



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

**INSTITUT DES SCIENCES
DE L'ENVIRONNEMENT**

Audit'bois : Analyse énergétique, environnementale et économique du chauffage à distance au bois à Genève :

Retour d'expérience sur l'installation de Cartigny

Synthèse du rapport final

Anthony Haroutunian, Floriane Mermoud, Jérôme Faessler, Bernard Lachal



Carouge, octobre 2013

Contact : floriane.mermoud@unige.ch

Contexte général

Le bois énergie est une ressource renouvelable importante : en Suisse il représente plus de 20% de la consommation d'énergie finale d'origine renouvelable et 4% de la consommation totale d'énergie finale. La combustion du bois prédispose à une centralisation de la production, notamment en raison de l'importance des investissements à réaliser (chaudières, filtres) et des contraintes d'exploitation (gestion de la qualité du combustible et des cendres, optimisation du fonctionnement des chaudières). **Si les aspects techniques sont relativement maîtrisés à l'heure actuelle, la problématique principale du chauffage à distance au bois en Suisse est de contenir le coût du kWh produit.** Les principaux points durs sont : un dimensionnement correct des chaudières, qui en plus de limiter les investissements, permet de privilégier un fonctionnement à puissance nominale ; les performances énergétiques et environnementales des chaudières, bien connues à la puissance nominale mais se dégradant à charge partielle ; une densité suffisante du réseau de chaleur, pour limiter le poids des investissements dans le coût de l'énergie vendue.

Un retour d'expérience complet a été mené sur l'installation de chauffage à distance au bois de Cartigny (CABC), mise en service en 2008. Il s'agit d'un chauffage à distance villageois créé à l'occasion de l'installation des **deux chaudières bois de 2 MW et 650 kW. Le réseau mesure 6 km pour environ 120 raccords** (essentiellement des villas). La pré-étude prévoyait de vendre 5 GWh/an à un prix de 14 ct/kWh.

Le projet Audit'bois avait pour objectif de tirer des enseignements et des bonnes pratiques de l'installation de Cartigny, notamment sur :

- l'influence du fonctionnement des chaudières bois à charge partielle sur le rendement et les émissions
- le dimensionnement de l'installation par rapport aux besoins réels
- la densité réseau
- le coût de la chaleur vendue (en comparaison avec d'autres installations)

Méthodologie de mesure

L'installation a été complètement instrumentée (~25 capteurs) sur toute l'année 2011. Certaines mesures n'étaient pas réalisables en continu (rendement, émissions) et ont été menées sous forme de campagnes permettant de couvrir toute la gamme de puissance des deux chaudières.

Un des points centraux de ce travail est la mesure du rendement instantané des chaudières bois. Habituellement, on utilise la méthode de Siegert, qui permet d'estimer le rendement de manière indirecte en quantifiant les différentes sources de pertes :

$$\eta_{\text{Siegert}} = 1 - \sum Q_i = 1 - Q_{\text{sensibles}} - Q_{\text{rayonnement}} - Q_{\text{chimiques}} - Q_{\text{imbrûlés}}$$

Cependant, cette méthode n'est pas applicable en période de stand-by et n'avait jamais été vérifiée par une mesure directe du rendement. En effet, une mesure directe du rendement instantané de la chaudière, i.e. en mesurant l'énergie entrante et l'énergie sortante de la chaudière :

$$\eta_{direct_ \Delta t} = \frac{\sum E_{out_ \Delta t}}{\sum E_{in_ \Delta t}}$$

est difficile à réaliser car la mesure instantanée du débit de bois et de son humidité est délicate. Ce travail a été l'occasion de tester un dispositif de mesure du débit de bois en continu. Les deux méthodes de mesure du rendement ont donc pu être appliquées en parallèle sur l'installation de Cartigny sur toute la gamme de puissance des chaudières et leurs résultats comparés.

Parallèlement aux mesures de rendement, **des mesures d'émissions polluantes (CO et NOx) ont été menées également sur toute la gamme de puissance des chaudières** afin de comparer les émissions réelles aux normes applicables. Les mesures de notre appareillage portable ont été comparées avec celles prises simultanément par les instruments du Service de protection de l'air, présent lors d'une de nos campagnes : les valeurs sont cohérentes.

