

# Atelier 15

## L'intérêt économique de la production décentralisée de chaleur

Les besoins en terme de chaleur représentent 40% de la consommation énergétique finale en Europe. Ceux susceptibles d'être couverts par des énergies renouvelables (bois, paille, géothermie, biogaz, solaire) ou de récupération (incinération de déchets, chaleur industrielle) et de cogénération sont très importants, avec de fortes externalités positives pour les collectivités locales. Il n'est pas rare de voir certaines villes d'Europe du Nord fournir 50% des besoins de chaleur à partir des renouvelables. En dépit des efforts fournis par les collectivités locales et leurs associations ainsi que par quelques industriels, la dynamique française de la chaleur "renouvelable" – en termes généraux – reste à trouver pour aller au-delà des réalisations actuelles.

Des prix de rachat ont été établis pour la production d'électricité par des énergies renouvelables. Cependant des secteurs restent à l'écart d'un tel dispositif de soutien lorsqu'il s'agit d'usages thermiques d'énergies renouvelables, lesquelles sont pourtant en système de concurrence avec d'autres énergies depuis toujours. Des taux différenciés de TVA jouent même parfois en sens inverse.

Il est alors permis de se poser la question de la politique éventuelle d'incitation à mettre en œuvre pour utiliser le potentiel d'énergies renouvelables pour la chaleur, comme on l'a fait pour l'électricité.

C'est pourquoi l'objectif de cet atelier est de discuter de :

- la question de la fourniture de chaleur et de son avenir dans le nouveau contexte
- l'intérêt et des modalités d'un soutien à la fourniture de chaleur
- la prise en compte des externalités dans les choix énergétiques locaux.



## Atelier 15

### *L'intérêt économique de la production décentralisée de chaleur*

Didier LENOIR, AgéMO

#### **Valeur de la chaleur issue d'énergies renouvelables**

#### **insertion dans le marché de l'énergie**

Les énergies renouvelables présentent des caractéristiques essentiellement différentes de celles des énergies fossiles dans trois domaines fondamentaux.

<b>Energies fossiles</b> (charbon, pétrole, gaz, uranium)	<b>Energies renouvelables</b> (hydraulique, éolien, solaire, géothermie, biomasse)
--	---

#### **1 – Aspect patrimonial**

Consommation du PATRIMOINE  
TERRESTRE

Energies inépuisables à l'échelle humaine

#### **2 – Equilibre écologique**

Rupture des équilibres écologiques et  
dégradation de l'environnement (climat,  
végétation, pollutions, effets sur la santé, ...)

Respect des équilibres écologiques et  
restauration de l'environnement

#### **3 – Aspect structurel**

Concentration de la production  
Marginalisation du niveau local  
Fragilité du système énergétique

Production décentralisée  
Stabilité du système énergétique

Les différences de nature entre les énergies fossiles et les énergies renouvelables font que l'on ne peut pas mesurer la valeur des énergies renouvelables avec les mêmes instruments que pour les énergies fossiles, toute comparaison exigeant un tableau complet des coûts et des avantages pour les unes et pour les autres.

En l'absence de bons instruments de mesure, nous en sommes réduits à apprécier qualitativement la valeur ajoutée des énergies renouvelables.

## Valeur ajoutée des énergies renouvelables

1. Respect du **patrimoine** terrestre
2. Dégâts évités sur **l'environnement**
3. Risques évités sur la **santé**
4. **Importations** évitées
5. Besoins en **infrastructures** évités
6. Coûts de **transport d'énergies** évités
7. Coûts de **défense** évités

Les difficultés d'insertion des énergies renouvelables dans le marché de l'énergie résultent à la fois de leurs caractéristiques et de l'absence d'instruments de comparaison avec les énergies fossiles.

Le tableau suivant présente les principaux handicaps des énergies renouvelables.

## MARCHE DE L'ENERGIE

### Handicaps des énergies renouvelables

<b>Energies fossiles</b> (charbon, pétrole, gaz, uranium)	<b>Energies renouvelables</b> (hydraulique, éolien, solaire, géothermie, biomasse)
--	---

### Investissements

Economies d'échelles

Multiplicité des sites limitant les économies d'échelle

Puissance financière des acteurs

Multiplicité des acteurs limitant leur puissance financière

### Fonctionnement du marché de l'énergie

Pas de prise en charge des coûts externes (patrimoine, environnement, santé, ...)

Pas de rémunération de la Valeur Ajoutée (patrimoine, environnement, santé, ...)

Information massive et orientée

Faibles moyens d'information

Abus de position dominante (aides extra-tarifaires)

Faibles moyens financiers pour contrer les aides extra-tarifaires

### Recherche

Moyens très importants (à la hauteur des chiffres d'affaire et de la puissance des acteurs pétroliers, électriciens, gaziers)

Moyens faibles et dispersés (à la mesure des millions de producteurs potentiels)

Pour sortir de la situation actuelle, il faut cesser de raisonner en termes de production d'énergie et revenir aux questions essentielles.

