ADEME

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE,
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE LA MER

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

EVALUATION DES COUTS D'EXPLOITATION ASSOCIES AUX CHAUFFERIES BIOMASSE

Rapport final

12 novembre 2010

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME

par PERDURANCE
Rédacteur : Jean-Michel SERVANT
(Marché n°0901C0138)

Coordination technique :
Sylvain BORDEBEURE, Département Bioressources – Direction des Energies Renouvelables des Réseaux et des Marchés Energétiques – ADEME (Angers)

Remerciements

M. Michel AZIERE, ADEME Bourgogne

M. Pierre-Louis CAZAUX, ADEME Centre

Mlle. Sophie GOUTALAND, ADEME Franche Comté

Mme Lise LAMBERT, ADEME Pays de la Loire

Ainsi que :

M. Serge DEFAYE, Débat

M. Mathieu FLEURY, Biomasse Normandie

M. Guillaume LEFRANCOIS, Biomasse Normandie

M. Lionel TRICOT, Rhône Alpes Energie Environnement

M. Xavier KLEITZ, élève ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers « ARTS ET METIERS PARIS TECH »

Les membres de la commission « montage de projets » du CIBE (Comité Interprofessionnel du Bois Energie) présidée par MM. Daniel CAPPE (ATEE) et Eddie CHINAL (Inddigo)

L'ADEME en bref : L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le Climat, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

www.ademe.fr

Avertissement
Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

SOMMAIRE

SYNTHESE/RESUME **4**

RESULTATS DE L'ETUDE **7**

1. OBJECTIFS ET MODALITES DE L'ETUDE **7**

1.1. Contexte et objectifs de l'etude *7*

1.2. Démarche suivie *8*

1.3. Limites *9*

2. DECOMPOSITION DU COUT DE LA CHALEUR **10**

2.1. Coût global de la chaleur *10*

2.2. Les termes de la facture energétique *11*

3. COUTS D'EXPLOITATION MOYENS PAR TYPE D'INSTALLATION **12**

3.1. Réseaux de chaleur *12*

3.1.1. Coût global de la chaleur 12
3.1.2. Electricité et consommations auxiliaires 13
3.1.3. Conduite et entretien courant 14
3.1.4. Gros entretien et renouvellement 14
3.1.5. Synthèse et agrégation des coûts d'exploitation 15

3.2. Chaufferies dédiées *16*

3.2.1. Coût global de la chaleur 16
3.2.2. Electricité et consommations auxiliaires 17
3.2.3. Conduite et entretien courant 18
3.2.4. Gros entretien et renouvellement 18
3.2.5. Synthèse et agrégation des coûts d'exploitation 19

4. DECOMPOSITION DES COUTS D'EXPLOITATION **20**

4.1. Nature des coûts d'exploitation *20*

4.2. Dimensionnement *22*

4.2.1. Electricité et consommations auxiliaires 22
4.2.2. Opérations de conduite et d'entretien 22
4.2.3. Gros entretien et renouvellement 23

4.3. Analyse par ratios moyens *24*

4.3.1. Consommation électrique 24
4.3.2. Charges de personnel 25
4.3.3. Frais externes de conduite et entretien 26
4.3.4. Gros entretien et renouvellement 27

4.4. Nature et consequences des écarts en fonctionnement *27*

4.4.1. Performance de l'exploitation 27
4.4.2. Points clés / spécificités des chaufferies bois 28

5. SYNTHESE ET PERSPECTIVES **28**

ANNEXES

SYNTHESE/RESUME

La présente étude a été réalisée pour le compte de l'ADEME. Elle a pour but d'analyser les **coûts d'exploitation** des projets biomasse relevant du « fonds chaleur » dans le secteur du chauffage collectif.

Plus largement, on distingue classiquement trois postes de charges pour les chaufferies biomasse, associées ou non à un réseau :

- l'amortissement des investissements initiaux,
- les coûts d'exploitation,
- l'achat de combustibles : bois en base et fossile (fioul ou gaz) en appoint.