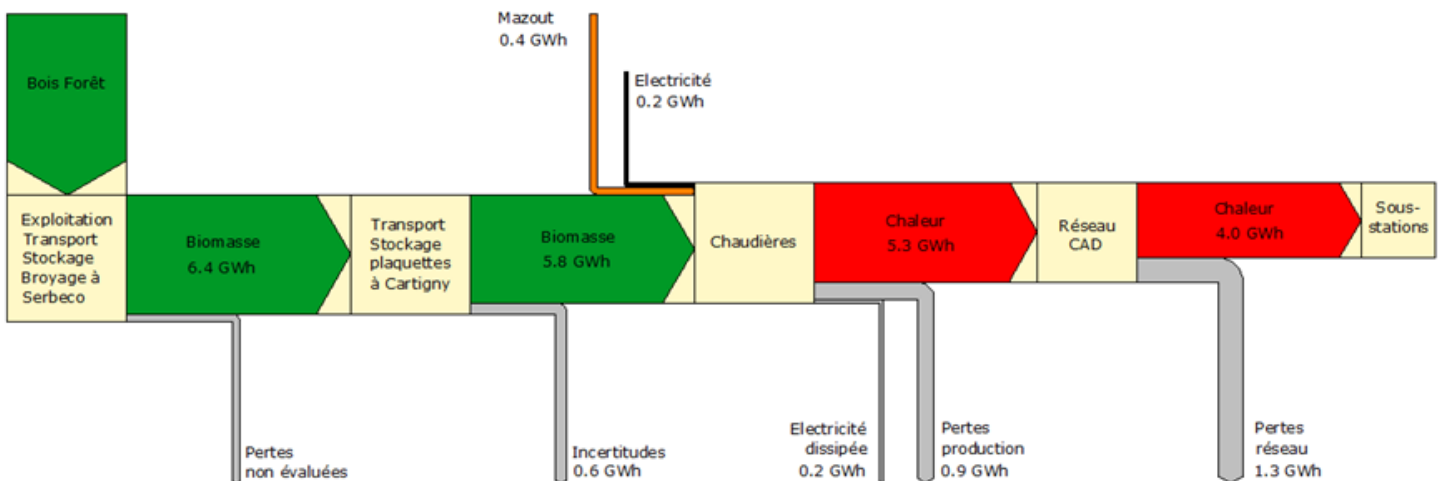
L'ensemble des mesures a permis de réaliser l'analyse énergétique et environnementale complète du site.

Analyse énergétique et environnementale

Bilan énergétique sur l'année 2011

Flux énergétiques

Les différents flux d'énergie en jeu sur l'installation de Cartigny pour l'année 2011 sont présentés dans le diagramme ci-dessous :



A noter que l'année 2011 a été particulièrement douce, et que la consommation des preneurs se situe autour de 4 GWh plutôt que 5 pour une année normale.

Les différentes pertes (production et distribution) ont été répertoriées dans le tableau ci-dessous pour l'année 2011. Les estimations pour une année normale ont également été reportées en italique.

	énergie primaire		pertes production		pertes distribution		consom. utile	
2011	6.2 GWh	85%	0.9 GWh	14.5%	1.3 GWh	21%	4 GWh	64.5%
hiver	5.25	conso	0.8	15%	0.9	17%	3.55	68%
été	0.95	hiver	0.1	10%	0.4	43%	0.45	47%
<i>année normale</i>	<i>7.4 GWh</i>		<i>1.1 GWh</i>	<i>15%</i>	<i>1.3 GWh</i>	<i>17.5%</i>	<i>5 GWh</i>	<i>67.5%</i>

Le rendement global de l'installation est de 64% sur 2011 (il a été estimé à plus de 67% pour une année normale). Le rendement de production moyen s'élève à 85%. **Les pertes réseau rapportées à l'énergie distribuées sont élevées (25%) du fait de la faible densité du réseau**, mais seraient légèrement inférieures dans le cas d'une année normale (20-21%).