## A qui et à quoi sert l'énergie ?

Utilisateurs	Usages	Volume France 2001	Tendance	Décideurs
Millions d'habitants et Millions d'entreprises d'organismes	<b>CHALEUR</b> à basse température - chauffage - eau chaude	50 Millions TEP	↗	Constructeurs Ménages et Entreprises
	<b>ELECTRICITE</b> pour appareils courants - électroménager - informatique - machines	17 Millions TEP	↗	
	<b>FORCE MOTRICE</b> pour les transports	50 Millions TEP	↗	
Quelques milliers d'entreprises	<b>PROCESS INDUSTRIELS</b> particuliers - haute température - électrolyse - réactions chimiques - ...	41 Millions TEP	↘	Entreprises spécialisées

En définitive, le tableau précédent montre que ce que l'on appelle le marché de l'énergie doit être fractionné en quatre marchés aux caractéristiques fondamentalement différentes en nombre de décideurs, en nombre d'utilisateurs et en forme d'énergies utilisées.

### Marché de la chaleur à basse température

#### Insertion des énergies renouvelables

Les entreprises, les techniques, les matériels existent – Développer leur marché
--

#### 1. Nouvelle comptabilité énergétique

Energie primaire utilisée – Consommation utile  
Pertes

#### 2. Information

Complète  
Indépendante des producteurs et des distributeurs  
Opérationnelle et facilement accessible aux millions de décideurs et d'utilisateurs

#### 3. Sortir de la logique des aides (dossiers, bureaucratie, ...)

#### **4. Nouvelles règles de marché**

##### Europe, une politique globale de l'énergie de l'énergie

- ✓ Prise en compte de la chaleur renouvelable
- ✓ Prise en compte des coûts externes dans les règles de concurrence
  - au titre de l'environnement
  - au titre de la pérennité du patrimoine terrestre

##### France, le développement des EnR

- ✓ Mesures légales, réglementaires, fiscales
  - de caractère général
  - appliquées durablement (plusieurs décennies)
- ✓ Avantager les EnR à la mesure des coûts évités  
Exemples :
  - TVA taux 0 ou taux réduit
  - Crédits d'impôts pour les investissements EnR
  - Amortissements accélérés
- ✓ Développer les opérateurs et les financements spécifiques
  - Sociétés de développement des EnR
  - Fonds régionaux – prêts bonifiés
  - SICAV Energie-Développement durable

#### **Marché de l'électricité pour appareils courants**

##### Insertion des énergies renouvelables

#### **1. Maîtrise de l'énergie**

Recherche de faibles consommations

#### **2. Production locale d'électricité**

- ✓ Photovoltaïque
- ✓ Cogénération (hydraulique, biomasse, déchets, ...)

#### **3. Recherche – Développement**

- ✓ Aides spécifiques pour R & D
- ✓ Crédit impôt-recherche

#### **4. Nouvelles règles de marché**

- ✓ Crédits d'impôt pour investissements EnR
- ✓ Amortissements accélérés
- ✓ TVA à taux réduit
- ✓ Tarifs spécifiques d'achat de l'électricité (à revoir à la hausse)
- ✓ Certificats d'électricité verte
- ✓ Développer les opérateurs et les financements spécifiques pour investissements dans la production locale d'électricité

#### **Force motrice pour les transports**

##### Insertion des énergies renouvelables

1. Recherche et développement
2. Nouvelles règles de marché

## **Process industriels**

### Insertion des énergies renouvelables

1. Recherche et développement
2. Aides spécifiques

## **Développement des énergies renouvelables**

### Insertion des énergies renouvelables

Vision à long terme

Mesures simples et de pratique courante

Constance dans l'application

20 à 30 ans

---

### **Pour en savoir plus**

Didier LENOIR, AGÉMO

Tel : 01 46 64 53 43

e-mail : lenoir.didier@wanadoo.fr

## Atelier 15

### *L'intérêt économique de la production décentralisée de chaleur*

Serge DEFAYE, Biomasse Normandie

#### **Produire simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir du bois : incidence de l'arrêt tarifaire biomasse d'avril 2002**

##### **Quelles solutions sont actuellement disponibles ?**

On peut distinguer deux grandes filières de production d'électricité à partir de bois : **la gazéification**, avec injection des gaz de pyrolyse dans une turbine ou un moteur à gaz pauvre, **ou la combustion/production de vapeur** et l'injection dans une machine à vapeur.