Le cumul de ces trois postes permet d'évaluer le **coût global de la chaleur**, ramené à l'énergie distribuée (au MWh sortie chaudière ou rendu sous-station), qui caractérise la performance économique du projet. Des travaux ont déjà été effectués sur les investissements et sur les prix des combustibles.

En revanche, les coûts d'exploitation restent encore mal connus. Ceux-ci se décomposent en deux grands sous-ensembles :

- l'exploitation et l'entretien courant (habituellement désignés par « P2 »),
- les provisions pour grosses réparations et renouvellement des équipements (« P3 »).

Ces deux charges se subdivisent elles-mêmes en sous-catégories détaillées dans la présente étude.

L'évaluation de ces coûts d'exploitation s'appuie sur l'analyse d'un échantillon de 60 opérations récemment réalisées dans plusieurs régions, en recueillant des informations auprès des professionnels (AMO, BET…), des directions régionales de l'ADEME et à partir d'une quinzaine de projets présentés en Commission Nationale des Aides. Les coûts ont été actualisés pour être ramenés aux mêmes conditions économiques : celles de décembre 2009.

L'étude distingue deux grandes familles de projets :

- les réseaux de chaleur, en délégation de service public ou en régie,
- les chaufferies dédiées à un établissement public.

Pour les **réseaux de chaleur**, les principaux enseignements tirés sont les suivants :

- Le coût global de la chaleur délivrée (concept central pour l'évaluation des projets) se situe entre :
    - 45 et 70 EUR TTC / MWh (57 EUR en moyenne) pour des puissances bois de 1 à 10 MW,
    - 40 et 95 EUR TTC / MWh, soit une plage beaucoup plus large, pour les puissances bois inférieures à 2 MW.
- On n'observe pas d'écart significatif selon les modes de gestion, entre DSP et régies (celles-ci étant toujours réservées à des installations de puissance inférieure à 3 MW).
- Le poste électricité et auxiliaires est corrélé à la quantité d'énergie délivrée, soit en moyenne 2,75 EUR HT / MWh utile.
- Résultat plus inattendu : le poste exploitation proprement dit présente aussi, à partir de 1 MW, une forte corrélation avec l'énergie utile (passant de 11,7 à 10,6 EUR HT / MWh en moyenne, entre 2 et 10 MW de puissance bois) ; seules les petites puissances, mais on s'y attendait, s'écartent de cette fourchette.
- Les provisions pour grosses réparations et renouvellement dépendent quant à elles du niveau des investissements (et donc de la puissance installée), avec des chiffres homogènes allant de 1 à 1,3 % de la valeur d'un montant d'investissement constitué par la somme du poste « production de chaleur » et de 40 % du poste « réseau de chaleur ».

Pour les **chaufferies dédiées** (production de chaleur pour un seul établissement), le coût moyen de la chaleur (62,1 EUR TTC / MWh) n'est pas significativement différent de celui des réseaux de chaleur, ce qui constitue le premier enseignement. Sans doute, la taille de certains réseaux et le foisonnement / optimisation de la demande expliquent-ils ce constat. On n'observe pas non plus de différence très marquée selon les activités, même si les usages à faible intermittence (secteur

sanitaire et social) présentent des coûts unitaires sensiblement inférieurs aux autres. Les mêmes observations que celles faites pour les réseaux peuvent pratiquement être faites en ce qui concerne les postes électricité et exploitation/entretien, fonctions de l'énergie distribuée, et pour le gros entretien et renouvellement, proportionnel à un pourcentage des investissements avec un montant, pour une même classe de puissance, proche de celui des réseaux de chaleur.

L'étude fournit par ailleurs de nombreux ratios par sous-catégorie de charges, mais la variabilité des données est plus grande, dès que l'on désagrège les postes principaux.

L'étude a permis :

- de mieux comprendre l'importance des charges d'exploitation dans le coût global d'une chaufferie bois avec ou sans réseau,
- de fournir des ratios clés pouvant servir de point de comparaison lors de l'évaluation de nouveaux projets,
- de proposer des pistes d'optimisation, comme la mutualisation des pratiques, la gestion qualité, la nécessité d'un suivi / évaluation régulier pendant le fonctionnement.