▪ Dimensionnement

Le choix de réaliser une installation 100% bois (sans énergie d'appoint) implique que les chaudières bois sont **surdimensionnées** pour disposer d'une sécurité de puissance. Ainsi, la puissance disponible est de 2.65 MW tandis que la puissance maximale appelée dans l'année est inférieure à 2 MW. Cela aboutit à seulement 2'000 heures de fonctionnement équivalent à puissance maximale en 2011 (~2400 h pour une année normale), et des périodes prolongées de fonctionnement en stand-by surtout pour la petite chaudière, préjudiciables pour sa durabilité.

	chaudière bois 2 MW	chaudière bois 650 kW	global bois
nb heures équiv. P_{max}	1'400 h	2'400 h	2'000 h
% énergie fournie	59%	34%	93%
% temps stand-by/30%	17%	72%	

Caractérisation du fonctionnement des chaudières

▪ Niveaux température

Les deux chaudières fonctionnent à des températures similaires, $T_{\text{production}} > 80^{\circ}\text{C}$, et $T_{\text{retour}} > 70^{\circ}\text{C}$ avec une différence de température de l'ordre de 10K. Le réseau fonctionne avec une température de départ $> 75^{\circ}\text{C}$ (même en été) et une température de retour de l'ordre de 60-70°C (différence de température entre 10 et 15K).

▪ Excès d'air

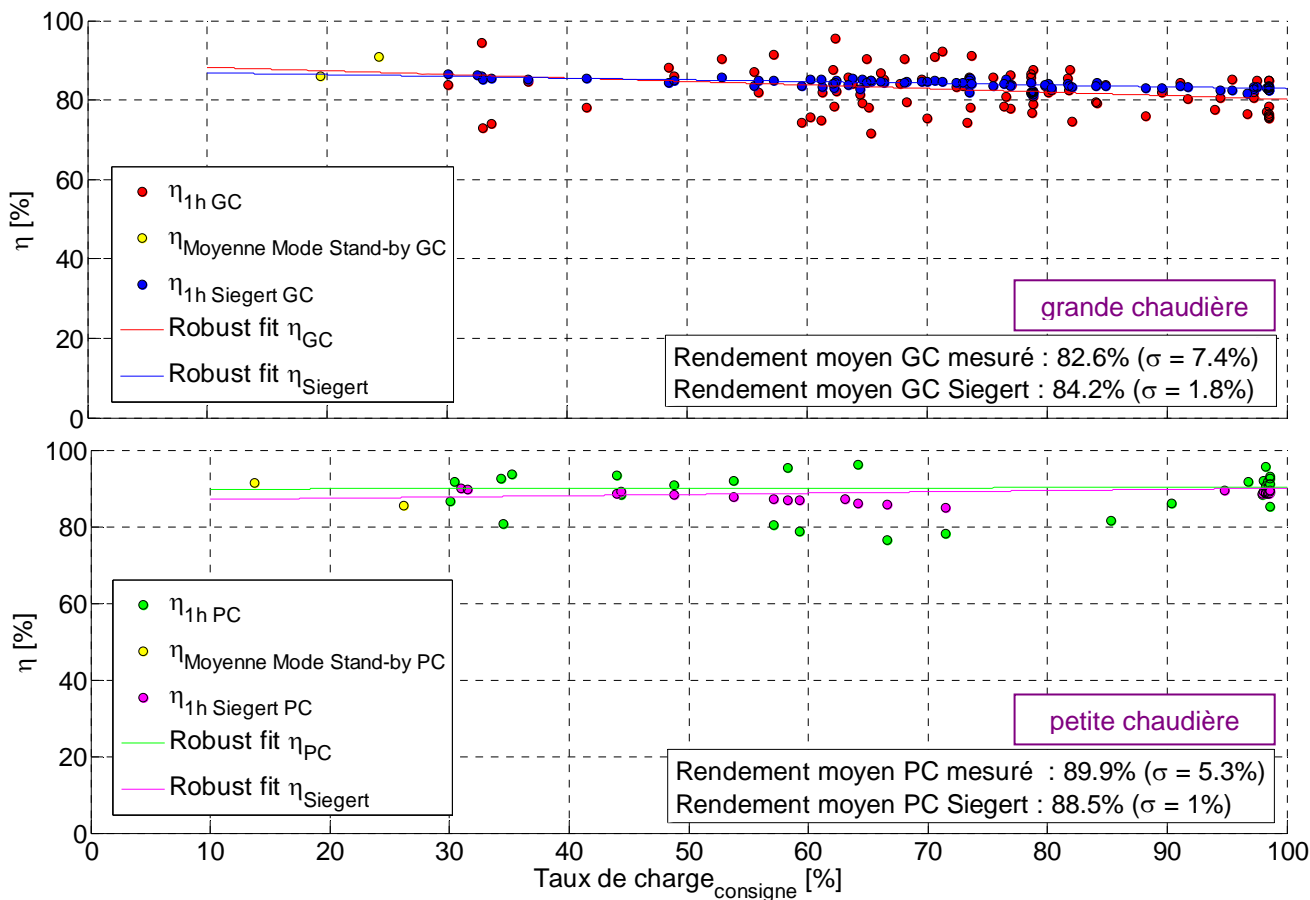
L'excès d'air sur les chaudières à Cartigny est généralement compris entre 1.5 et 2 dès lors qu'on dépasse un taux de charge de 50%, ce qui est plutôt élevé (on préconise en général autour de 1.5). Il augmente encore lorsque le taux de charge diminue en dessous de 50%.

