

# Cogénération à partir de la biomasse

## Quel stade de développement?

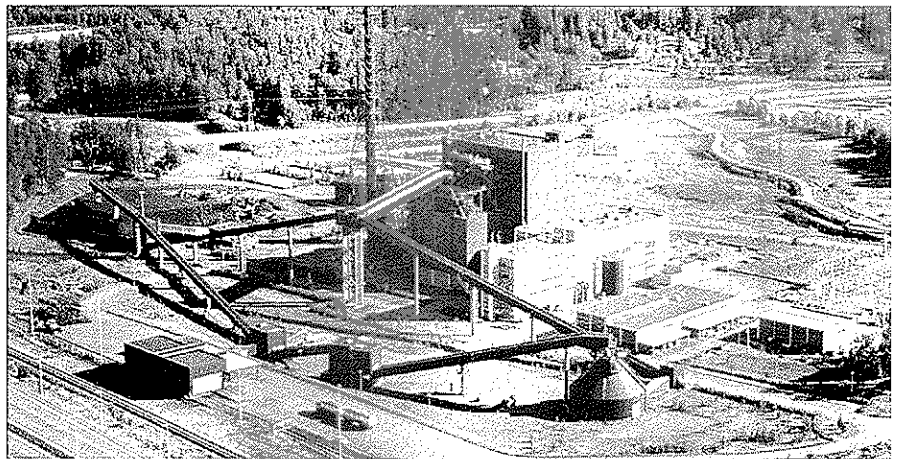
*La production de chaleur, ou de vapeur, dans des chaudières à bois de forte puissance, est un procédé utilisé depuis longtemps dans l'industrie pour les besoins de process et qui se développe désormais en Scandinavie, au Danemark et en Autriche pour alimenter des réseaux de chauffage urbain. Cette technique présente d'excellents résultats énergétiques et environnementaux, tout particulièrement sur les réseaux basse température lorsqu'elle permet de récupérer la chaleur latente de vaporisation en condensant les fumées : le rendement énergétique est alors accru de 15 à 20 % et les rejets gazeux abaissés très en-deçà des normes réglementaires européennes.*

Des industriels et des collectivités envisagent désormais de produire de l'électricité et de la chaleur dans des centrales de cogénération à partir de la biomasse, selon deux modalités : combustion/turbine à vapeur, ou gazéification/turbine à gaz associée éventuellement à une turbine à vapeur (cycle dit combiné), actuellement au stade de la démonstration.

### *Pourquoi la cogénération?*

*A priori*, les combustibles liquides et gazeux sont mieux adaptés que les combustibles solides à la fabrication d'électricité. Avec une turbine à gaz ou des moteurs thermiques au fioul ou au gaz, on peut obtenir des rendements électriques dépassant 30 % (proches parfois de 40 %), nettement supérieurs à ceux qui peuvent être atteints à partir d'une chaudière à vapeur au bois et d'une turbine à contre-pression ou à condensation, notamment dans une gamme de puissance autour de 20 - 30 MWe, puissance au-delà de laquelle le périmètre de collecte de la biomasse (plus de 150 000 tonnes de bois par an) et les frais de transport afférents deviennent souvent trop importants.

Produire à partir de la biomasse de l'électricité (et pas uniquement de la chaleur) comporte toutefois un intérêt évident en raison de la multiplicité de ses usages et de sa valeur élevée. Les collectivités et les industries sont en conséquence tentées de privilégier cette option, en particulier lorsque leurs besoins de chauffage sont quan-



Cogénération en Finlande (Tampella Power)

tativement restreints ou limités à la période hivernale.

### *Quelles solutions actuellement disponibles?*

Dans une centrale produisant simultanément de l'électricité et de la chaleur, on recherche non seulement un rendement énergétique global élevé mais aussi un rapport chaleur/force le plus proche possible de un ; autrement dit, on essaie de maximiser la fourniture d'électricité au détriment de la chaleur, forme dégradée de l'énergie, considérée en l'espèce comme résiduelle.