Pour des installations faisant appel à un combustible solide, elle confirme qu'il est certes important de bien concevoir et construire les installations, ainsi que de bien choisir le combustible bois, mais aussi que l'exploitation appelle une attention toute particulière et dans la durée, puisque ce poste de charges représente typiquement près d'un tiers du coût global de la chaleur.

ABSTRACT

The current study has been achieved on request of the French National Agency for the Environment and Energy Management (ADEME), in order to analyze the **operations and maintenance costs** of solid wood heating projects, in the scope of the "renewable heat fund", for district heating.

Overall, there are three main cost elements usually considered for biomass heating plants, associated or not to a network:

- Depreciation of initial investment,
- Operating costs,
- Fuel purchase: wood for base and fossil fuels (oil or gas) as fallback/secondary source.

The combination of these three items enables to assess the **overall heat cost**, in relation with distributed energy (in MWh, at boiler output or delivered at sub-station / heat converter) which characterizes the economic performance of the project. Work has already been made to study investments and fuel prices.

However, operating costs are still poorly understood, up to now. These costs fall into two major subsets:

- Operation and maintenance (commonly referred to as «P2»),
- Provisions for major repairs and equipment renewal («P3»).

Both these charges are divided themselves into sub-categories as detailed in this study.

The evaluation of these operating costs is based on the analysis of a sample of 60 operations recently carried out in several French regions, collecting information from professionals (project assistants, engineering and consultancy offices), regional directions of ADEME, and from fifteen projects presented to National Grants Commission («CNA»). Costs have been updated to allow comparison under the same economic conditions, those of December 2009.

The study takes into account two different main types of projects:

- District heating networks, internally managed by a public authority or delegated to a private third party («DSP»),
- Heating plants dedicated to a public institution.

For **district heating** projects, the main lessons learned include:

- The overall cost of heat (the central concept for projects assessment) varies between:

    - 45 and 70 EUR all taxes included / MWh (57 EUR on average) for wood boiler output values between 1 and 10 MW,
    - 40 and 95 EUR all taxes included / MWh, i.e. a much wider range, for wood boiler output values below 2 MW.
- No significant differences can be observed, according to management type, between DSP and internally managed projects (this last type being reserved to plants with a capacity of less than 3 MW).
- The « power and auxiliaries » cost element is correlated to the amount of energy delivered, with an average ratio of 2.75 EUR tax excluded / MWh useful.
- More unexpected result: the operation and maintenance cost itself also presents, from 1 MW on, a strong correlation with distributed energy (decreasing from 11.7 to 10.6 euros tax excluded / MWh on average, between 2 and 10 MW) ; only small power units deviate from that range, but one could expect that.
- Provisions for major repairs and equipment renewal depend on the initial investment costs (and therefore the installed capacity), with consistent numbers from 1 to 1.3% of the value of an investment amount made by the sum of "heat" item and 40% of the " heat distribution " post.

As far as **dedicated heating plants** (dedicated to a single public institution) are concerned, the average overall cost of heat (62.1 EUR all taxes included / MWh) is not significantly different from heating networks' one, which is the first lesson. The size of some networks as well as their ability to balance demand in an optimized way probably explain this finding. No clear difference can either be observed depending on buildings destination, although the heat uses with low intermittence (health and social sector) have significantly lower unit costs than others.

The same results as those observed for heating networks can practically be made, regarding electricity and operations & maintenance costs, which depend on distributed energy. Major repairs and equipment renewal costs are also proportional to a percentage of investments, with an amount similar to the heating networks one, for the same power classes.

The study also provides many ratios by sub-category of charges, but the data variability is greater when the main posts are broken down.

The study has enabled:
- to better understand the importance of operating costs in the overall heat cost for a solid wood heating unit, with or without a distribution network,
- to provide key ratios which can be used as a benchmark when evaluating new projects,
- to sketch potential ways of optimization, such as pooling practices, quality management, and the need for steady monitoring and evaluation during runtime.