▪ Humidité du bois

L'humidité du bois utilisé à Cartigny est majoritairement comprise entre 30 et 35% (plus faible en été, autour de 30% grâce au temps de stockage plus important qu'en hiver).

▪ **Rendement**

Le rendement des deux chaudières a été mesuré sur toute la gamme de puissance (moyennes horaires) suivant les deux méthodes directe et indirecte (Siegert) :

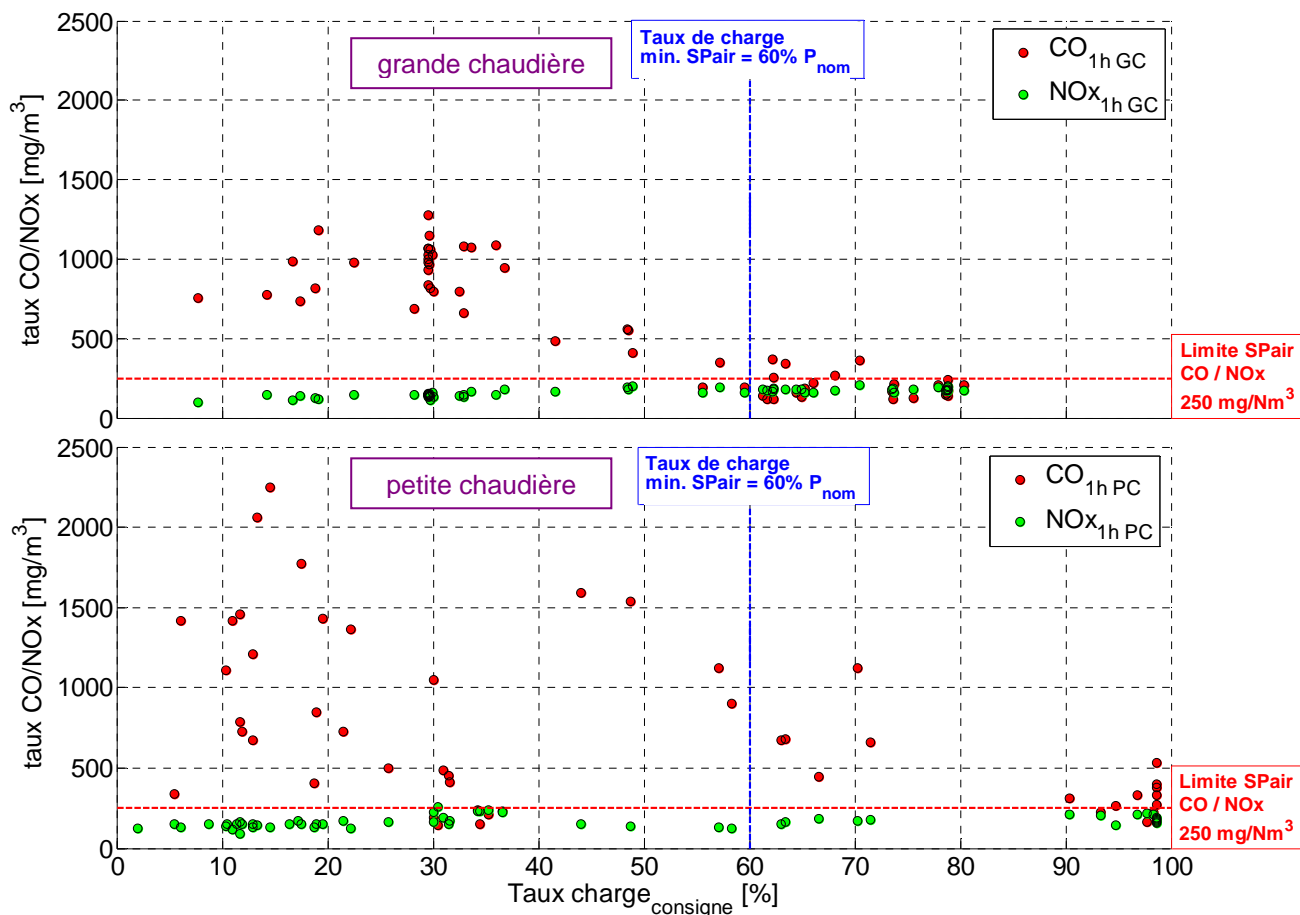


On peut relever les résultats suivants :

- Pour les deux chaudières et selon les deux méthodes, le rendement est quasi invariant en fonction de la puissance fournie (i.e. du taux de charge), ce qui est contraire à ce qu'on s'attendait à observer a priori.
- Le rendement mesuré durant les phases stand-by/30% n'est pas différent du rendement mesuré lors du fonctionnement à puissance plus élevée alors qu'on s'attendrait à observer une dégradation importante de sa valeur.
- **Le rendement moyen sur toute la gamme de mesure s'élève à 83% pour la grande chaudière (84% selon la méthode de Siegert) et 90% pour la petite chaudière (88.5% selon la méthode de Siegert).** Les résultats obtenus par les deux méthodes sont cohérents (+/-1.5 point). Les niveaux de rendement observés sont plutôt bons, conformes aux valeurs annoncées par les constructeurs en général.

▪ **Emissions atmosphériques**

Les émissions de CO et NOx ont été mesurées pour les deux chaudières sur toute la gamme de puissance (moyennes horaires) :



On peut faire les observations suivantes :

- Pour les deux chaudières, **les taux de NOx** mesurés dans les fumées varient peu avec le taux de charge et **sont toujours inférieurs à la norme OPair** de 250 mg/Nm³ (applicable au-delà d'un taux de charge de 60%).