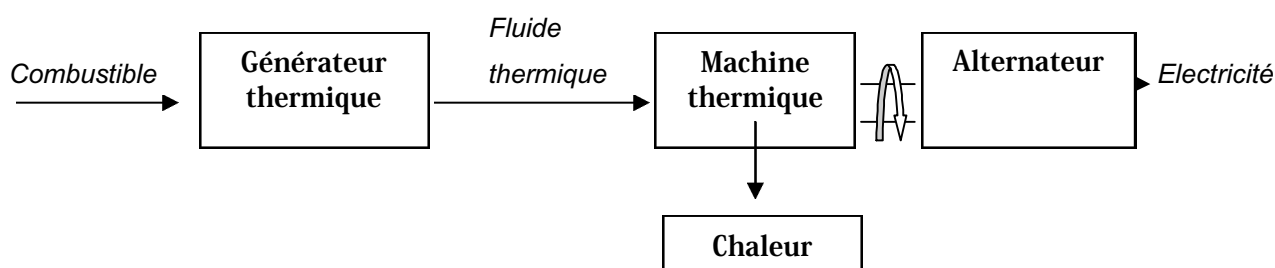
##### *La gazéification*

La filière gazéification est une technologie en cours de développement. On compte quelques fabricants européens (et notamment français) de gazogènes associés à des moteurs à gaz de quelques centaines de kW, mais le nombre d'installations reste extrêmement limité en Europe. Plusieurs programmes internationaux (Varnamö en Suède, ARBRE au Royaume Uni, Energy Farm en Italie...) visent au développement de centrales de forte puissance (plusieurs MW) avec cycles combinés, dont les performances pourraient être comparables à celles des centrales au gaz naturel (40 à 45 % de rendement électrique). Si nombre de centres de recherches et d'institutions européennes mettent beaucoup d'espoir et de moyens pour le développement de cette technologie, les seules installations en fonctionnement connaissent d'importants retards dans leur montée en puissance, liés notamment aux problèmes de gazéification elle-même (combustion en défaut d'air) et surtout d'épuration des gaz avant injection dans la turbine.

##### *La combustion externe*

La filière combustion est à ce jour la mieux éprouvée car utilisée de longue date, notamment dans l'industrie papetière.

Un générateur, dans notre cas une chaudière à vapeur, fournit de l'énergie thermique à un fluide de travail (eau à l'état vapeur, ou éventuellement fluide thermique ou air) qui est injecté dans un organe de conversion d'énergie thermique en énergie mécanique permettant la mise en rotation d'un arbre ; celui-ci entraîne à son tour l'alternateur, organe de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.



### *La turbine à vapeur et ses variantes*

Les turbines à vapeur sont le système le plus utilisé pour la cogénération à partir de biomasse. Elles permettent simultanément la production d'électricité et la fourniture d'énergie thermique à un process industriel ou un réseau de chaleur.

Une installation avec turbine à vapeur comporte au moins quatre éléments :

- une chaudière qui produit de l'énergie thermique sous forme de vapeur haute pression (plusieurs dizaines de bars)
- une turbine dans laquelle la vapeur se détend et dont l'arbre fournit le travail moteur
- un condenseur qui permet, grâce à une source froide (qui peut-être l'eau de retour d'un réseau de chaleur urbain par exemple), de liquéfier totalement la vapeur
- une pompe qui redonne au fluide la pression qu'il avait à l'amont de la turbine.

Le rendement électrique d'une telle installation est le produit de cinq rendements successifs : *rendement chaudière* (qualité de la combustion), *rendement thermique théorique* de la turbine (lié aux niveaux de pression/température de la vapeur en sortie de chaudière et en entrée turbine), *rendement isentropique de la turbine*, *rendement mécanique* de la turbine et *rendement de l'alternateur*.

#### a) Les turbines à contrepression

Dans une turbine à contrepression, la pression de vapeur en sortie de turbine est au minimum de quelques bars (3 à 5 bars) mais peut également être plus élevée (10 à 15 bars) en fonction des besoins en aval de la turbine. L'intérêt de cette turbine est en effet, qu'à sa sortie, la vapeur peut encore être utilisée soit pour un process industriel ou un réseau de chaleur...

Son inconvénient réside dans le faible rendement du cycle théorique.

Avec une pression de sortie de 3 bars, **le rendement électrique global de l'installation peut difficilement dépasser 15 à 18 % selon les pressions d'admission.** En revanche, les niveaux d'investissement sont inférieurs à ceux des turbines à condensation.

#### b) Les turbines à condensation

Dans une turbine à condensation, la pression de sortie de la vapeur peut descendre jusqu'à 40 mbars, ce qui fait apparaître des condensats dans la turbine. Le rendement thermique du cycle théorique peut être pratiquement doublé par rapport à un échappement à 3 bars et, même si le rendement isentropique est moins bon, **le rendement électrique global de la centrale est nettement amélioré : il peut atteindre jusqu'à 25-30%.**

En sortie de turbine, la température est basse : 30°C à 40 mbars, 46°C à 100 mbars, 80°C à 500 mbars... L'énergie thermique résiduelle, qui est importante puisqu'elle représente environ 60 % de l'énergie fournie à la chaudière par le combustible, ne peut être récupérée que si l'on dispose d'une source froide en quantités suffisante : chauffage basse température, préchauffage d'eau chaude sanitaire, préchauffage de vapeur process...

### c) Combinaison et soutirage

Une option intéressante est de n'abaisser à très basse pression qu'une partie de la vapeur, l'autre étant soutirée à une pression plus élevée, et à la température exigée par la valorisation thermique : c'est possible soit en combinant les 2 types de turbines, soit en effectuant un soutirage.

#### La combinaison des deux types de turbine

Dans une installation de cogénération, où l'on souhaite produire de l'électricité en complément d'une valorisation thermique de l'énergie, il peut être intéressant de mettre en place en série deux turbines : l'une à contrepression, l'autre à condensation.