It finally confirms that it is indeed crucial to properly design and build solid biomass heating units, as well as to choose a suited wood fuel, but also that the operations require a special attention (and over time) since the related cost item typically represents about a third of the overall heat cost.

RESULTATS DE L'ETUDE

1. OBJECTIFS ET MODALITES DE L'ETUDE

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Depuis 2009, L'ADEME gère le « fonds chaleur renouvelable » assurant le financement des installations biomasse collectives et industrielles ayant une production thermique supérieure à 100 tep[1] (ainsi que plus largement les installations de production de chaleur utilisant des sources renouvelables). Ce dispositif prévu par le « Grenelle Environnement » vise à soutenir l'important développement du nombre des projets de ce type, attendu pour atteindre un objectif d'environ 5,5 Mtep supplémentaires à l'horizon 2020.

La présente étude a été réalisée pour le compte de l'ADEME. Elle a pour but **d'analyser les coûts d'exploitation des projets biomasse relevant du « fonds chaleur » dans le secteur du chauffage collectif**, principalement afin de faciliter l'évaluation de ces coûts lors de l'analyse économique des dossiers effectuée dans ce cadre.

Cette analyse économique repose sur l'évaluation de la rentabilité du projet (chaufferie, réseau primaire) effectuée par rapport à une « situation de référence » utilisant des énergies fossiles et correspondant, soit à la situation antérieure au projet dans le cas de bâtiments existants, soit à une simulation de ce que serait une alternative « fossile » dans le cas d'une nouvelle construction. L'analyse comparative se fonde sur le calcul prévisionnel du **coût global de la chaleur**, coût moyen TTC du MWh utile en sortie de l'installation (comprenant la distribution primaire) comme l'illustre le schéma ci-après.

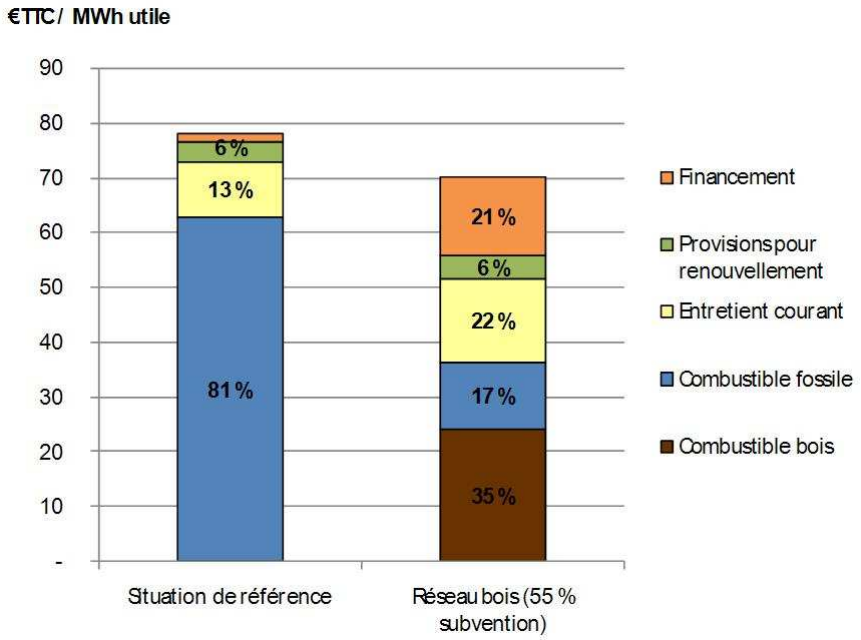


Figure 1 : Comparaison du coût global de la chaleur (EUR TTC / MWh utile) - Illustration
Source : CIBE

A côté des annuités d'investissement (après déduction des aides) et des coûts de combustible (bois et appoint), les coûts d'exploitation (électricité et consommables, conduite du fonctionnement, entretien courant, maintenance et provisions pour renouvellement du matériel) représentent un

[1] tep : tonne équivalent pétrole. Dans le cas du fonds chaleur, il s'agit de la quantité de chaleur d'origine renouvelable, en sortie chaudière, mesurée annuellement (1 tep = 1 162 MWh/an)

pourcentage important dans la composition du coût global de la chaleur ; à ce titre, ils constituent un élément essentiel dans l'analyse économique des projets.