- **Les taux de CO varient fortement** : de manière classique, ils augmentent lorsque le taux de charge diminue. Si la grande chaudière respecte globalement la norme OPair de 250 mg/Nm³ (en dessus de 60% de taux de charge), les émissions de la petite chaudière sont moins bonnes, mais elles pourraient être améliorées par une meilleure gestion des paramètres de combustion (excès d'air notamment).

Densité réseau

La **densité du réseau** est de 0.9 MWh/m tracé/an. Cette valeur est **faible comparée à d'autres réseaux similaires** : le thermo-réseau de Porrentruy (alimenté à plus de 95% par du bois) présente une densité réseau de 1.9 MWh/m tracé/an ; les réseaux de chaleur bois français de puissance comparable ont une densité de l'ordre de 3 MWh/m tracé/an. Les grands réseaux genevois ont une densité bien plus élevée (6 pour CADIOM et 8.8 pour CAD Lignon), la moyenne suisse étant à 4.1. Le projet de raccordement de La Petite Grave, située à 1 km de la chaufferie, ferait encore baisser la densité réseau à 0.8 MWh/m tracé/an. A noter que **les bonnes pratiques préconisent une densité minimale de 1.3 à 1.5 MWh/m tracé/an** (respectivement Quality Management « Chauffages au bois » et fonds chaleur renouvelable de l'ADEME).

Analyse économique

En complément de l'analyse énergétique, **une analyse économique de l'installation de Cartigny a été réalisée.** L'Université de Genève a eu accès à l'ensemble des données économiques du projet : investissements, bilan comptable de la société CABC (chargée de la gestion des installations) de 2008 à 2011, factures aux clients de CABC.

Investissements

Les investissements se sont élevés à 10 MCHF, dont plus de la moitié pour la construction du réseau et des sous stations, un quart pour le bâtiment et environ 15% pour les installations techniques (chaudières). Le Scane a versé en 2008 une subvention à hauteur de 150'000 CHF.