Ce type de montage est particulièrement approprié dans le cas d'un process industriel à fonctionnement intermittent. et peut permettre de gagner plusieurs points de rendement électrique, par rapport à une simple turbine à contrepression.

#### Le soutirage

Le soutirage consiste à extraire une partie du flux de vapeur entre deux étages de la turbine ( quel que soit son type), avant sa détente complète.

Dans le cas le plus simple, le soutirage est effectué pour permettre un usage thermique de process ou de chauffage haute température, et le mode de fonctionnement se rapproche alors de celui présenté ci-dessus avec l'association de deux turbines.

Le soutirage est également utilisé pour améliorer le rendement électrique de la centrale : de la vapeur est soutirée de la turbine avant détente complète et utilisée pour le réchauffage de l'eau d'alimentation de la chaudière. Ce réchauffage se fait dans des réchauffeurs à mélange. L'intérêt de cette technique tient au fait que l'on minimise l'apport d'énergie thermique au fluide ce qui permet ainsi d'atteindre jusqu'à 5 % d'amélioration du rendement électrique (mais cela entraîne une baisse de l'ordre de 5 % du rendement global de l'installation).

Les technologies à mettre en œuvre sont coûteuses (pompes supplémentaires et surtout échangeurs mélangeurs), ce qui les réserve à des unités de production de plusieurs dizaines voire centaines de mégawatts.

### d) Le moteur à vapeur

Le moteur à vapeur est un moteur alternatif à combustion externe. C'est le mouvement vertical des deux pistons, actionnés par le flux de vapeur, qui permet par le biais d'un arbre à came et d'un vilebrequin de faire tourner l'arbre relié à l'alternateur.

Le principe est comparable à celui d'une cogénération avec turbine à vapeur : de la vapeur H.P est produite dans une chaudière puis détendue dans le moteur à vapeur (double détente). La vapeur détendue est ensuite dirigée vers un condenseur où elle retourne à l'état liquide en échangeant sa chaleur latente de vaporisation avec l'eau d'un réseau de chauffage.

Par rapport aux turbines à vapeur, le moteur présente plusieurs avantages en petite puissance : rendement électrique plus élevé, pression de vapeur d'admission un peu inférieure, vitesse de rotation de l'arbre moins élevée (ce qui est un avantage en termes de lubrification et d'usure des pièces).

#### e) Cycle organique de Rankine (ORC)

L'ORC ressemble beaucoup au cycle de vapeur classique, mais présente la particularité de comporter deux circuits de fluides :

- d'une part un fluide de travail : il s'agit non pas de vapeur d'eau mais d'un fluide organique, généralement à base de silicone
- d'autre part, un fluide caloporteur : huile thermique haute température (autour de 300 °C) pour vaporiser le fluide de travail.

La chaudière bois génère de l'huile thermique à 300 °C, envoyée dans l'évaporateur d'un turbogénérateur d'où elle ressort entre 200 et 250°C. Elle peut alors être utilisée pour des besoins thermiques (eau chaude, eau surchauffée ou vapeur saturée basse pression) et/ou renvoyée dans la chaudière.

Le fluide organique sous pression est réchauffé et vaporisé dans l'évaporateur avant d'être injecté dans une turbine. Après détente, il traverse un régénérateur pour un pré-refroidissement, puis un condenseur avec récupération de la chaleur latente de condensation pour le chauffage d'un réseau d'eau chaude. Le fluide est ensuite comprimé avant introduction dans le régénérateur pour un préchauffage, dernière étape du cycle.

La cogénération par cycle organique de Rankine présente, d'un point de vue technique, certains avantages par rapport aux technologies vapeur précédemment présentées :

- l'huile thermique à 300 °C est sous la forme liquide à pression atmosphérique ce qui permet une réduction des dangers donc des coûts de production par rapport à la production d'un fluide thermique à haute pression
- l'huile thermique possède une inertie importante donc une faible sensibilité aux instabilités de charges de la chaudière
- la faible vitesse de rotation de la turbine (3000 trs/mn) permet de la coupler directement à l'alternateur sans interposer un démultiplicateur de vitesse
- enfin le fluide organique reste sous forme gazeuse pendant toute la phase de détente, ce qui limite l'érosion et la corrosion des aubages de la turbine.

#### f) Le moteur Stirling

Le moteur Stirling est un moteur alternatif à combustion externe à gaz chaud.

À la différence du moteur à combustion interne, le piston n'est pas mis en mouvement par une explosion, mais par la détente d'un gaz pur en cycle fermé, mis successivement au contact d'une source froide et d'une source chaude. Cette dernière peut être fournie par un fluide intermédiaire ou directement par les gaz d'échappement de la chaudière bois. La source froide peut être l'air ambiant, l'eau d'alimentation ou l'eau de retour d'un réseau de chauffage.

Un moteur Stirling est constitué d'un cylindre dans lequel se trouve en partie basse un piston moteur (ajusté au diamètre intérieur du cylindre) et en partie haute un piston déplaceur dont le diamètre est inférieur au diamètre intérieur du cylindre, ce qui permet la circulation du fluide de travail.

La partie haute de ce cylindre est chauffée alors que la partie basse est refroidie. Un différentiel de température de 30°C permet la mise en fonctionnement du moteur Stirling.