L'ADEME fait périodiquement réaliser des enquêtes sur le prix du combustible[2] biomasse, livré en chaufferies. En plus du retour d'expérience de ses directions régionales, elle dispose également depuis 2009 des résultats d'une étude portant sur les coûts d'investissement[3] des projets bois dans le secteur collectif.

La présente étude doit permettre à l'ADEME de se doter d'un moyen complémentaire lui permettant de faciliter l'évaluation des coûts d'exploitation (couramment appelés P'1, P2 et P3, par généralisation de la terminologie utilisée pour les chaufferies dédiées[4]) des projets. Les objectifs principaux attendus de l'étude sont donc de présenter :

- la décomposition des frais d'exploitation : main d'œuvre, matériel, frais d'électricité des auxiliaires, traitement des fumées, traitement des cendres, …
- les coûts moyens par type d'installation (puissance, secteur, usage…).

1.2. DEMARCHE SUIVIE

Cette étude a été réalisée au moyen d'un échantillon[5] de plus de 60 projets de plus de 100 tep, répartis sur plusieurs régions, pour lesquels les coûts d'exploitation ont été collectés, ainsi que les principales caractéristiques techniques et les autres composantes du coût complet (investissement, combustibles) nécessaires, d'une part, à la vérification de la cohérence des données recueillies, d'autre part, à l'élaboration de ratios pour l'analyse des résultats. La collecte a été réalisée auprès de diverses sources : cabinets d'AMO et bureaux d'études thermiques spécialisés[6], professionnels adhérents du CIBE, et avec l'aide de l'ADEME et de certaines de ses délégations régionales (Bourgogne, Centre, Franche Comté, Pays de la Loire). De plus, une quinzaine de projets récents, présentés en CNA[7] de l'ADEME ont été exploités de façon anonyme, de façon à comparer leurs données aux résultats de l'analyse.

Les résultats sont présentés suivant les 2 classes principales de projets rencontrés : les réseaux de chaleur, exploités en délégation de service public ou en régie, et les chaufferies dédiées, avec ou sans contrat d'exploitation. Certains réseaux communaux (desservant plusieurs bâtiments du patrimoine d'une collectivité) et certains projets de substitution (cas où une chaudière bois vient remplacer une chaudière fossile) sur un réseau de chaleur existant, ont également été analysés.

Les données économiques relatives à l'exploitation, recueillies pour les besoins de l'étude, sont différentes selon le mode de gestion. Pour les réseaux de chaleur, celles-ci sont distinguées entre recettes et charges, alors que pour les chaufferies dédiées et les réseaux communaux, les données sont regroupées sous le terme de dépenses uniquement. Leur collecte a porté à la fois sur les données prévisionnelles (avant la réalisation du projet, contrats d'exploitation…) et sur les données réelles correspondant à une ou plusieurs saisons de chauffe, après mise en service des installations.

Ces données ainsi que les coûts initiaux d'investissement ont été actualisées pour être ramenées aux mêmes conditions économiques, celles de décembre 2009, et permettre des comparaisons. L'actualisation a été réalisée à partir de formules d'indexation[8] détaillées, prenant en compte la nature des postes de coûts, en reprenant ou en s'inspirant des formules utilisées dans les contrats analysés.