Parmi les deux technologies précitées, la turbine à vapeur, solution ancienne et éprouvée, offre de nombreux avantages. La vapeur peut par exemple être produite, dans une chaudière à lit fluidisé dense ou circulant, à partir de combustibles biomasse hétérogènes très bon marché (résidus forestiers, écorces, liqueurs noires...), en mélange éventuellement avec du charbon ou des déchets, avec un excellent rendement de combustion et des performances environnementales très satisfaisantes. Son principal inconvénient tient aux limites intrinsèques de la turbine à vapeur : le rendement électrique, dans la gamme de puissance considérée, plafonne à 25 % par rapport au contenu énergétique du combustible. Une augmentation de l'enthalpie (pression et température) à l'entrée de la turbine ou la resur-

chauffe de la vapeur (réinjectée dans la turbine) aboutit seulement à un gain de rendement électrique de quelques points (2 à 6 %), avec des coûts d'investissement beaucoup plus élevés.

Seconde technologie en cours de développement, la gazéification consiste à fabriquer puis à injecter des gaz pauvres dans une turbine à gaz analogue à celles utilisées avec le gaz naturel. L'énergie résiduelle contenue dans les gaz d'échappement est récupérée dans un échangeur et utilisée dans une turbine à vapeur. Grâce à la combinaison de ces deux étages de production d'électricité (IGCC), le rendement électrique escompté est proche de 40 % (gazéification à pression atmosphérique), voire 45 % (gazéification sous pres-

sion). Une variante envisagée, mais non validée, consisterait à injecter la vapeur directement au niveau de la turbine à gaz (STIG), ce qui laisse espérer, en relevant l'enthalpie des gaz, un rendement électrique compris entre 30 et 37%.

Ces solutions attrayantes n'en sont cependant qu'au stade de la démonstration et on doit attendre une confirmation de leurs performances réelles, de même que des évaluations plus précises de leurs coûts d'investissement et d'exploitation. Par ailleurs, elles exigent un combustible bois de bonne qualité (granulométrie homogène) et préalablement séché, ce qui en renchérit le coût « entrée gazéifieur ».

### Quelles applications?

Les perspectives de la cogénération à partir de biomasse dépendent de facteurs très différents selon les pays européens : rigueur du climat et besoins relatifs en électricité et en chaleur, coûts comparés des combustibles fossiles et renouvelables, tarifs d'achat hiver et été de l'électricité par les compagnies de distribution.

Schématiquement, on peut distinguer deux grandes familles d'applications :

– La première concerne les industries ayant d'importants besoins en vapeur et en électricité,

comme les papeteries, et qui disposent de résidus ligneux à très bas prix à proximité de l'usine ou dans les meilleurs des cas *in situ* et gratuits. L'exploitant de la centrale doit prioritairement fournir au process industriel de la vapeur à une température et une pression exigées. La vapeur produite par la chaudière, en général autour de 400 à 500°C et 40 à 50 bars, peut être turbinée de façon à abaisser l'enthalpie au niveau souhaité. Dans cette configuration, l'électricité est en quelque sorte un sous-produit, « soutiré au passage », de la vapeur de process, et le rendement électrique inférieur à 15% est acceptable puisqu'on épuise en totalité la vapeur en fin de cycle.

## Présentation de quelques sites en fonctionnement

*L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) a chargé Biomasse Normandie d'une étude technico-économique de sites de production combinée d'électricité et de chaleur par combustion de biomasse et turbines à vapeur.*

Les technologies disponibles permettent d'envisager divers modes de fonctionnement en fonction des objectifs des maîtres d'ouvrage et des conditions de vente de l'énergie électrique ou thermique. Cette étude a permis de caractériser différents types de fonctionnement en fonction des contextes d'implantation des installations de cogénération, au travers de l'analyse de 8 cas :

- 3 papeteries en France (A, B, C);
- 4 centrales de cogénération reliées à des réseaux de chaleur, toutes les quatre à l'étranger (D, E, F, G);
- 1 centrale de cogénération vapeur/électricité en collaboration avec un industriel (H).

### Les papeteries

Les papeteries, quel que soit le procédé de fabrication du papier, produisent d'importantes quantités de déchets ligneux : écorces, liqueurs noires, boues d'épurations chargées en fibres ligneuses. Elles ont parallèlement d'importants besoins en énergie, sous forme de vapeur et d'électricité. L'utilisation des déchets ligneux pour la production d'énergie est pratiquée depuis longtemps par les papetiers, offrant ainsi un débouché pour des produits qui pourraient devenir encombrants, et fournissant à bas prix (le combustible étant gratuit), une énergie indispensable à la fabrication du papier.

