



## Simulations de la production combinée d'électricité et de chaleur à partir de bois

### Commentaires sur les hypothèses et les résultats

#### Préambule / avertissement

La présente note a été élaborée par un groupe de travail animé par le CIBE, lequel rassemble les acteurs du domaine du bois-énergie, toutes professions regroupées.

Elle est directement issue de l'étude réalisée par le CIBE en 2009 à l'occasion de la révision prévue de l'arrêté tarifaire d'avril 2002. Les calculs techniques sont réalisés suivant la même méthode que celle adoptée il y a trois ans, et les résultats sont une actualisation de ceux de 2009, avec prise en compte, naturellement, de l'évolution de certaines données économiques de base.

La problématique est basée sur des considérations énergétiques et environnementales. Une production d'électricité et de chaleur issue de biomasse doit répondre aux deux principes suivants :

- performance énergétique globale ;
- recours prioritaire aux ressources locales, ce qui suppose une production décentralisée.

Le premier principe, lié à la nécessité impérieuse de production d'électricité par cogénération (principe maintenant largement admis), sous-tend la valorisation maximale et durable de l'énergie thermique produite et conduit à la recherche d'économies d'énergie primaire par rapport à des productions séparées d'électricité et de chaleur.

Le deuxième principe repose sur des exigences économiques et écologiques (et aussi en termes de durabilité), concernant aussi bien la proximité de la ressource en bois que des débouchés chaleur. Ceci conduit à viser des puissances moyennes ou basses de façon prioritaire (de 500 kWé – voire moins – à 5 MWé environ), en conformité avec les besoins énergétiques de la majorité des acteurs économiques proches des grands bassins forestiers.

Les résultats et commentaires qui suivent constituent une contribution à la réflexion mais ne concluent pas, en l'état, sur des préconisations de tarifs d'achat d'électricité, ni bien évidemment d'architecture de ceux-ci.

Le groupe de travail poursuit sa réflexion et se réserve la possibilité d'apporter des compléments et des suites à ses premières conclusions.

## **Hypothèses adoptées**

**Seules les filières « cycle normal de Rankine »** (chaudière vapeur associée à une turbine à vapeur) **et « cycle organique de Rankine »** (chaudière à huile thermique associée à un circuit de fluide organique et une turbine à vapeur) **ont été étudiées**, car ce sont actuellement les seules au stade de la maturité industrielle ; autrement dit, un opérateur énergétique peut les mettre en œuvre, au moins au plan technique, sans prendre de risque important, ce qui n'est pas le cas de la gazéification (au stade de la R&D ou de la démonstration).

**Seule la cogénération a été prise en compte**, car les rendements électriques de l'option vapeur / turbine sont médiocres ; le souci d'efficacité énergétique et environnementale et l'exploitation raisonnée des ressources en biomasse (renouvelables mais sur des cycles longs) exigent de ne pas disperser dans l'atmosphère l'énergie thermique coproduite (plus des 3/4 de l'énergie valorisable). **Notons que l'efficacité énergétique<sup>1</sup> d'une installation de cogénération biomasse doit être d'au moins 60-65% pour qu'une économie d'énergie primaire<sup>2</sup> soit observée, condition impérative pour justifier la cogénération** (ceci suppose que la cogénération soit pilotée par les besoins thermiques du site et non par la production d'électricité). **Dans le cas contraire, seule la valorisation thermique de la biomasse est écologiquement envisageable.**

Dans ces conditions, nous devons adopter **un raisonnement « de thermicien » et non « d'électricien »**. Le second, qui préside notamment à la logique des appels d'offres « biomasse », consiste à dimensionner l'installation pour maximiser la production d'électricité (fonctionnement en continu et à puissance maximale d'une turbine à condensation avec soutirage), sans véritablement prendre en compte le profil des besoins thermiques du site d'implantation : il en découle très souvent une efficacité énergétique limitée (de l'ordre de 60% voire moins). A l'inverse, **le raisonnement « de thermicien » consiste soit :**