[2] Etude sur les prix des combustibles bois (et la production de granulé) en 2008 et 2009 (4ème enquête), après des études similaires en 2003, 2005 et 2006-07 [G]
[3] Evolution des coûts d'investissement relatifs aux installations collectives bois énergie (2000-2006), avril 2009 [E]
[4] Voir glossaire en annexe 7 pour les acronymes et la terminologie propre au domaine
[5] Voir annexe 2 pour plus de détails
[6] Mention particulière pour Biomasse Normandie
[7] Commission Nationale des Aides (de l'ADEME) : intervient pour les projets au-delà d'un certain montant d'aides envisagées
[8] Cf. annexe 3 : Méthode utilisée pour l'actualisation des données

Différents ratios technico-économiques ont été ensuite établis et comparés, puis interprétés avec l'éclairage de professionnels, notamment pour interpréter les principaux écarts observés. Les principes de la méthodologie suivie sont détaillés en annexe.

1.3. LIMITES

Au cours de l'étude, plusieurs limites[9] pratiques sont apparues qui doivent inciter à une **relative prudence quant à l'interprétation des résultats**, notamment dans la perspective de les utiliser comme point de comparaison avec d'autres projets, en fonctionnement ou à venir. Ces limites sont les suivantes :

- La **taille limitée de l'échantillon** : bien que l'échantillon constitué soit significativement plus large que ce qui était escompté, le nombre de total de projets reste encore trop modeste pour limiter l'incertitude liée à l'utilisation de méthodes d'analyse statistique ;

- L'**hétérogénéité « structurelle » des projets** : la principale difficulté de l'analyse tient à ce que l'on rencontre au sein de l'échantillon une **grande variété** de cas, qui traduit la faible répétitivité de la combinaison de choix de conception, de technologies, de types de combustibles, de montage organisationnel (prestations internes/externes) entre projets. Cette variété de cas, combinée à la taille limitée de l'échantillon, représente une limite structurelle pour l'exploitation des données ;

- L'**hétérogénéité de la présentation comptable** selon les natures de coûts : ce problème est lié à l'**absence de vocabulaire standard**. En effet, selon le type de projet, selon le mode de gestion et même le type de contrat/marché (lorsque tout ou partie des opérations sont confiées par la maîtrise d'ouvrage à un exploitant énergéticien), la présentation des coûts du projet diffère. Elle diffère d'autant plus « sur le terrain » que chacun peut avoir tendance, sans doute dans le souci de se raccrocher à des points de repères connus, à utiliser abusivement une terminologie qui en principe n'est pas celle qui devrait être appliquée. On voit ainsi parfois des « recettes » dans des installations de chaufferies dédiées qui pourtant ne gèrent pas de facturation, ou à l'inverse on peut parler de « coûts » pour désigner la tarification des réseaux de chaleur. *Dans le même ordre d'idées, on notera que la grille-formulaire utilisée par l'ADEME pour la présentation des projets en CNA, utilise la terminologie P1-P2-P3 indifféremment pour les chaufferies dédiées et les réseaux de chaleur.* Cette confusion sémantique a ralenti la collecte des données ;

- Les **différences de périmètre** des postes analysés : au-delà des aspects liés à la terminologie, les postes de décomposition des coûts d'exploitation peuvent recouvrir des périmètres différents d'un projet à l'autre. Ainsi, le P3 peut ne pas correspondre au même objectif, en terme d'état de retour de l'installation, selon la nature du contrat. Par ailleurs, on a observé que la répartition des charges de personnels et des achats de pièces de rechanges peut varier en pratique entre les postes P2 et P3, d'un projet à l'autre (sans incidence globalement toutefois) ;

- La **qualité des données** : la collecte puis l'analyse des données a été réalisée à partir de données principalement fournies de manière anonyme par des bureaux d'AMO, des BET, des exploitants et à partir de dossiers gérés par les délégations régionales de l'ADEME. Le contenu de ces dossiers n'a pas été défini pour les besoins de l'étude, ni d'un suivi qualité régulier à un échelon national par exemple, mais résulte des objectifs antérieurs, de gestion ou de suivi, propres à chaque partenaire. On a pu vérifier la plupart des paramètres techniques pour lesquels des recoupements sont en général possibles ; en matière de coûts d'exploitation, tant prévisionnels que pour le suivi en fonctionnement, on n'a pu que vérifier sommairement la cohérence globale des données collectées par rapport aux valeurs d'autres projets. A ce titre, les projets gérés sous forme d'un compte d'exploitation