Sur les 3 papeteries présentées, 2 (A et B) produisent du papier à partir d'un procédé chimique,

la troisième (C) utilise un procédé thermo-mécanique.

Ces procédés sont techniquement très différents au niveau de la fabrication de la pâte, et les besoins en énergie s'en ressentent :

#### Pâte chimique

- 1 400 kWh électriques/tonne de papier,
- 5 800 kWh thermiques/tonne de papier.

#### Pâte thermo-mécanique

- 2 200 kWh électriques/ tonne de papier,
- 1 750 kWh thermiques/ tonne de papier.

Le principe de cogénération par combustion/turbine à vapeur entraîne la production d'environ 1 kWh électrique pour 5 kWh thermique ( $\eta_{\text{électrique}}$  de 15 à 20%,  $\eta_{\text{chaudière}}$  de 75 à 80%).

Les papeteries utilisant une pâte chimique ayant des besoins en énergie thermique (essentiellement sous forme de vapeur saturée) quatre fois plus importants que leurs besoins en énergie

électrique, la cogénération est particulièrement bien adaptée à ces process industriels. Aussi la plupart d'entre elles ont adopté depuis longtemps la cogénération. C'est le cas des 2 papeteries de ce type présentées ici, qui autoproduisent 55% et 60% de leurs besoins en électricité.

Dans le cas de papeteries utilisant une pâte thermo-mécanique, les besoins électriques sont beaucoup plus importants que les besoins en vapeur-process. L'intérêt de la cogénération est moins évident puisqu'elle ne peut permettre de produire qu'une petite partie de l'ensemble des besoins électriques. Certaines de ces papeteries ont préféré n'utiliser leurs déchets que pour la production de vapeur-process, sans production combinée d'électricité. D'autres, comme la troisième papeterie étudiée, n'ont pas fait le même choix, et ont opté pour l'autoproduction d'une partie de leur électricité (16% dans le cas étudié), à partir de leurs déchets ligneux mais également de gaz naturel.

Pour ces industriels, l'efficacité du système passe par une élimination régulière des déchets ligneux produits par l'usine, tout en pourvoyant à la demande en énergie thermique du process. La production d'électricité n'est intéressante que dans la mesure où elle est co-produite en amont et simultanément à la production de vapeur process. L'optimisation du rendement électrique n'est donc pas une priorité pour les industriels, et n'est que de 8 à 15% pour les installations étudiées.

La cogénération en papeteries est donc essentiellement liée à la valorisation des déchets ligneux, produits généralement en quantité plus que suffisante pour satisfaire les besoins en énergie thermique de l'usine, et susceptible de surcroît de couvrir éventuellement une partie de ses besoins électriques.

### Cogénération et réseaux de chaleur

Deux des sites étudiés correspondent à ce que l'on peut qualifier de logique « réseaux

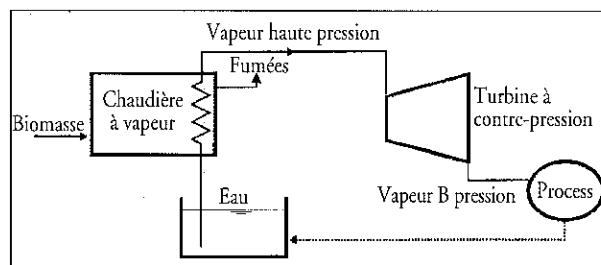


Figure 1 : Les papeteries

– La seconde intéresse les chaufferies des réseaux de chaleur urbains ou tertiaires qui souhaitent maximiser leurs résultats économiques. La problématique est alors très différente puisque l'exploitant doit optimiser la production d'électricité (co-produit le mieux valorisé), tout en récupérant de la chaleur à un prix égal ou inférieur aux énergies thermiques concurrentes.

L'opportunité de la cogénération s'appréhende ici en prenant en compte les coûts d'investissement et d'exploitation imputables à chacune des deux sorties.

On peut ainsi comparer respectivement le prix de l'électricité produite par la centrale et celle

fournie (ou achetée) par le réseau, ainsi que le prix de la chaleur « cogénérée » par rapport à celle provenant d'une simple combustion directe.

