauffer de l'huile à une température proche de  $200^{\circ}\text{C}$ . Cette chaleur est à présent valorisée au moyen d'un ORC. En considérant une température d'air de  $15^{\circ}\text{C}$ , l'ORC est conçu pour délivrer une puissance brute de 960 kWe et une puissance nette de 870 kWe (la consommation des auxiliaires tient compte de la consommation des ventilateurs des condenseurs). Le module ORC pourrait couvrir 30% de la consommation annuelle en électricité de la fonderie.



ORC module ORCHID, 1 MWe installé à la fonderie FMGC, Soudan - Loire-Atlantique. Source : ENERTIME

### Fonderies (fédération Agoria)

Les fonderies possèdent des fours thermiques nécessaires à la production de la fonte. Néanmoins certaines fonderies ne possèderaient toutefois pas de débit de fluide fatal (fumées) suffisant.

Où se situe la chaleur fatale :

En sortie de fours, sur les fumées..

### Fabrications métalliques et électriques (fédération Agoria)

Ce secteur n'est pas homogène, les entreprises ont des secteurs d'activité et produits différents. Certaines d'entre elles ont des besoins de chaleur et possèdent déjà des installations cogénérations de puissance importante. Les câbleries quant à elles n'auraient pas de rejets significatifs. Selon la fédération il n'existe pas de potentiel au sein de ce secteur.

Néanmoins certaines entreprises possèdent des fours pour le traitement thermique par exemple. Il existe donc une source potentielle de chaleur fatale à ce niveau mais sans doute pourrait-elle être récupérée sous forme de chaleur directement. De plus le fonctionnement de ces fours peut être discontinu. Un potentiel « en mode cogénération » pourrait être étudié.

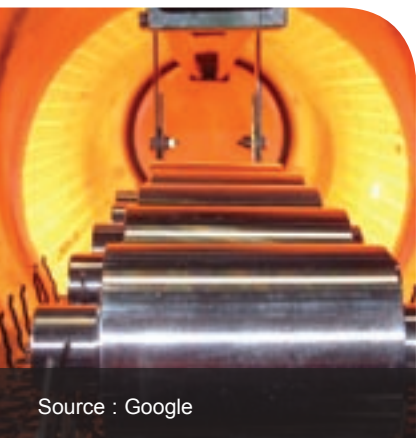
### Non-ferreux (fédération Agoria)

Selon la Fédération et des spécialistes du secteur le potentiel serait nul. Nous pensons néanmoins qu'il se pourrait qu'un potentiel soit possible pour la filière ORC en mode « cogénération » mais celui-ci, n'est pas identifiable au sein de l'étude.

### Papier (fédération Cobelpa)

A priori, pour ce secteur, le potentiel est nul. Les entreprises du secteur ayant des besoins de chaleur ont installé des cogénérations.

Toutefois, il y a probablement encore un potentiel en termes de récupération de chaleur pour des besoins thermiques (récupération directe ou via pompe à chaleur).



Source : Google

**Le traitement thermique des fours. Quel potentiel de chaleur fatale ?**

## Imprimeries et Industries graphiques (fédérations Fetra et Febelgra)

A priori, pour ce secteur, le potentiel est nul.

Certaines entreprises possèdent des processus émettant de la chaleur et il y a probablement encore un potentiel en termes de récupération de chaleur pour la chaleur. De ce fait, il existe peut-être un potentiel en terme de récupération de chaleur pour la production d'électricité en mode « cogénération ».

### Synthèse

Secteurs	Niveau de température de la chaleur fatale	Récupération de chaleur fatale pour Production d'électricité seule	Récupération de chaleur fatale pour Production d'électricité et utilisation chaleur (mode cogénération)
Ciment	Entre 200 et 350°C en sortie fours	Potentiel existant	Potentiel existant probablement
Verre	Environ 600°C en sortie fours ; 200-300°C après l'épurateur	Potentiel existant	Potentiel existant
Brique/Céramique	environ 200°C en sortie fours – ou 175°C après épurateur	Potentiel existant	Potentiel existant probablement
Sidérurgie	600°C en sortie fours	Potentiel existant	Potentiel existant probablement
Chimie	Très variable étant donné la diversité des process – environ 200_°C max	Potentiel existant	Potentiel existant
Industries extractives	NA	Potentiel nul	Potentiel nul
Carmeuse/Lhoist	NA	Potentiel existant	
FEVIA	Entre 90°C et 150°C	Potentiel très faible	Potentiel existant dans certains sous-secteurs
Bois et ameublement	?	Potentiel nul	Potentiel existant éventuellement
Textile	?	Potentiel nul	Potentiel existant éventuellement
Fonderies	850°C	Potentiel existant	
Fabrications métalliques et électriques	?	Potentiel nul	Potentiel existant éventuellement
Non-ferreux	?	Potentiel nul	Potentiel existant éventuellement
Papier	?	Potentiel nul	Potentiel existant
Imprimeries et Industries graphiques	?	Potentiel nul	Potentiel existant éventuellement