- **à concevoir des installations en superbase, assurant la couverture des besoins thermiques permanents (talon) du site ; ce choix permet également une production maximale d'électricité ;**
- **à adapter la production thermique aux besoins de chaleur du site, en modulant de fait la production d'électricité cogénérée.**

**Dans les deux cas, l'efficacité énergétique dépasse alors 65% et peut atteindre 75-80% quand toute la chaleur est utilisée.**

**L'installation d'une unité de cogénération a été étudiée :**

- **dans l'industrie**, avec des durées moyennes de fonctionnement à équivalent pleine puissance de 5 000 et 8 000 h/an :
  - . de 0,5 à 3 MWé : cycle organique de Rankine, permettant d'assurer des besoins de process eau chaude et le chauffage des locaux ;
  - . de 3 à 5 MWé : cycle normal de Rankine avec turbine à contrepression permettant d'assurer des besoins de process vapeur et le chauffage des locaux ;
- **sur réseau de chaleur**, en cycle organique de Rankine de 0,5 à 5 MWé, en superbase sur la saison de chauffe (5 000 h/an) ou sur l'année (8 000 h/an).

**Nous nous sommes limités dans nos études à la gamme de puissance de 0,5 à 5 MWé** car c'est dans cette plage que se situe la quasi totalité des applications de cogénération bois dans l'industrie (à l'exception du cas particulier des papeteries et de quelques autres grosses industries) et dans les réseaux de chaleur :

- d'une part parce que la puissance thermique appelée en base voire superbase est 3 à 5 fois plus importante que la puissance électrique « installable » ;

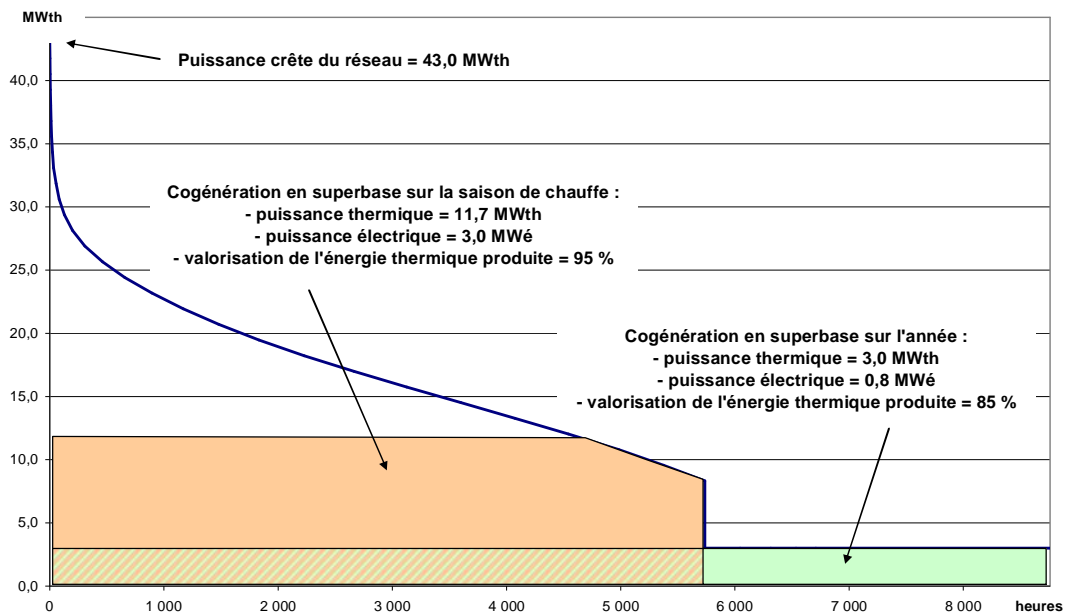
---

<sup>1</sup> Energie thermique et électrique valorisée rapportée à l'énergie primaire consommée

<sup>2</sup> Au sens de la directive européenne 2004/8/CE

- d'autre part parce que les gros sites industriels et réseaux de chaleur consommant de la vapeur de process ou de la chaleur (plus de 20 MW de puissance thermique appelée) font, pour la plupart, déjà appel à une autre base existante (récupération de chaleur fatale, incinération d'ordures ménagères...).