Charges et Subvention du Centime Climatique

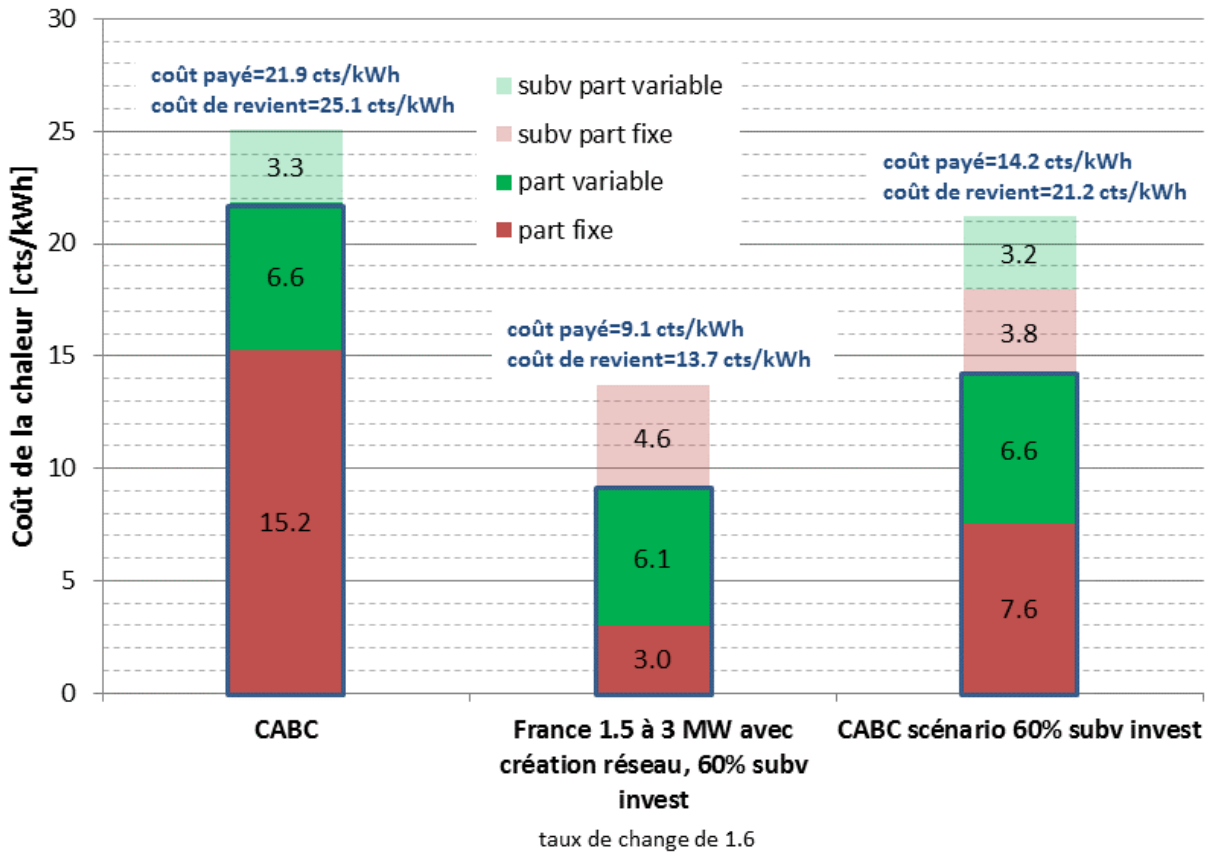
Les coûts annuels se décomposent de la manière suivante : 40% pour l'achat de combustibles, 40% pour l'amortissement de l'investissement et 20% pour l'exploitation, l'entretien et les autres charges, soient environ 60% de charges fixes quelle que soit la consommation de chaleur sur le réseau. La Fondation du Centime Climatique octroie une subvention d'environ 3 ct/kWh utile durant 5 ans (reconductible).

Coût de l'énergie

Le coût de revient du kWh est très variable d'une année à l'autre selon la consommation de chaleur : de 21 à 28 ct/kWh, soit 18 à 25 ct/kWh à charge de l'utilisateur final après subvention par le Centime Climatique. En effet, la « part fixe » dans le coût du kWh augmente beaucoup les années où il y a peu de consommation (2011) car il faut dans tous les cas rembourser les investissements. On peut considérer que le coût du kWh subventionné à Cartigny va se stabiliser à terme autour des 22 ct/kWh.