## Evaluation quantitative du potentiel

Pour la construction de ce potentiel quantitatif, nous avons considéré les cas les plus « traditionnels » et prometteurs de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité, soit généralement la récupération de chaleur sur des processus de fours ou de réacteurs exothermiques, via un équipement ORC ou turbine vapeur.

Nous n'avons pas pu descendre au niveau des plus petites installations où il pourrait éventuellement être envisageable d'installer un moteur vapeur ou un ORC de petite puissance (typiquement pour les équipements d'environ 10 kWé). En effet, d'une part les données ne sont pas disponibles et d'autre part, nous sortions des limites de l'étude.

Ci-dessous, un tableau résumant le potentiel wallon pour la production d'électricité via la récupération de chaleur « fatale ». Si l'on calcule le rapport entre la consommation combustible du secteur industriel wallon et la chaleur « récupérée », on obtient 6.2%. Rappelons qu'il s'agit d'émissions de chaleur récupérable de plus de 100°C et qui ne pourraient à priori pas être utilisées sous forme de chaleur.

NB : Les données de consommations énergétiques sont extraites du « Bilan énergétique industriel wallon 2010 ».

	Cons. combustible (GWh PCI)	Cons. électrique (GWh PCI)	Chaleur récupérée (GWh)	Production électrique (GWh)
Sidérurgie	8422	2842	244,3	42,8
Non ferreux	147	84	0,0	0,0
Chimie	5720	3091	760,6	153,0
Minéraux non métalliques				
Ciment	5508	737	574,1	94,0
Verre	3104	0	230,0	40,5
Autres (chaux, dolomies, bri- quetterie, tuilerie)	4102	552	422,4	67,0
Alimentation	3824	1058	7,3	0,8
Textile	139	151	0,0	0,0
Papier	2875	815	0,0	0,0
Fabrications métalli- ques et fonderie	964	591	3,2	0,3
Autres industries	1230	577	0,0	0,0
<b>Somme</b>	<b>36124</b>	<b>11100</b>	<b>2249</b>	<b>398</b>

**Rapport Chaleur récupérée / Consommation combustible globale pour l'industrie : 6,2%**

Tableau 1 : résultats sectoriels. Source : ICEDD



## Les technologies

On peut distinguer différentes technologies permettant de récupérer la chaleur fatale et de la valoriser sous forme d'électricité. L'utilisation de l'une plutôt que l'autre dépendra principalement de la température de la source de chaleur disponible. Le cycle de Rankine « classique » est une technique largement répandue pour la production d'électricité mais néanmoins en pratique elle nécessite un niveau de température suffisamment élevé. Cette technologie bien qu'éprouvée possède certaines limitations dues notamment au fluide technique utilisé, l'eau. Pour valoriser les rejets thermiques dont les niveaux de température et/ou puissances thermiques mises en jeu sont plus faibles, la technologie de l'ORC (Cycle Organique de Rankine) s'est développée.

Les technologies disponibles actuellement pour la production d'électricité à partir d'une source de chaleur « fatale » sont :

- L'ORC – cycle organique de Rankine,
- La turbine vapeur,
- Le moteur vapeur.

Note : nous avons ci-dessous donné des informations techniques de dimensionnement des différentes technologies. Ces données chiffrées sont données à titre indicatif afin de donner une idée au lecteur des gammes de puissance de chacune des technologies, et des températures de source chaude nécessaires, ainsi que des ordres de grandeur de rendements. Il est évidemment nécessaire de contacter les fournisseurs d'équipements afin d'obtenir les caractéristiques propres à chaque machine et à jour.

### ORC

Cette technologie fait l'objet du chapitre précédent « ORC » de ce cahier technique.