Le transfert du fluide de travail entre la partie basse et la partie haute du cylindre se fait uniquement dans l'espace libre entre le piston déplaceur et la paroi du cylindre.

Un ensemble bielles, vilebrequin, arbre à came permet de transformer le mouvement de translation du piston moteur en un mouvement de rotation nécessaire au fonctionnement de l'alternateur.

### **A quel coût produire de l'électricité et de la chaleur à partir du bois ?**

#### *La situation en Europe*

En **Europe**, le développement de la cogénération à partir du bois reflète peu ou prou celle du bois énergie en général :

- **les pays scandinaves comptent de nombreuses centrales de cogénération de forte puissance**, les producteurs bénéficiant de conditions d'achat extrêmement favorables (autour de 10 centimes €/kWh)
- **En Autriche et en Allemagne cette option accompagne le développement des réseaux de chaleur**, là aussi grâce à des conditions d'achat d'électricité très favorables (9 à 10 centimes €/kWh, en Allemagne, sans condition de puissance garantie ni de modulation saisonnière)
- **dans le reste de l'Europe, les quelques installations en fonctionnement en Espagne, Royaume Uni, Suisse... sur des réseaux de chaleur, demeurent encore des exceptions.**

**En France, la cogénération à partir de biomasse ligneuse n'est pratiquée que par quelques industriels comme les papetiers** qui valorisent leurs sous-produits (liqueur noire et écorces) en produisant toute leur vapeur de process et de l'électricité en complément, mais avec un rendement médiocre.

En dehors de ces gros sites industriels, les conditions d'achat de l'électricité produite à partir de bois n'ont pas permis le développement de cette filière quel que soit le tarif considéré :

- prix d'achat trop faible pour l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (4,5 à 5 centimes €/kWh)
- prix plus attractif dans le cas d'une cogénération (6,7 centimes €/kWh), mais à condition de se limiter à un fonctionnement inférieur à 4000 heures par an, avec puissance garantie.

Par ailleurs, il convient de souligner que la cogénération à partir du bois est beaucoup plus contraignante qu'à partir de gaz naturel : la mobilisation de la ressource dans une aire de collecte raisonnable et la faiblesse du rendement électrique résultant de la technologie "turbine à vapeur" (et par voie de conséquence les quantités d'énergie thermique à commercialiser) induisent une limitation de la taille des centrales envisageables. Les quantités de bois consommées sont de l'ordre de 80 à 100 000 tonnes par an pour une centrale de 10 MWé et la puissance thermique disponible de l'ordre de 30 à 50 MW.

Les perspectives de la cogénération à partir du bois dans des réseaux de chaleur mais également dans l'industrie se situent donc dans une gamme de puissance de quelques centaines de kW électriques à 4 ou 5 MWé.

#### Les nouvelles conditions tarifaires

L'arrêté tarifaire établi récemment par la DIDE (Ministère de l'Industrie) et publié au Journal Officiel le 5 mai 2002 n'est pas de nature, comme on le verra par la suite, à modifier la situation décrite ci-dessus.

Les tarifs applicables aux nouvelles installations (inférieures à 12 MWé) ont été fixés à **4,9 centimes d'euro/kWh** en métropole et en Corse (5,5 centimes dans les DOM), **soit un niveau deux fois moins élevé qu'en Allemagne**. Une prime à l'efficacité énergétique a certes été prévue en fonction du taux de valorisation de l'énergie électrique et thermique :

- 50 % + 0,5 centimes €/kWh
- 60 % + 1 centime€
- 70 % + 1,2 centimes€

Mais, comme on le constate, **le prix d'achat le plus favorable s'établit à 6,1 centimes €/kWh (40 centimes de francs)**, à condition d'atteindre un taux de valorisation global de 70 %.

#### Simulation de plusieurs cas de figure

On va analyser succinctement plusieurs cas de figure du plus favorable (papeterie) au plus défavorable (réseau de chaleur) sur la base d'hypothèses précisées ci-après, en faisant varier uniquement deux paramètres : le montant de la subvention initiale aux investissements et le taux de valorisation de la chaleur récupérable.

### a) Principales hypothèses

Le coût de production de l'électricité a été estimé pour plusieurs cas de figure types à partir des hypothèses suivantes :

#### Hypothèses retenues pour les simulations

Description			INDUSTRIE			RESEAU DE CHALEUR			
			Grande industrie		Petite industrie				
			Industrie de trituration	Centre d'élimination des déchets		Scierie			
Hypothèses techniques et énergétiques	Puissance électrique	MWé	10	5		1		5	
	Puissance nominale de la chaudière bois	MW	71	25		9		25	
	Durée annuelle de fonctionnement	h	8 000	8 000		7 500		5 000   7 500	
	Consommation de bois	t/an	190 000	67 000		21 000		42 000   63 000	
	Electricité	Rendement électrique de l'installation	%	14	20		12		20
		Production	MWh/an	80 000	40 000		7 500		25 000   37 500
	Chaleur	Taux de valorisation de l'énergie thermique produite	%	100	20	50	50		50   70
		Production valorisée	MWh/an	340 000	22 000	54 000	19 000		34 000   71 000
	Taux de valorisation de l'énergie utile <sup>(1)</sup>		%	92	39	59	53		59   72
Rendement global de l'installation <sup>(2)</sup>		%	73	31	47	43		47   58	
Hypothèses économiques	Prix du bois	€/MWhPCI	0 à 7,5	0 à 4,5		6		10,5 à 15	
	Prix de vente de la chaleur (départ chaufferie)	€/MWhu	12	16,5		16,5		20	
	Coût d'investissement au kWé installé	€/kWé	2 000	2 300		2 300		2 300	
	Investissement total	k€	20 000	11 500		2 300		11 500	
	Coût d'exploitation/maintenance	% invest.	5	6		5		6	
	TRI souhaité			10% sur 15 ans					