**Schéma 1 : Cogénération sur un réseau de chaleur : positionnement des deux cas étudiés sur la monotone de chauffage**



Les paramètres technico-économiques (rendements globaux, rendements électriques, coûts d'investissement et d'exploitation...) sont issus de l'interrogation des fournisseurs d'équipements dans cette gamme de puissance et d'adhérents du CIBE ayant étudié voire réalisé des installations de cogénération à partir de bois.

Les investissements sont amortis sur 20 ans (il faut évidemment dans ce cas que le contrat d'achat de l'électricité soit établi sur la même durée) et le taux de rentabilité considéré est basé sur la moyenne habituellement retenue par les investisseurs pour la concrétisation de projets de ce type (qui comportent des risques industriels et financiers non négligeables). On soulignera que pour une chaudière vapeur haute pression, à laquelle s'ajoutent turbine, équipements électriques et de couplage au réseau, les coûts d'investissement sont beaucoup plus lourds que pour une chaudière alimentant en vapeur basse pression ou en eau chaude une industrie ou un réseau urbain. De même, les coûts d'exploitation d'une installation vapeur (en raison d'un fonctionnement avec présence continue de personnel) sont beaucoup plus élevés que pour une chaudière à eau chaude 90-70 °C.

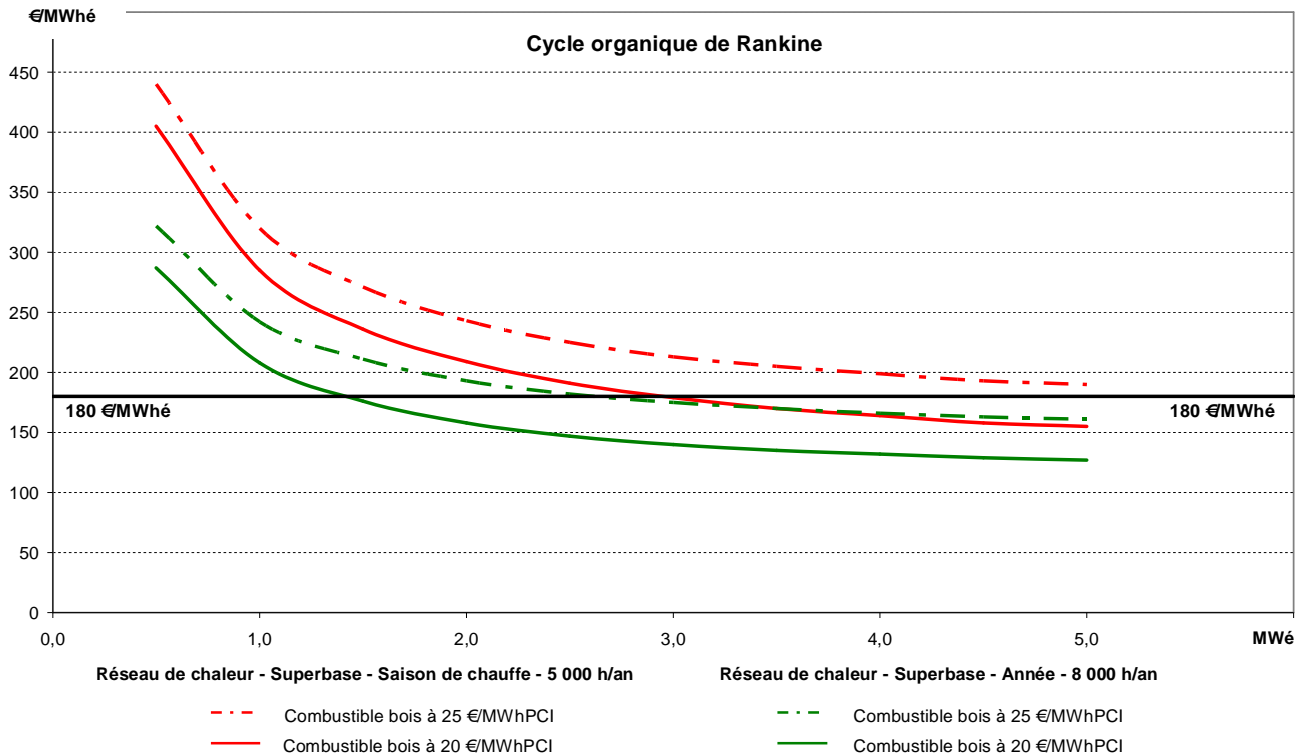
Deux valeurs ont été prises en compte pour le prix du combustible bois : 20 et 25 €/MWh entrée chaudière (PCI). La première (20 €) correspond au prix du marché pour des volumes importants et un produit préparé (calibré, homogénéisé...) et mixte (50% de plaquettes forestières, 50% de connexes de l'industrie du bois et de bois de rebut). La seconde valeur (25 €) correspond au coût moyen d'un combustible constitué majoritairement de plaquettes forestières.