### Turbine

Le principe de base de la récupération de chaleur pour production d'électricité à l'aide d'une turbine vapeur est le suivant :

Un échangeur, appelé ici chaudière de récupération, est installé sur le fluide dont on souhaite récupérer les calories. Cette chaudière produit de la vapeur qui est envoyée dans une turbine. La turbine va ensuite détendre la vapeur tout en produisant de l'électricité via l'alternateur.



Maintenance turbine. Source : Siemens

Il existe trois types de turbine :

- La turbine vapeur à condensation qui va maximiser le rendement de production électrique en condensant la vapeur en sortie turbine. La chaleur en sortie turbine est ainsi à trop basse température pour être généralement récupérée.
- La turbine vapeur à contre-pression : la vapeur haute pression à l'entrée de la turbine est détendue à basse pression de telle sorte que la vapeur en sortie turbine puisse être réutilisée par l'entreprise en étant injectée dans son réseau vapeur. Nous parlerons ici d'un fonctionnement en mode « cogénération ». Ce type de turbine a une configuration assez simple et possède de ce fait un coût/kWe installé assez intéressant. Son rendement global est élevé mais son rendement électrique est par contre assez bas.
- La turbine vapeur avec soutirage : c'est en général une turbine à condensation où l'on réalise un soutirage vapeur entre deux étages de turbine. Cette vapeur soutirée est à une pression telle que la vapeur peut être utilisée par l'entreprise pour être réinjectée dans son réseau. Nous parlerons ici aussi d'un fonctionnement en mode cogénération.

Ce type de turbine est évidemment plus complexe (plusieurs étages) entraînant un coût/kWe plus élevé. Son rendement électrique est par contre meilleur.

Il existe deux principaux types de technologies de turbines à vapeur qui présentent chacune leurs avantages et inconvénients :

- Les turbines mono-étagées (applications <10MWe) qui présentent comme avantages d'être robustes, compacte, flexibles (fonctionnement avec de la vapeur surchauffée ou saturée) et qui ont un coût d'investissement et de maintenance relativement faible. Cependant elles ont un moins bon rendement électrique.
- Les turbines multi-étagées présentent un très bon rendement électrique mais sont des machines plus complexes et sensibles par rapport aux conditions vapeur et ont des coûts de maintenance plus élevé. Les turbines multi-étagées permettent aussi de réaliser un taux de détente (rapport de la pression d'entrée à la pression de sortie) plus élevé que les turbines mono-étagées. Dans certaines applications (notamment pour les cycles à eau) cet aspect peut représenter une contrainte importante.