Cette analyse peut conduire à renoncer à la cogénération lorsque les surcoûts d'un générateur de vapeur (par rapport à une chaudière à eau chaude) et d'un alternateur sont beaucoup trop longs à amortir. L'association d'une cogénération au gaz naturel et d'une chaudière bois en semi-base peut aussi, en mariant deux combustibles utilisés à leur optimum, s'avérer efficace au plan énergétique et rentable au plan économique.

Enfin, dans les pays qui ont recours, et de façon massive, au chauffage électrique (France, Bel-

gique...), les promoteurs de la cogénération ne peuvent pas se désintéresser des utilisations de l'électricité « au-delà du compteur » : mieux vaut en effet favoriser le retour au chauffage à eau chaude plutôt que de fabriquer de l'électricité, dans de petites centrales et avec des rendements médiocres, pour la dégrader ensuite en chaleur par effet Joule!

Serge Defaye  
Biomasse Normandie

Tableau 1 : Caractéristiques des installations

Site	Pays	Type	P. chau- dière (MW)	P. ther- mique (MW)	P. élec- trique (MW)	Pression vapeur sortie chaudière (bars)	T° vapeur sortie chau- dière (°C)	Type de turbine
A	France	Papeterie	285	239	40,5	60/45	450/450	Contrepression
B	France	Papeterie	125	105	14	85/40	450/420	Contrepression
C	France	Papeterie	50	50	9	48	460	Contrepression
D	Suisse	Réseau de chaleur	6,15	5,7	0,7	31	420	Contrepression
E	Espagne	Réseau de chaleur	12	10	1,73	40	400	Contrepression
F	Danemark	Réseau de chaleur	33,2	26	10	90	520	Condensation
G	Finlande	Réseau de chaleur	295	250	87	136	533	Condensation
H	Zone tropicale	Centrale thermique	220	150	62	82	525	Condensation

Tableau 2 : Productions et rendements

Site	Rendement global d'ex- ploitation (%)	Rendement électrique annuel (%)	Valorisation thermique (%)	Rendement chaudière (%)	Production en MWh/an		
					Chaleur	Vapeur	Électricité
A	71,3	8,2	63,1	78,4	-	1 284 072	166 930
B	73,1	10,1	63,0	81,5	-	570 000	91 818
C	76,1	15,6	60,5	83,5	-	173 720	40 811
D	83,0	12,2	70,9	83,8	14 000	-	2 400
E	28,4	11,1	17,2	80,0	10 800	-	7 000
F	87,7	24,8	62,8	92,2	110 000	-	43 500
G	83,8	24,0	59,9	92,0	700 000	300 000	400 000
H	34,8	29,4	5,4	90,1	-	61 600	336 300

de chaleur » : la priorité de la centrale est la production d'énergie thermique, la chaudière étant légèrement surdimensionnée et produisant de la vapeur, afin d'obtenir, après détente dans une turbine, de l'électricité, co-produite à haute valeur ajoutée.

La faiblesse des rendements électriques moyens observés (11 à 12%) est la résultante de cette orientation. Les turbines utilisées sont de type contrepression, technologie plus simple et moins onéreuse que la condensation, mais ne permettant pas « d'épuiser » la vapeur lorsque les besoins de chaleur diminuent.

La centrale D (Suisse), malgré des coûts d'investissement élevés, obtient un bon résultat financier (marge de 12% du chiffre d'affaires) grâce à un montage financier avantageux (l'ensemble des aides correspond à une subvention à l'investissement de 43,6), et à des prix de vente de la chaleur et de l'électricité élevés (359 F/MWh<sub>thermique</sub> et 711 F/MWh<sub>électrique</sub>). Les recettes proviennent majoritairement de la vente de chaleur. Le rendement global d'exploitation élevé (83%) pour un rendement chaudière de

83,8% montre que le dimensionnement a été très judicieusement optimisé par rapport aux besoins thermiques.

La centrale E (E s p a g n e)

connaît quelques difficultés, avec notamment un rendement d'exploitation assez faible (28,4%) : elle fonctionne en partie comme une simple centrale électrique, sans valorisation de chaleur (valorisation thermique moyenne de 17,2%). Ceci s'explique par le fait que le prix de vente de la chaleur est très faible (66 F/MWh) et que les besoins thermiques du réseau de chaleur du village ne sont pas très élevés par rapport à la puissance des chaudières : si la centrale fonctionnait seulement pour produire la chaleur nécessaire au réseau, la fourniture d'électricité diminuerait considérablement, et le montant des recettes serait très nettement réduit. Or actuellement, c'est le produit de la vente d'électricité qui per-

met à l'installation d'atteindre un résultat à peu près équilibré (83% des recettes sont assurés par la compagnie électrique). Les « pertes » par mévente de l'énergie thermique produite sont de près de 2 MF chaque année par rapport à une valorisation de 100% de la chaleur actuellement produite par l'installation (ce qui exigerait tout de même un réseau quatre fois plus important!).