Comparaison avec d'autres installations

Si on compare le coût (subventionné) du kWh bois avec le coût de la chaleur mazout (en considérant des coûts fixes de 2 ct/kWh et un rendement annuel de 60 à 80%), **la zone d'équilibre de coût se situe entre 1.1 et 1.5 CHF/litre de mazout.** Le prix du mazout s'est élevé en 2012 à 1.03 CHF/litre, ce qui est **proche de l'équilibre avec CABC.** En comparaison avec les réseaux de chaleur français au bois de même taille, le prix payé par les usagers français est deux fois plus faible que celui payé par les usagers de Cartigny (9 ct/kWh contre 22 ct/kWh), majoritairement grâce à la subvention de 60% à l'investissement octroyée par le fonds chaleur renouvelable de l'ADEME. Deux autres facteurs qui entrent en compte également sont la densité réseau (moyenne de 3 MWh/m tracé/an sur les réseaux français contre 0.9 à Cartigny) et le dimensionnement des chaudières bois (~60% de la puissance souscrite pour les réseaux français contre plus de 100% dans le cas de Cartigny). Au final, la répartition entre part fixe et part variable sur les réseaux français est de 1/3-2/3, soit l'inverse de Cartigny. Un subventionnement de Cartigny à hauteur de 60% au moment de l'investissement aurait conduit à un prix payé par l'utilisateur de l'ordre de 14 ct/kWh (contre 22 aujourd'hui), et un coût de revient de 21 ct/kWh (contre 25 aujourd'hui) grâce à l'amortissement immédiat d'une grande partie de l'investissement. La répartition entre part fixe et part variable aurait été ramenée à moitié-moitié.



Mode de facturation

Le mode de facturation adopté par CABC est un peu différent du mode de facturation habituel : d'ordinaire, la facture pour l'utilisateur se décompose en une part fixe (ou abonnement) liée à une puissance souscrite (CHF/kW/an) et permettant de couvrir les frais fixes (R2), et une part variable liée à la consommation réelle de l'année concernée (ct/kWh consommés) et permettant de couvrir les achats de combustibles (R1). Dans le cas de CABC, la facture est également en deux parties : une partie redevance (ct/kWh souscrits) fixée pour couvrir l'amortissement des installations en fonction d'une « consommation annuelle souscrite » déterminée à partir de la consommation réelle des années 2009 et 2010, et une partie consommation (ct/kWh consommés) permettant de couvrir les frais d'exploitation et d'entretien et les achats de combustibles. **A notre sens, ce mode de facturation est confus** puisqu'on est tenté d'ajouter la part « redevance » et la part « consommation » pour obtenir le prix du kWh final, or cela n'a pas de sens physique puisque les deux composantes ne se rapportent pas aux mêmes kWh et cela conduit d'ailleurs à sous estimer le prix du kWh par rapport à ce que l'utilisateur paie réellement. **Nous recommandons de revenir à un mode de facturation plus traditionnel.**

Recommandations générales pour les futurs projets CAD bois

Le Quality Management « Chauffages au bois » propose depuis plus de 10 ans un accompagnement au montage des projets de chauffage à distance au bois. A notre sens, **le recours au QM bois dès la conception devrait être généralisé pour garantir une réalité technique et économique à l'installation**. On peut relever les préconisations suivantes :

- **Viser une densité réseau >1.5 MWh/m tracé/an** (CABC : 0.9 MWh/m tracé/an) pour limiter les pertes réseau (CABC : ~20%) et les investissements liés à la construction du réseau (CABC : >50% du montant total), qui seront difficiles à amortir étant données les faibles consommations de chaleur.
- **Dimensionner la chaudière bois à 50-60% de la puissance maximale appelée sur le réseau et compléter par une chaudière d'appoint/secours au mazout ou au gaz**. Cela permet de limiter les investissements (chaudière bois 10 fois plus onéreuse qu'une chaudière conventionnelle à puissance égale) et de compenser le surdimensionnement potentiel à cause de l'incertitude sur la puissance maximale consommée par les preneurs.

Néanmoins, des projets ne répondant pas à ces recommandations peuvent être envisagés, en étudiant précisément l'équilibre technique et économique de l'installation. Il serait intéressant de s'inspirer des modèles scandinaves, qui exploitent des réseaux de densité comparable à celle de CABC de manière économique.