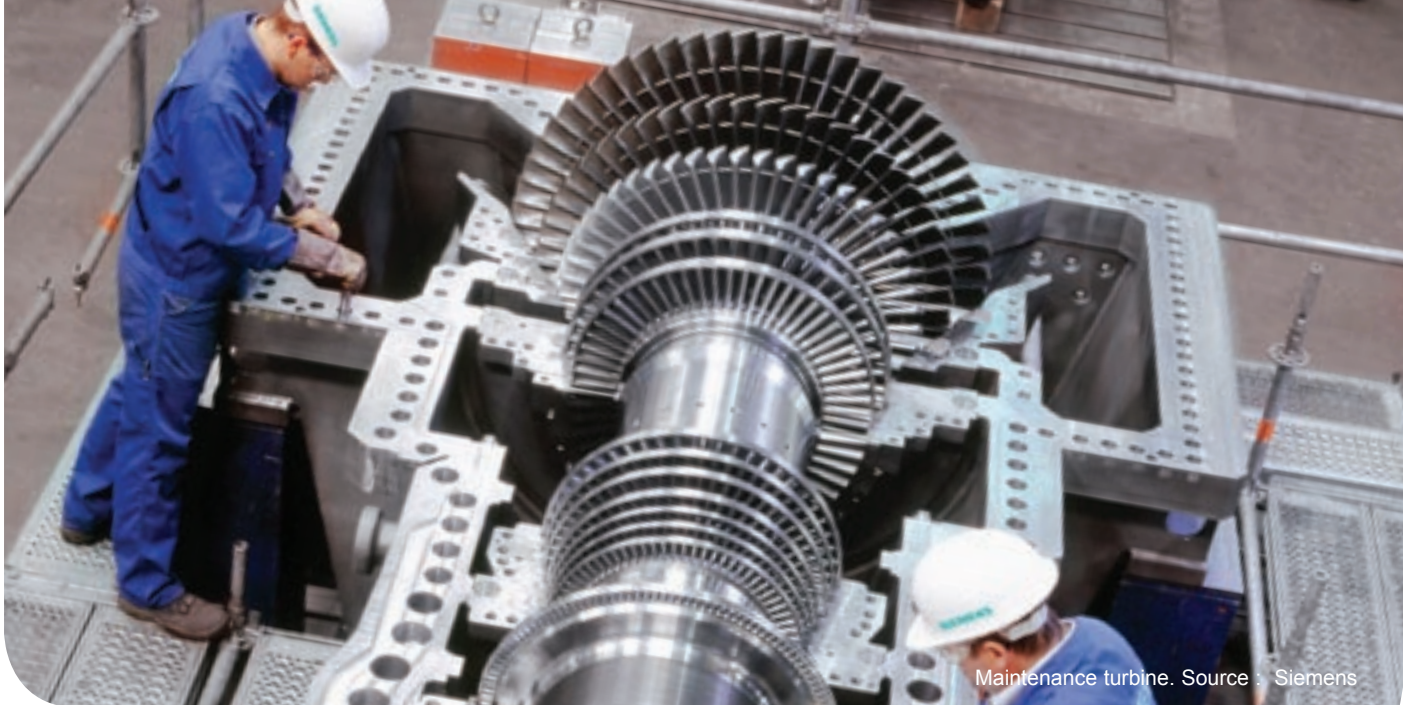
#### Puissance-Rendement

Pour les turbines, on parle normalement de l'efficacité isentropique (il s'agit du rapport entre le travail récupéré au cours de la détente réelle et le travail qui aurait été produit par une détente idéale (isentropique) avec les mêmes conditions de départ – cela est calculable notamment grâce au diagramme de Mollier. Cette efficacité isentropique est plus élevée pour les turbines multi-étagées (de 85% à 90%) que pour les turbines mono-étagées (environ 70%). Le rendement électrique du cycle sera proportionnel à l'efficacité isentropique de la turbine utilisée.

Le rendement électrique est évidemment relativement variable en fonction des niveaux de température de la source chaude et du puit froid ainsi que de la technologie utilisée pour la turbine. Le tableau ci-dessous, reprend des ordres de grandeur de rendement pour différentes technologies de turbine :

Type de turboalternateur	Puissance (kWe)	Rendement (%)
Contre-pression	500 – 1 500	12 – 14
	1 500 – 5 000	12 – 15
	5 000 – 10 000	15 – 20 (fortement dépendant de la différence d'enthalpie, soit de la différence de pression)
Condensation	500 – 1 500	15 – 20
	1 500 – 10 000	20 - 30

Variation du rendement électrique - Source : [www.ecoren.fr](http://www.ecoren.fr)



Maintenance turbine. Source : Siemens

Dans le cadre de la récupération de chaleur fatale et notamment dans le cas de rejets de chaleur à plus basse température, on peut avoir besoin d'une turbine de puissance encore plus faible :

Contre-pression	100 kW	10% environ
Condensation	100 kW	12% environ

Ces rendements sont évidemment donnés pour un débit vapeur et des caractéristiques de température et pression de vapeur optimales. Chaque turbine est effectivement caractérisée par un débit de vapeur minimum en-dessous de laquelle elle s'arrête. Le fonctionnement et le choix de la turbine dépendront donc fortement du dimensionnement de la chaudière de récupération produisant la vapeur.

### Moteur Vapeur

Le moteur vapeur peut également concurrencer la technologie ORC de petite puissance. Par contre, il concurrence peu la turbine vapeur qui concerne des récupérations de puissance plus importante. Cette technologie semble toutefois en développement encore à l'heure actuelle.

Le principe du moteur est le suivant : la vapeur haute pression en entrée est détendue à plus basse pression, en produisant de l'électricité via un moteur (moteur à piston à combustion externe). La pression en sortie peut être une pression de vapeur « réutilisable » par l'entreprise ou à pression atmosphérique.

#### Puissance-Rendement

Cet aspect est certainement appelé à évoluer fortement étant donné le développement de la technologie.

- Puissance : de quelques dizaines de kWe à environ 500 kWe ;
- pression vapeur (saturée) en entrée de moteur relativement basse (20 barg ou moins).
- Rendements : peuvent être de 12-15% pour les gros moteurs, et descendre jusque 5-7%.