Le prix de vente de la chaleur sortie chaudière et livré à un industriel ou à un opérateur de réseau correspond à un prix moyen de chaleur fatale, c'est-à-dire comprenant une décote par rapport à une production autonome à partir d'un combustible commercial (l'acheteur de vapeur ou de chaleur conserve en général ses chaudières existantes en appoint / secours).

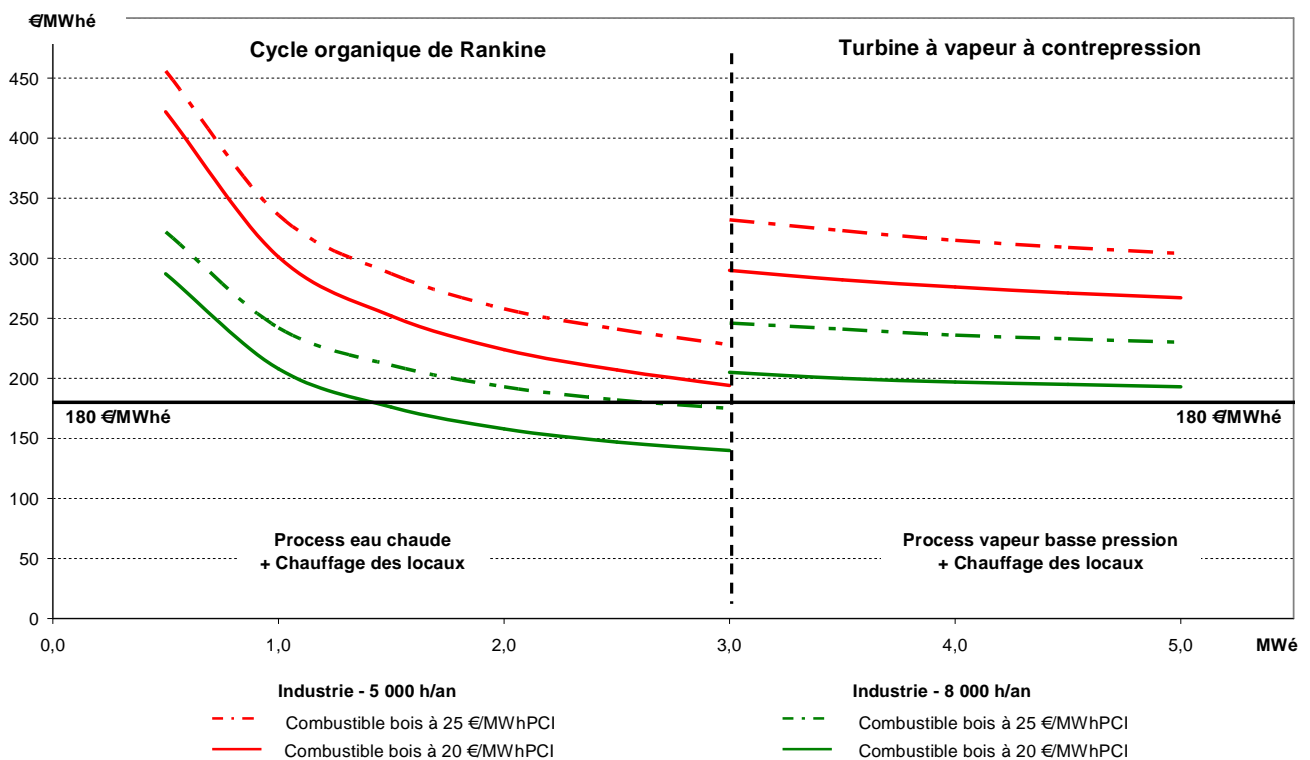
## Résultats obtenus

Les résultats des simulations effectuées par le CIBE sont synthétisés dans les deux graphiques ci-dessous. Les tableaux détaillés figurent en annexe.

**Graphique 1 : Coût de l'électricité produite à partir de bois sur un réseau de chaleur**



**Graphique 2 : Coût de l'électricité produite à partir de bois en industrie**



**Sur la plage de puissance considérée (0,5 à 5 MWé), la technologie « cycle organique de Rankine » permet d’obtenir des coûts de production d’électricité moindres qu’avec le « cycle normal de Rankine » associé à une turbine à contrepression.**

**Pour un prix de combustible bois de 20 €/MWh PCI, le coût de production d’électricité est inférieur à 180 €/MWhé dans trois cas :**

- **en superbase d’un réseau de chaleur sur l’année pour des puissances supérieures à 1,5 MWé ;**
- **en superbase d’un réseau de chaleur sur la saison de chauffe dès 3 MWé ;**
- **en industrie, dès 1,5 MWé en cycle organique de Rankine.**

**Un coût de l’électricité se situant dans une bande de 140 à 210 €/MWhé produite pour des installations d’une puissance comprise entre 1 et 3 MWé est cohérent avec les niveaux de rémunération de l’électricité (toutes bonifications confondues) observés dans les pays voisins (Allemagne, Belgique, Italie).