(1) électricité + chaleur valorisées / énergie source chaudière  
 (2) taux de valorisation de l'énergie utile / énergie primaire

Ces hypothèses ont été prises à partir d'exemples européens et français, en particulier pour :

- les rendements électriques
- les coûts du kWé installé
- les coûts d'exploitation
- les prix des combustibles entrée chaudière selon la catégorie
- les prix de vente de la chaleur qui, en cogénération, est une énergie fatale difficile à valoriser.

Les centrales n'étant pas toutes raccordées à un réseau de chaleur, les coûts d'investissements donnés ci-dessus ne comprennent que les centrales et leurs équipements périphériques. Dans l'hypothèse où il faut créer un réseau de chaleur, le financement de celui-ci devra être réalisé par la vente de la chaleur ou par des subventions à l'investissement : les prix de la chaleur pour le centre d'élimination des déchets (16,5 €/MWhu) et le réseau de chaleur (20 €/MWhu) s'entendent donc départ chaufferie.

Le prix du bois entrée chaufferie a été estimé à :

- 0 à 7,5 €/MWhPCI pour la papeterie selon les proportions de déchets de fabrication à valeur nulle (liqueurs noires, écorces) et de bois achetés à l'extérieur
- 0 à 4,5 €/MWhPCI pour le centre d'élimination des déchets : de valeur négative à la reprise chez le détenteur des déchets, les bois souillés nécessitent un conditionnement (transport, broyage, déferrailage, stockage) ramenant le prix du combustible proche de zéro dans le meilleur des cas, le plus souvent légèrement positif
- 6 €/MWhPCI pour la scierie, correspondant aux produits moyens perçus par la commercialisation de l'ensemble des produits connexes (dosses, délignures, sciures, écorces)
- 10,5 à 15 €/MWhPCI pour les réseaux de chaleur selon que l'on utilise respectivement un mélange de plaquettes forestières et de bois de rebut ou 100 % de plaquettes forestières.

Les simulations suivantes ont été effectuées avec deux possibilités :

- absence de subvention à l'investissement
- attribution d'une subvention à l'investissement de 40 % (sauf pour l'industrie de la trituration).

Pour chaque cas étudié, le prix de revient du kilowattheure électrique, son prix d'achat selon l'arrêté tarifaire et le résultat économique de la production d'électricité, en fonction du prix d'achat du combustible, sont présentés sous forme de tableaux.

### **b) Les papeteries**

On obtient :

Prix du combustible : 0 €/MWh PCI

		Sans subvention
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	- 0,7
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	6,1
Ecart prix d'achat / prix de revient	c€/kWh	+ 6,8

Prix du combustible : 7,5 €/MWh PCI

		Sans subvention
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	4,8
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	6,1
Ecart prix d'achat / prix de revient	c€/kWh	+ 1,3

La production d'électricité dans les industries de la trituration est très rentable, même sans subvention, puisque le combustible est gratuit ou quasi-gratuit et que le taux de valorisation de la vapeur dans le process est excellent.

En l'occurrence, l'électricité peut être ici considérée comme un sous-produit de la vapeur de process, laquelle est fabriquée à une pression et température élevées et détendues dans la turbine à vapeur aux niveaux des caractéristiques de vapeur exigées par le process.

### c) Les centres d'élimination des déchets ligneux

Variante 1 : le taux de valorisation de la chaleur produite est de 20 %

C'est l'hypothèse d'une unité implantée en milieu rural loin de gros consommateurs de chaleur, avec quelques applications comme le séchage de bois, de compost ou de fourrage, le chauffage de serres horticoles...

On obtient :

Prix du combustible : 0 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	4,6	3,1
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	4,9	4,9
Ecart prix d'achat /prix de revient	c€/kWh	+ 0,3	+ 1,8

Prix du combustible : 4,5 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	6,8	5,4
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	4,9	4,9
Ecart prix d'achat /prix de revient	c€/kWh	- 2,0	- 0,5

**Le TRI souhaité de 10 % est atteint si le coût du combustible est nul** mais ne l'est plus dès lors que le combustible coûte 15 €/t, soit 4,5 €/MWh PCI. La production d'électricité à partir de telles installations est envisageable mais très aléatoire compte tenu de la forte incertitude liée au coût réel d'approvisionnement des bois de rebut.