## Synthèse/comparaison entre les technologies pour la récupération de chaleur fatale :

	Niveau de Température	Rendement
<b>ORC</b>	Applications typiquement pour la récupération de chaleur entre 100°C et 200-300°C	Les rendements moyens à haute température sont de 15-17% mais peuvent monter jusque 24%. Pour les applications de récupération, le rendement chute aux alentours de 10%.
<b>Turbine</b>	Applications plus généralement pour la récupération de chaleur haute température (au-dessus de 200-300°C)	En fonction des caractéristiques de la vapeur (débit important, haute température), le rendement de production d'électricité est assez haut (aux alentours de 20-25%). Pour des récupérations sur des plus faibles débit/température vapeur, on a un très faible rendement (proche de 7%)
<b>Moteur Vapeur</b>	Applications pour de la récupération de chaleur sur de la vapeur à basse pression (10-20 barg).	Applications pour de la récupération de chaleur sous forme de vapeur à basse pression (10-20 barg)

On peut résumer les avantages et inconvénients au sein d'un tableau (construit sur base en autres de la source : S. Quoilin et al, Renewable and sustainable Energy Reviews 22 (2013) 169 – 186. ).

Cycle vapeur (Rankine « classique »)		ORC	Moteur Vapeur
Mono-étagée	Multi-étagée		
Flexible au niveau des conditions vapeur (saturée ou surchauffée).	Afin de maximiser le rendement, le cycle vapeur nécessitent généralement de surchauffer la vapeur afin d'éviter la détérioration des aubes de la turbine (voir diagramme (T – s) ) ; mais certaines turbines multi-étagées sont conçues spécialement pour des applications à vapeur saturée.	Pas de surchauffe nécessaire ; le plus souvent absence de condensation au cours de la détente ce qui permet d'éviter la détérioration des aubes de la turbine.  Durée de vie allongée !	De la vapeur saturée peut être utilisée
		Température du point d'ébullition du fluide et pression d'évaporation plus faibles.  L'ORC peut travailler à partir de température moins élevées.	
Compacte		Compacité des éléments due à la haute densité du fluide caloporteur organique.	
L'eau est un fluide caloporteur connu, peu couteux, chimiquement stable, non toxique, non inflammable			
Efficacité électrique moyenne (12-15%)	Efficacité électrique élevée (20-25%).	Le rendement électrique de l'ORC peut être meilleur dans certains cas (dans le cadre des applications optimales de l'ORC)	Faibles rendements électriques
Démarrage rapide (quelques minutes) et flexible par rapport aux variations de charge.	Temps de démarrage long (quelques heures)	Bon comportement en démarrage et en régime partiel	Bonne réponse aux variations de charge – Rendements presque indépendants de la charge partielle
Investissement et coût de maintenance moins élevé			Coûts élevés de maintenance

## La faisabilité technique-Les coûts

Au niveau de la faisabilité technique, il faut évidemment tenir compte de la place disponible sur site, mais également au niveau de la source de chaleur pour l'installation de l'échangeur de récupération.

Il faut également noter, qu'au niveau de la place à disposer, il ne faut pas oublier de prévoir la tuyauterie (et les accessoires nécessaires) de by-pass de l'échangeur. Cela est évidemment indispensable car le process ne peut évidemment pas être mis à l'arrêt en cas de problème avec l'installation de récupération.

L'investissement pour une installation de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité devra inclure :

- Le récupérateur de chaleur et la boucle thermique associée ;
- Le génie civil ;
- Les raccordements hydrauliques et électriques ;
- la boucle de froid et le système de dissipation de la chaleur ;
- Le module ORC, la turbine ou le moteur vapeur ;
- L'installation, la mise en œuvre.

Ci-dessous un ordre de grandeur des coûts spécifiques :

ORC	€/kWe (module ORC nu)	€/kWe (installé)
Installations de plusieurs MW	1000	Entre 1500 (sur base d'un surcoût de 50% pour les coûts d'installation (valeur issue de la bibliographie) et 3000 à 4000 €/kW (sur base d'un surcoût de 250% pour les coûts d'installation, parfois renseigné par certains installateurs
Installations de quelques centaines de kW	3000	4500€/kWe (sur base d'un surcoût de 50% pour les coûts d'installation (valeur issue de la bibliographie)
Installations de moins de 100 kW	8000	12000€/kWe (sur base d'un surcoût de 50% pour les coûts d'installation (valeur issue de la bibliographie)

En ce qui concerne les turbines, les coûts sont très variables en fonction du type de turbine et du type de récupérateur de chaleur.