**

**Il est utile de rappeler ici l’enjeu que représente le segment de marché 0,5-3 MWé : de nombreux réseaux de chaleur sont susceptibles de pouvoir accueillir de telles installations et la très grande majorité des secteurs industriels (notamment les industries agroalimentaires) est composée d’entreprises dont les besoins électriques propres se situent en dessous de 3 MWé (cf. étude réalisée par le CIBE en 2007 pour le compte de la DGEMP<sup>3</sup>).**

Ces petites unités se prêtent mieux à des logiques décentralisées de production locale, avec des **consommations unitaires de combustibles bois raisonnables** (de 5 000 à 60 000 t/an selon la puissance et les hypothèses adoptées) **correspondant à des rayons d’approvisionnement satisfaisants pour la plupart des régions françaises.** En outre, **ces installations sont équipées de systèmes performants de dépoussiérage des fumées permettant de respecter la réglementation en vigueur** (filtres à manches ou électrofiltres abaissant les émissions de poussières à moins de 20 mg/Nm<sup>3</sup> de fumées à 11% de O<sub>2</sub>). **Toutefois, ces installations de production combinée de chaleur et d’électricité ne pourront se développer que si elles sont en mesure de bénéficier des primes prévues dans l’arrêté tarifaire du 27 janvier 2011, ce qui n’est pas le cas aujourd’hui.**

Par ailleurs, sur un plan économique, il peut ne pas paraître logique que l’équilibre d’opération de cogénération bois soit recherché exclusivement à travers un prix d’électricité sous obligation d’achat dès lors qu’une chaleur renouvelable est également co-produite. De manière à ne faire supporter à l’électricité que les coûts liés à sa production, ces opérations pourraient être bénéficiaires des dispositifs d’aide à la production de chaleur (Fonds Chaleur), comme elles le seraient si celle-ci était produite indépendamment. Des simulations ont été menées en ce sens, non représentées sur les graphiques ci-dessus mais figurant des les tableaux en annexe.