Soulignons que les bois souillés peuvent être assimilés à des ordures ménagères. Dans une telle hypothèse, le tarif d'achat de l'électricité est alors plus faible (d'environ 0,5 c€/kWh), ce qui détériore encore le résultat prévisionnel d'une éventuelle installation.

## Variante 2 : le taux de valorisation de la chaleur produite est de 50 %

C'est le cas d'une installation située à proximité d'une industrie ayant des besoins d'énergie thermique pour ses process ou auprès de grands bâtiments tertiaires ou immeubles.

On obtient :

Prix du combustible : 0 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	3,2	1,7
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	5,9	5,9
Ecart prix d'achat/ prix de revient	c€/kWh	+ 2,7	+ 4,1

Prix du combustible : 4,5 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	5,5	4,0
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	5,9	5,9
Ecart prix d'achat /prix de revient	c€/kWh	+ 0,4	+ 1,9

La production d'électricité à partir de telles installations est envisageable, l'équilibre étant atteint, mais de justesse, quand le combustible coût 15 €/t. Rappelons toutefois que le taux de valorisation de la chaleur retenu suppose que la centrale soit implantée en zone industrielle ou à proximité d'une grande agglomération (5 000 équivalents logements à alimenter en chaleur).

### d) Les scieries

On obtient :

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	6,3	4,7
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	5,5	5,5
Ecart prix d'achat /prix de revient	c€/kWh	- 0,8	+ 0,8

Le TRI souhaité de 10 % ne peut être atteint qu'avec attribution de subventions et il est peu probable qu'une PME opte pour la cogénération à partir de bois au regard de :

- la complexité technique et administrative du dossier
- l'intérêt économique très limité et incertain d'un tel projet.

### e) Les réseaux de chaleur

Variante 1 : le réseau de chaleur valorise 50 % de la chaleur produite pendant 5 000 heures par an

On obtient :

Prix du combustible : 10,5 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	11,4	9,0
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	5,9	5,9
Ecart prix d'achat/prix de revient	c€/kWh	- 5,6	- 3,2

Prix du combustible : 15 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	13,7	11,3
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	5,9	5,9
Ec art prix d'achat/prix de revient	c€/kWh	- 7,9	- 5,4

**L'équilibre économique n'est jamais atteint.** Les pertes d'exploitation sont fortes même dans l'hypothèse d'un TRI nul.

Sur la base de la tarification envisagée, on ne pourra pas produire d'électricité avec une telle centrale s'approvisionnant en totalité ou en partie avec des plaquettes forestières dont le prix se situe autour de 15 €/MWh PCI (38 €/tonne fraîche), quel que soit le TRI souhaité.

**Variante 2 : le réseau de chaleur valorise 70 % de la chaleur produite pendant 7 500 heures par an**

On obtient :

Prix du combustible : 10,5 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	7,4	5,8
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	6,1	6,1
Ecart prix d'achat/prix de revient	c€/kWh	- 1,3	+ 0,3

Prix du combustible : 15 €/MWh PCI

		Subventions	
		0 %	40 %
Prix de revient de l'électricité	c€/kWh	9,7	8,1
Prix d'achat de l'électricité	c€/kWh	6,1	6,1
Ecart prix d'achat/prix de revient	c€/kWh	- 3,6	- 2,0

Par rapport à la situation précédente, le résultat est amélioré mais reste toujours négatif même dans l'hypothèse d'une rentabilité nulle (TRI = 0 %).

Il n'y a donc pas d'application possible de production d'électricité (avec cogénération) dans les chaufferies alimentant des réseaux de chaleur à partir de produits forestiers sur la base de la tarification actuelle.

**Conclusion**

Au regard des simulations précédentes, le tarif d'achat de l'électricité produite à partir de biomasse ligneuse limite la réalisation d'opérations à quelques sites susceptibles de disposer d'un combustible à valeur nulle :

- **les industries de la trituration**, principalement les usines de pâte à papier, qui ne sont pas encore toutes équipées en centrales de cogénération pour brûler leurs sous-produits
- **les centres de traitement des bois de rebut souillés** qui n'auraient pas d'autre débouché que l'incinération avec production d'électricité associée, filière qui s'inscrit dans une logique d'élimination de déchets plutôt que d'une valorisation énergétique optimisée d'une énergie renouvelable.

Des centrales sur réseaux de chaleur alimentées en biomasse forestière ou en produits connexes de l'industrie du bois sont, compte tenu des coûts d'approvisionnement de ces combustibles, inenvisageables.

Pour la petite industrie du bois, si on ne peut exclure quelques cas favorables à la cogénération, la plupart des entreprises opteront pour le séchage du bois et le chauffage des ateliers (production de chaleur seule) ou la vente de leurs produits connexes à l'industrie de la trituration. Elles hésiteront à s'engager dans la réalisation d'une centrale de production d'électricité assez complexe et dont l'intérêt économique est comparable voire inférieur aux autres modes de valorisation envisageables.