	Niveaux de puissance	Niveaux de rendement électrique	Coûts d'investissement turbine en €/KWe installé (100% à 200% extra pour l'installation complète)
Turbine à contrepression	100 à 500 kWe	10 à 12%	1000-2000
	0,5 à 1,5 Mwe	12 à 14%	600-1000
	1,5 à 10 Mwe	12 à 20%	300-600
Turbine à condensation	100 à 500 kWe	10 à 15%	1000-2000
	0,5 à 1,5 Mwe	15 à 20%	800-1500
	1,5 à 10 Mwe	20 à 25%	300-800
Moto alternateur	50 à 500 kWe	10 à 15%	400-900

Source : Production de force motrice ou électricité par cycle vapeur – valeurs fournies par Siemens

## Les aides en Wallonie

Pour la réalisation d'un projet de récupération de chaleur fatale, il existe différents mécanismes d'aide qui pourront éventuellement octroyer une aide financière en fonction du respect ou non de différents critères :

### Les aides à l'investissement de la DGO6 (UDE)

Base subsidiable :

La base subsidiable est le surcoût supporté par l'entreprise par rapport à une installation de production d'énergie classique (non renouvelable) ou un système de chauffage classique de même capacité en termes de production effective d'énergie, desquels sont déduits l'ensemble des avantages retirés de l'investissement (càd les gains CV).

Pour une PME : 40% de ce surcoût sera ainsi couvert par l'aide UDE pour une PE (petite entreprise), et 30% pour une ME (moyenne entreprise).

Pour une GE : 20% de ce surcoût.

Pour plus d'info : « brochure explicative pour les aides Environnement et Utilisation durable de l'énergie ». <http://www.wallonie.be/fr/formulaire/detail/1952>

### La déduction fiscale

La récupération de chaleur résiduelle constitue un investissement économiseur d'énergie pouvant être déduit fiscalement par les entreprises et les professions libérales :

Le montant de la déduction est de 14,5% pour les investissements effectués au cours de la période imposable qui se rattache à l'exercice d'imposition 2014 (année de revenus 2013). Il s'agit d'une déduction unique. (Moniteur belge du 07-03-2013) Les montants sont mis à jour chaque année.

Pour plus d'info : <http://energie.wallonie.be/aides>

### Les certificats verts

Le mécanisme des certificats verts est une aide à la production d'électricité verte, soit d'électricité d'origine renouvelable et de cogénération de qualité. En ce sens, ce mécanisme n'est a priori pas conçu pour soutenir la production d'électricité par récupération de chaleur fatale.

Concrètement, la CWaPE considère le four ou le réacteur (exothermique) comme une chaudière. De ce fait, elle considère dans les calculs, un combustible d' « origine » qui entre dans la « chaudière ». Ce principe de calcul est défavorisant puisque le rendement de la « chaudière », donc de production de chaleur fatale, est évidemment très mauvais. En effet, ce n'est absolument pas l'objectif de cette « chaudière » de produire de la chaleur. On comprend donc que les installations de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité auront très difficilement droit à des CV. Pour éventuellement pouvoir avoir droit aux CV, l'installation devrait fonctionner en mode cogénération et valoriser suffisamment la chaleur. Un calcul au cas par cas est donc à réaliser.





Source : CMI

## Les acteurs

La liste ci-dessous a été établie en « novembre 2013 » sur base de nos connaissances et de nos contacts. Toute personne ou entreprise peut se faire connaître ; un erratum sera réalisé exclusivement pour la version électronique du cahier.