*Pour le CIBE, Stéphane COUSIN (BIOMASSE NORMANDIE).*

*Avec la collaboration d’adhérents du CIBE.*

*Mars 2012*

---

<sup>3</sup> Etude relative au développement du bois-énergie dans l’industrie pour les besoins de process, de chauffage des locaux, de production d’électricité et de chaleur par cogénération - Marché d’étude CIBE – DGEMP 0701942-00-2-07-075-04 du 23 juillet 2007 – Rapport final, pages 10 à 12 et suivantes.

## ANNEXE

Industrie

Industrie - 5.000 h/an

Hypothèses

Puissance électrique	MWé	Cycle organique de Rankine						Turbine à vapeur à contrepression				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Puissance thermique disponible	MWth	2,0	3,9	5,9	7,8	9,8	11,7	13,9	15,8	17,5	19,2	20,7
Rendement électrique (par rapport à entrée chaudière)	%	17,0						14,3	14,7	15,0	15,4	15,7
Valorisation de l'énergie thermique produite	%	85						85				
Taux de valorisation énergétique (par rapport à sortie chaudière)	%	83						81				
Efficacité énergétique (par rapport à entrée chaudière)	%	71						69				
Durée de fonctionnement à équivalent pleine puissance	h/an	5 000						5 000				
Coût d'investissement	€/kWé	9 110	6 420	5 230	4 520	4 040	3 680	6 110	5 850	5 630	5 450	5 290
Taux de subvention (calcul d'après grille Fonds Chaleur)	%	14,9	15,2	15,2	15,5	16,0	16,6	11,3	11,1	11,0	10,8	10,7
Coût d'exploitation / maintenance	€/kWé	385	285	245	225	210	200	270	260	250	245	240
Prix d'achat du combustible bois	€/MWhPCI	20 et 25						20 et 25				
Prix de vente de la chaleur	€/MWhth	35,6	35,0	34,4	33,9	33,3	32,7	32,7	32,1	31,5	31,0	30,4

Résultats

€/MWhé	Prix du combustible (€/MWhPCI)	Puissance électrique (MWé)										
		Cycle organique de Rankine						Turbine à vapeur à contrepression				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Hors subvention chaleur	20	422	301	252	224	207	194	290	282	276	271	267
	25	456	336	287	258	241	228	332	323	315	309	304
Avec subvention chaleur	20	379	270	226	202	186	175	269	261	256	252	249
	25	413	305	261	236	221	209	310	302	295	291	286

Industrie - 8.000 h/an

Hypothèses

Puissance électrique	MWé	Cycle organique de Rankine						Turbine à vapeur à contrepression				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Puissance thermique disponible	MWth	2,0	3,9	5,9	7,8	9,8	11,7	13,9	15,8	17,5	19,2	20,7
Rendement électrique (par rapport à entrée chaudière)	%	17,0						14,3	14,7	15,0	15,4	15,7
Valorisation de l'énergie thermique produite	%	85						85				
Taux de valorisation énergétique (par rapport à sortie chaudière)	%	83						81				
Efficacité énergétique (par rapport à entrée chaudière)	%	71						69				
Durée de fonctionnement à équivalent pleine puissance	h/an	8 000						8 000				
Coût d'investissement	€/kWé	9 110	6 420	5 230	4 520	4 040	3 680	6 110	5 850	5 630	5 450	5 290
Taux de subvention (calcul d'après grille Fonds Chaleur)	%	19,6	19,2	20,1	21,2	22,4	23,6	16,3	16,2	16,1	16,0	15,8
Coût d'exploitation / maintenance	€/kWé	515	385	330	305	285	270	360	350	340	330	320
Prix d'achat du combustible bois	€/MWhPCI	20 et 25						20 et 25				
Prix de vente de la chaleur	€/MWhth	35,6	35,0	34,4	33,9	33,3	32,7	32,7	32,1	31,5	31,0	30,4