Conditions cadres pour le développement du chauffage à distance au bois en Suisse

Le développement du chauffage à distance à bois est considéré comme un axe prioritaire des politiques de développement des énergies renouvelables en Europe. La place du chauffage à distance à bois dans la Stratégie énergétique 2050 de la Suisse ne semble par contre pas très claire : si la contribution absolue devrait augmenter dans un 1^{er} temps (jusqu'à 2020), elle devrait ensuite redescendre avec la réduction planifiée de la consommation d'énergie finale en 2050. Or le développement d'une filière telle que le chauffage à distance à bois s'entend sur le long terme, que ce soit pour la mise en place des filières d'exploitation du bois ou des infrastructures lourdes que sont les réseaux de chaleur.

De cette ambiguïté découle une **insécurité dans les dispositifs de subventionnement des réseaux de chaleur à bois**. Tandis que d'autres pays comme la France ont mis en place des fonds de subventionnement massif tels que le fonds chaleur renouvelable (finance jusqu'à 60% des coûts d'investissement), en Suisse c'est en majorité le consommateur final qui finance le surcoût d'investissement, avec des taux de subventions très aléatoires d'un projet à l'autre. Ainsi, entre 2009 et 2011, les subventions allouées aux CAD bois s'élevaient à moins d'1 CHF/hbt/an en Suisse contre 3 fois plus en France sur la même période. Or un développement massif des réseaux de chaleur est à notre sens incontournable pour parvenir à augmenter significativement la pénétration des énergies renouvelables dans notre mix énergétique. Aussi, **nous préconisons la création d'un fonds de subventions alimenté** (par une taxe affectée par exemple) **pour le développement des réseaux thermiques efficaces** (pas seulement alimentés au bois).

Conclusion

Le projet de chaufferie collective au bois à Cartigny est un projet novateur dans le sens où il s'est monté essentiellement grâce à la conviction de quelques acteurs. La possibilité de mener un suivi complet en toute transparence a permis de tirer de multiples enseignements pour les projets à venir.

Le suivi a montré que l'installation de chauffage au bois de Cartigny fonctionne correctement avec un bon niveau de rendement et des émissions globalement maîtrisées. Les problèmes principaux résident dans le surdimensionnement des chaudières bois, qui entraîne un fonctionnement au minimum de charge durant de longues périodes (surtout pour la petite chaudière l'été) et dans la faible densité du réseau, qui aboutit à des pertes réseau importantes (>20%).

Le coût du kWh résultant est supérieur au prix annoncé lors du montage du projet (14 ct/kWh contre 22 en réalité). Il est pénalisé par le faible taux de subventions, la faible densité du réseau et le surdimensionnement des chaudières. Malgré tout, il n'est pas si éloigné de l'équilibre avec le coût de la chaleur mazout, qui sera probablement atteint dans les prochaines années. En outre, les usagers profitent de plusieurs avantages qui ne sont pas à négliger : ils bénéficient d'une prestation finale (chaleur utile), sans avoir à se soucier de commander du mazout, de l'entretien ou des pannes voire du remplacement de leur chaudière. Enfin les prix à Cartigny seront stables dans le temps, contrairement aux prix du mazout.

Certaines améliorations pourraient être entreprises dans la gestion économique de l'installation (en plus de quelques optimisations techniques minimales). Le mode de facturation de la chaleur devrait être revu pour revenir à un mode de facturation plus traditionnel composé d'une prime de puissance (CHF/kW/an) et d'une part variable en fonction de la consommation (ct/kWh consommé), qui a l'avantage d'être complètement transparent pour l'utilisateur sur la nature des coûts. D'autre part, maintenant que les coûts annuels se sont stabilisés, nous préconisons la mise en place d'un « fonds de roulement » via le prélèvement d'1 centime sur chaque kWh vendu par exemple, qui permettrait de gérer les imprévus d'exploitation et ainsi de lisser le prix de la chaleur d'une année à l'autre (sans effet sur le coût global pour l'utilisateur).

Enfin, nous insistons sur la nécessité de créer un fonds alimenté dont la vocation serait de subventionner significativement la construction des réseaux de chaleur efficaces, afin que le poids du surinvestissement ne repose pas uniquement sur l'utilisateur final. La mise en place d'un tel dispositif est à notre sens indispensable si on veut développer massivement les réseaux pour permettre une pénétration importante des énergies renouvelables dans notre système énergétique.