### ORC

Fabricants	Gamme de Puissance	Température de la source de chaleur	Site Internet
Turboden	200 – 10 000 kWél	100 – 300 °C	<a href="http://www.turboden.eu">www.turboden.eu</a>
Termocycle	7-250 kWél	95- ?	<a href="http://www.termocycle.com">www.termocycle.com</a>
Enertime	500-1 000 kWél	A partir de 130°C pour les modèles standards, et de 80°C sur mesure	<a href="http://www.enertime.com">www.enertime.com</a>
Eneftech		120- ?	<a href="http://www.eneftech.com">www.eneftech.com</a>
ORMAT (USA)	200 – 70 000 kWél	150 – 300 °C	<a href="http://www.ormat.com">www.ormat.com</a>
Bosch	65 – 350 kWél	120 – 150°C	<a href="http://www.bosch-industrial.com/en/product-page/waste-heat-recovery-systems">www.bosch-industrial.com/en/product-page/waste-heat-recovery-systems</a>
GE Energy	125 kWél	A partir de 121°C	<a href="http://www.ge-energy.com">www.ge-energy.com</a>
Tri-O-Gen	160 kWél	A partir de 350°C	<a href="http://www.triogen.nl">www.triogen.nl</a>
Free-Power	130 kWél	A partir de 280 °C	<a href="http://www.freepower.co.uk">www.freepower.co.uk</a>
Siemens	> 400 kWél	A partir de 200°C	<a href="http://www.siemens.com">www.siemens.com</a>

### Récupérateurs de chaleur

- CMI
- Citons également les entreprises fabriquant également des chaudières « standards » : Viessmann, BBC Loos, CallensVyncke, Clayton...

### Turbine vapeur

- Siemens : La gamme de puissance couverte va de 75kWe à 1.900MWe (mono et multi-étagées).
- Dresser-Rand

### Moteur vapeur

- Spilling (Allemagne) qui propose un moteur de 500 kWe
- Progmatic en Belgique qui revend les moteurs de marque Enva Systems qui propose un moteur pouvant au maximum réaliser une détente vapeur de 4 barg.







## Bibliographie

ORC :

- <http://www.cycle-organique-rankine.com/technologie.php>

ORC et solaire thermique :

- Centrales solaires à concentration, Quoilin Sylvain  
[http://www.labothonp.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales\\_solaires\\_SQ070925.pdf](http://www.labothonp.ulg.ac.be/staff/squoilin/files/centrales_solaires_SQ070925.pdf)

ORC et géothermie :

- <http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/geothermie.html>

Pour en savoir plus :

- <http://www.encyclopedie-dd.org/encyclopedie/terre/la-geothermie-pour-la-production-d.html>
- Le savoir-faire français dans le domaine de Géothermie – août 2012 - Ademe
- BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) <http://www.brgm.fr/content/developper-information-sur-geothermie>
- <http://www.geothermie-perspectives.fr/>
- <http://www.cycle-organique-rankine.com/application-geothermique.php>

Récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité :

- Etude du potentiel de récupération de chaleur fatale pour la production d'électricité dans l'industrie wallonne, ICEDD – 2013
- Les turbines et les moteurs vapeur :
- <http://www.ecoren.fr/turbine-a-vapeur.php>
- Aperçu général des techniques de cogénération ;
- [http://www.atibt.org/wp-content/uploads/2013/06/Technologies\\_Douala.pdf](http://www.atibt.org/wp-content/uploads/2013/06/Technologies_Douala.pdf)
- La production combinée de chaleur et d'électricité – comparaison de différents types de centrales
- [http://library.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/f05ec9bb8a393e14c1256dd00347085/\\$File/24-32m417.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/f05ec9bb8a393e14c1256dd00347085/$File/24-32m417.pdf)
- <http://ptob.free.fr/enseign/thermo/gim2/polysuite/polysuite.pdf> Chapitre « les turbines à vapeur »

## COLOPHON

Opérateurs désignés par la Région wallonne :



**Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable (ICEDD) asbl**

Boulevard Frère Orban 4, 5000 NAMUR

Rédaction : Stéphanie MARCHANDISE, Responsable de Projets

Tél. : 081 25 04 80 — Fax : 081 25 04 90

Courriel : [sm@icedd.be](mailto:sm@icedd.be)



Relecture : Vincent LEMORT, Thermodynamics and Energetics Laboratory

Ulg



Pour le compte de :

**Service public de Wallonie**

**Direction générale opérationnelle Aménagement du territoire, Logement, Patrimoine et Energie**

**Département de l'énergie et du Bâtiment durable**

Chaussée de Liège 140-142, 5100 Jambes

Tél : 081 48 63 56

Courriel : [Energie@spw.wallonie.be](mailto:Energie@spw.wallonie.be)

Site portail de l'énergie de la Région wallonne : <http://energie.wallonie.be>

Editeur responsable : Dominique SIMON, Directeur

Photo de couverture : ORC. Source : Enertime

1ère diffusion électronique, édition octobre 2014