Résultats

€/MWhé	Prix du combustible (€/MWhPCI)	Puissance électrique (MWé)										
		Cycle organique de Rankine						Turbine à vapeur à contrepression				
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Hors subvention chaleur	20	287	208	176	158	147	140	205	200	197	195	193
	25	322	242	211	193	182	175	246	241	236	233	230
Avec subvention chaleur	20	252	184	155	140	130	123	185	181	179	177	176
	25	287	219	190	174	164	157	226	222	218	216	214

## Réseau de chaleur

Réseau de chaleur - Superbase saison de chauffe - 5 000 h/an

### Hypothèses

Puissance électrique	MWé	Cycle organique de Rankine									
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Puissance thermique disponible	MWth	2,0	3,9	5,9	7,8	9,8	11,7	13,7	15,6	17,6	19,5
Rendement électrique (par rapport à entrée chaudière)	%	17,0									
Valorisation de l'énergie thermique produite	%	95									
Taux de valorisation énergétique (par rapport à sortie chaudière)	%	91									
Efficacité énergétique (par rapport à entrée chaudière)	%	77									
Durée de fonctionnement à équivalent pleine puissance	h/an	5 000									
Coût d'investissement	€/kWé	9 110	6 420	5 230	4 520	4 040	3 680	3 410	3 190	3 000	2 850
Taux de subvention (calcul d'après grille Fonds Chaleur)	%	20,4	19,1	18,7	18,9	19,3	19,8	20,3	20,9	21,5	22,0
Coût d'exploitation / maintenance	€/kWé	385	285	245	225	210	200	195	190	185	180
Prix d'achat du combustible bois	€/MWhPCI	20 et 25									
Prix de vente de la chaleur	€/MWhth	35,6	35,0	34,4	33,9	33,3	32,7	32,1	31,5	31,0	30,4

### Résultats

€/MWhé	Prix du combustible (€/MWhPCI)	Puissance électrique (MWé)									
		Cycle organique de Rankine									
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Hors subvention chaleur	20	405	285	236	209	191	179	170	164	158	155
	25	440	320	271	243	225	213	205	199	193	190
Avec subvention chaleur	20	347	247	205	182	166	155	149	143	139	136
	25	381	281	240	217	201	191	183	178	173	170

Réseau de chaleur - Superbase année - 8 000 h/an

### Hypothèses

Puissance électrique	MWé	Cycle organique de Rankine									
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Puissance thermique disponible	MWth	2,0	3,9	5,9	7,8	9,8	11,7	13,7	15,6	17,6	19,5
Rendement électrique (par rapport à entrée chaudière)	%	17,0									
Valorisation de l'énergie thermique produite	%	85									
Taux de valorisation énergétique (par rapport à sortie chaudière)	%	83									
Efficacité énergétique (par rapport à entrée chaudière)	%	71									
Durée de fonctionnement à équivalent pleine puissance	h/an	8 000									
Coût d'investissement	€/kWé	9 110	6 420	5 230	4 520	4 040	3 680	3 410	3 190	3 000	2 850
Taux de subvention (calcul d'après grille Fonds Chaleur)	%	24,0	22,3	22,6	23,4	24,4	25,4	26,3	27,3	28,4	29,3
Coût d'exploitation / maintenance	€/kWé	515	385	330	305	285	270	260	250	245	240
Prix d'achat du combustible bois	€/MWhPCI	20 et 25									
Prix de vente de la chaleur	€/MWhth	35,6	35,0	34,4	33,9	33,3	32,7	32,1	31,5	31,0	30,4

### Résultats

€/MWhé	Prix du combustible (€/MWhPCI)	Puissance électrique (MWé)									
		Cycle organique de Rankine									
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Hors subvention chaleur	20	287	208	176	158	147	140	135	132	129	127
	25	322	242	211	193	182	175	170	166	163	161
Avec subvention chaleur	20	244	180	152	138	128	122	117	114	112	111
	25	279	215	188	172	163	156	152	149	147	145