Cette centrale est en porte-à-faux entre les deux logiques : d'une part une configuration technique qui est celle d'un « réseau de chaleur » (turbine à contrepression - production principale d'énergie thermique et d'électricité à la marge), d'autre part des besoins de chaleur trop faibles pour procurer les recettes nécessaires à l'équilibre financier ce qui contraint à un mode de fonctionnement de type « centrale électrique » pour augmenter les recettes, mais avec un rendement électrique nominal de 14%, beaucoup trop faible dans ce cas.

Deux évolutions possibles, et éventuellement complémentaires, peuvent être et sont d'ailleurs envisagées par les maîtres d'ouvrage : d'un côté l'extension du réseau de façon à valoriser une plus grande partie de la chaleur produite, de l'autre l'installation d'une turbine à condensation à soutirage, qui permettrait d'améliorer sensiblement le rendement électrique (lequel pourrait raisonnablement atteindre 22%).

### Centrales électriques avec production associée de chaleur

Les centrales F et G (Danemark et Finlande) ont été conçues selon un raisonnement différent, dans une optique de petite « centrale électrique », avec pour objectif premier de produire de l'élec-

tricité en cherchant à optimiser le rendement électrique (24 à 29%), et de fournir parallèlement de la chaleur à un réseau. La chaudière est alors très nettement surdimensionnée (par rapport aux besoins

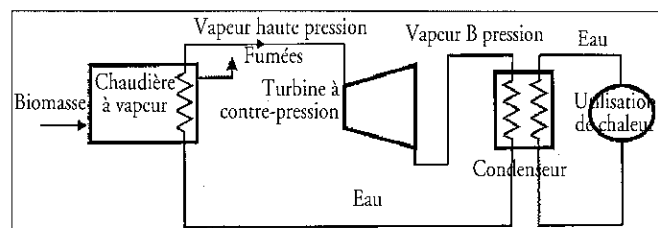


Figure 2 : Réseaux de chaleur

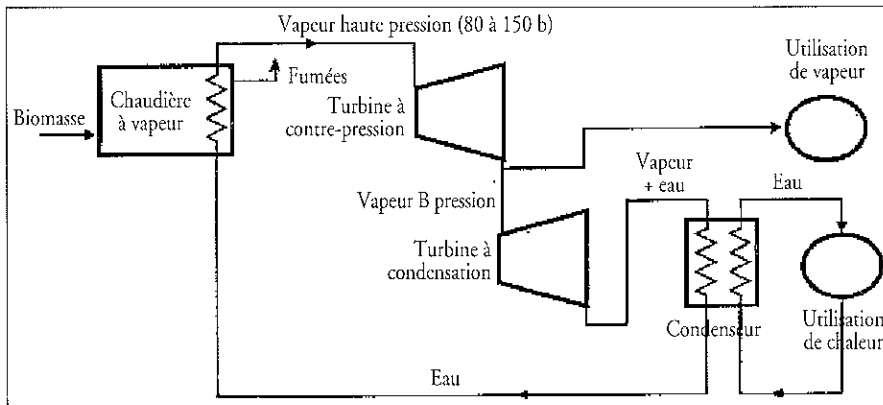


Figure 3 : Centrales électriques



Production d'énergie à partir de biomasse et de combustible fossile (CdF Ingénierie)

thermiques) et fournit de la vapeur haute pression (80 à 136 bars), qui est ensuite détendue dans des turbines à condensation à soutirages multiples, ce qui permet d'extraire le maximum d'électricité par rapport aux « sorties secondaires » chaleur ou vapeur de process.

Dans les deux cas le rendement global est très élevé (84 à 88%), ce qui démontre une optimi-

sation de l'ensemble des installations. La complexité de ces centrales est beaucoup plus grande que pour celles évoquées précédemment, qui alimentent en priorité des réseaux de chaleur, puisqu'il faut ici gérer les différents débits de soutirage en fonction de la demande instantanée d'énergie thermique.