Compte tenu des technologies disponibles et des rendements qui peuvent être atteints, le développement de la production d'électricité à partir de biomasse aurait de toute façon été difficile, comme le montre l'exemple des autres pays européens où le développement des chaufferies bois pour la production de chaleur seule est beaucoup plus fréquent que la cogénération. Le tarif d'achat proposé ferme toute perspective de développement à grande échelle en France, ce qui est en totale contradiction avec les objectifs ambitieux retenus par la Programmation Pluriannuelle des Investissements (entre 300 et 1 000 MW<sub>e</sub> à l'horizon 2010), qu'il ne faut en l'occurrence pas hésiter à qualifier de totalement irréalistes !

Les conditions économiques des différents pays européens étant très voisines, la production d'électricité à partir du bois (notamment de biomasse forestière) passe, en France, par l'institution de tarifs d'achat d'électricité correspondant à ceux pratiqués en Allemagne et dans d'autres pays européens soit des prix compris dans une fourchette de 8 à 10 c€/kWh<sub>e</sub>.

---

### **Pour en savoir plus**

Serge DEFAYE, Biomasse Energie  
Tel : 05 53 31 09 33  
e-mail : snc.debat@wanadoo.fr

## Atelier 15

### *L'intérêt économique de la production décentralisée de chaleur*

Christian TRACHSEL, Ville de Neuchâtel

#### **Intégration des coûts externes dans les choix énergétiques**

En Suisse, la problématique des coûts externes liés à l'énergie a été évaluée et a été l'objet d'un rapport intitulé « Les milliards oubliés (1996) ». Cette étude démontre que la production et l'utilisation d'énergie en Suisse engendrent des coûts indirects de l'ordre de 11 à 16 milliards de francs suisses par année. N'étant pris en charge ni par les producteurs d'énergie, ni par les consommateurs, on parle de coûts externes.

Dans le seul domaine de la pollution de l'air causée par l'utilisation de l'énergie, les coûts externes sont estimés à un montant annuel compris entre 1,8 et 4,3 milliards de francs suisses, montant assumé essentiellement par les collectivités publiques. Il s'agit principalement d'atteintes à la santé, de dégâts portés aux forêts, de pertes de rendement dans l'agriculture et de dégâts causés aux bâtiments. Sur la base de ce rapport, l'Office fédéral de l'énergie a émis des recommandations afin d'uniformiser l'approche dans ce domaine sur l'ensemble du territoire national. Les valeurs de majoration du prix de l'énergie correspondant à la couverture de ces coûts externes sont les suivantes pour les principaux agents énergétiques :

	<b>Coûts externes</b>	<b>Prix énergie (octobre 2002)</b>
Mazout	4,5 ct. / kWh	4,3 ct. / kWh
Gaz naturel	3,0 ct. / kWh	6,2 ct. / kWh
Bois	1,5 ct. / kWh	5,0 ct. / kWh
Electricité	5,0 ct. / kWh	25,0 ct. / kWh

La précision de ces surcoûts est évidemment toute relative. Toutefois, renoncer à en tenir compte revient en fait à leur affecter une valeur nulle. Sur la base de ce raisonnement, le Canton de Neuchâtel a introduit dans sa législation l'obligation pour les collectivités publiques de procéder à des analyses économiques prenant en compte les coûts externes pour leurs propres bâtiments en cas de nouvelle construction ou pour l'assainissement de tout immeuble existant.

La Ville de Neuchâtel, qui est propriétaire d'environ 250 immeubles, a acquis depuis plus de 5 ans une riche expérience dans ce domaine.

A titre d'exemple, nous présentons ici une comparaison de variantes lors de l'assainissement d'une installation de production de chaleur. Il s'agit d'une maison pour personnes âgées dont la chaudière à mazout, datant de 1982, doit être remplacée (les produits de combustion ne répondent plus aux exigences fixées par le Service de la protection de l'environnement). La consommation énergétique actuelle est d'environ 23'500 litres de mazout par année pour le chauffage du bâtiment et la production d'eau chaude sanitaire.

A l'occasion de ce simple remplacement de chaudière, il a été décidé d'envisager une conversion de l'agent énergétique en passant du mazout au gaz naturel. L'opportunité de réaliser une installation solaire thermique pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire a également été évaluée.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de la comparaison des 4 variantes :

	<b>Prix du kWh thermique</b>	
	Sans coûts externes	Avec coûts externes
Mazout	6,4 ct. / kWh	11,7 ct. / kWh
Mazout + solaire	6,7 ct. / kWh	11,9 ct. / kWh
Gaz naturel	7,7 ct. / kWh	10,9 ct. / kWh
Gaz naturel + solaire	8,0 ct. / kWh	11,1 ct. / kWh

Le prix du kWh thermique a été déterminé en tenant compte de l'investissement et des frais d'exploitation, dont la fourniture d'énergie finale.

### **Conclusion**

Entre l'approche « traditionnelle » (sans coûts externes) et la démarche qui consiste à internaliser les coûts externes, on constate, dans ce cas particulier, un classement complètement modifié. On relèvera en particulier que la variante « gaz naturel + solaire thermique », qui a été finalement choisie, se trouve être plus avantageuse que la variante « mazout ».

---

### **Pour en savoir plus**

Christian TRACHSEL, Ville de Neuchâtel  
Tel : +41 32 717 76 64  
e-mail : christian.trachsel@ne.ch