Le calcul économique pour la centrale finlandaise (G), qui laisse apparaître un déficit important, est à considérer avec précaution car basé sur des ratios théoriques d'investissement et de coût de combustible, les responsables de la centrale n'ayant pas souhaité indiquer leurs coûts réels.

Le cas de la centrale associée à un industriel (H), est encore assez différent : on ne peut plus guère parler de cogénération dans la mesure où malgré un rendement chaudière de 90%, le rendement d'exploitation effective n'est que de 35%, 5% seulement de la chaleur produite étant valorisés sous forme thermique.

Dans le contexte d'une activité industrielle saisonnière (transformation de la canne à sucre), un montage technico-économique original entre deux partenaires (l'industriel sucrier et le pro-

ducteur d'électricité) a été imaginé :

- l'industriel sucrier fournit gratuitement à la centrale ses déchets ligneux (bagasse) et obtient en contrepartie l'énergie thermique et électrique nécessaire à son process;
- la centrale voit ainsi son potentiel d'électricité commercialisable réduit de 7%, mais se procure en contrepartie de la bagasse (37% de sa consommation annuelle en combustible) en substitution à environ 60 000 tonnes par an de charbon;
- l'électricité excédentaire est vendue au réseau EdF.

## La vente d'énergie électrique et thermique

Quatre des sites étudiés sont des installations conçues pour vendre de l'électricité au réseau de distribution et de l'énergie thermique à un réseau de chaleur. Les conditions d'achat par les compagnies électriques et les distributeurs de chaleur sont très différentes d'un pays à l'autre et conditionnent lourdement le résultat économique. Les prix de vente de l'électricité et de la chaleur s'échelonnent respectivement de 200 à 867 F/MWh<sub>électrique</sub>, ou de 66 à 359 F/MWh<sub>thermique</sub>. Les prix de vente élevés de l'électricité proviennent d'un choix politique sous forme d'obligation d'achat de l'énergie électrique produite à partir de ressources renouvelables. Le prix de vente de la chaleur est calé sur les énergies concurrentes, avec des écarts liés notamment aux taxes sur les énergies fossiles en place dans certains pays.

Pour l'ensemble des sites étudiés, et quels que soient les choix technologiques retenus, un prix d'achat de l'électricité par la compagnie de distribution de l'ordre de 500 à 600 francs/MWh semble nécessaire à l'équilibre financier de l'installation. Même dans les exemples les plus favorables (D et F), un prix d'achat tel que pratiqué en France par EdF (300 à 400 F/MWh) ne permet pas d'envisager la rentabilité d'une installation de cogénération à partir de biomasse ligneuse. En France, sans doute vaut-il mieux se limiter dans l'immédiat à une production de chaleur seule, le surcoût pour l'installation d'un générateur de vapeur haute pression et d'un groupe turboalternateur n'étant pas compensé par le faible différentiel de prix entre le MWh thermique et le MWh électrique acheté par la compagnie d'électricité à un prix beaucoup trop bas.

Yann Oremus  
Biomasse Normandie

Tableau 3 : Aspects économiques

Site	Investissement (KF)	Coûts d'entretien (KF/an)	Répartition des coûts annuels en %		Prix de vente ou de revient en F/MWh			Résultat (F)	En % du CA
			Combustible	Amortissements	Exploitation	Chaleur	Vapeur		
A	400 000	9 500	12,1	75,5	12,4	-	35	193	-
B	-	5 500	66,1	0,0	33,9	-	20	53	-
(*)	106 300	5 500	27,5	58,4	14,1	-	53	93	-
C	77 100	1 100	47,6	46,2	6,2	-	69	159	-
D	73 865	1 106	38,4	39,1	22,4	359	-	711	+ 523 000 + 12%
E	14 900	744	34,0	47,9	18,1	66	-	575	+ 41 645 + 1%
F	216 000	7 600	42,2	42,1	15,7	196	-	867	+ 5 249 000 + 11%
G	783 000	13 600	55,9	36,7	7,4	90	100	200	- 10 140 600 - 5,5%
H	570 000	-	38,0	51,1	10,8	-	0	300	-

\* L'investissement réalisé pour l'ensemble de l'installation est à ce jour amorti. La ligne inférieure correspond à une simulation théorique dans le cas d'un changement de chaudière