[9] Limites habituelles aux projets bois énergie en France, cf. étude sur les coûts d'investissement [E]

séparé (cas des DSP notamment) présentent de meilleures garanties de complétude des coûts que les autres projets ;

- Le **manque de données de suivi dans la durée** : à quelques exceptions près, les données recueillies concernent seulement 1 ou 2 exercices (saison de chauffe), le plus souvent les premières années de fonctionnement, qui reflètent souvent l'accumulation de problèmes de mise en route, mais ne sont pas forcément les plus représentatives. Même dans le cas de données issues de suivi en régime « stabilisé », l'irrégularité des couts réels non récurrents justifierait que l'on dispose d'un enregistrement des performances de l'unité sur la totalité de sa durée de fonctionnement, pour être en mesure de faire une comparaison en moyenne, homogène aux données prévisionnelles ;

- La **dispersion des valeurs économiques** : quelque soit le poste de coût étudié, on observe d'importantes variations des valeurs de ratios entre projets. Pour chaque analyse, on a retiré de l'ordre de 20% des projets présentant des valeurs extrêmes. Malgré cela des écarts de +/- 30 à 40% persistent sur certains ratios. Il faut considérer que les coûts d'exploitation ne sont qu'une des composantes du coût global de la chaleur, lequel varie lui-même sensiblement entre projets. Cette **grande variabilité est une constante**[10] que l'on retrouve en général dans les projets de chaufferies bois.

La méthodologie d'analyse tient compte de cet état de fait. Un important travail de pointage et de vérification a été réalisé sur les projets de l'échantillon. Après repérage des projets « atypiques » qui ont alors été écartés, l'étude a permis de rechercher, de façon itérative, et de mettre en évidence certaines tendances présentées dans le présent rapport.

2. DECOMPOSITION DU COUT DE LA CHALEUR

2.1. COUT GLOBAL DE LA CHALEUR

Le « coût global[11] » de la chaleur est le principal outil utilisé pour évaluer la pertinence sur le plan économique d'un projet biomasse. Le coût global reflète en réalité le point de vue moyen des utilisateurs de la chaleur, pour lesquels la facture énergétique représente un coût (en EUR TTC par MWh utile en sortie de l'installation).

L'objectif du fonds chaleur étant de garantir un prix de la chaleur renouvelable inférieur à celui de la chaleur produite à partir d'énergies « conventionnelles », le calcul est réalisé à la fois pour le projet bois en création, et pour la situation « de référence » associée, utilisant des énergies fossiles. Cette comparaison se fonde sur un calcul **prévisionnel** du coût global de la chaleur.

Dans les 2 cas, il est indispensable d'établir ce coût comme un prix de revient de la chaleur **lissé sur une période longue** (la durée du contrat ou la durée de vie de l'installation étudiée) pour prendre en compte plusieurs facteurs, notamment :

- La nécessité de s'affranchir de la forte volatilité du cours des énergies fossiles, pour la situation « de référence », en évitant de se caler sur un cours ponctuel trop faible (voire à l'inverse trop élevé),
- L'intégration de provisions pour renouvellement pour l'installation biomasse, et en regard celle d'investissements dans de nouveaux équipements « conventionnels » si ceux existants dans la situation « de référence » sont anciens.

Le maître d'ouvrage (chaufferie dédiée), ou l'autorité organisatrice du service public (réseau de chaleur) effectue généralement cette comparaison sur un **coût global moyen**. En effet, dans le cas d'un réseau de chaleur, avec vente de la chaleur à plusieurs abonnés, la diversité des profils de consommation de ceux-ci peut conduire, au travers du mode de tarification (partie fixe vs. variable), à des disparités du coût global de la chaleur renouvelable, mais aussi a fortiori du résultat de la comparaison avec leur « situation de référence » particulière. Dans le cas de l'habitat locatif, par le

[10] Cf. étude sur les coûts d'investissement [E] où les écarts étaient même plus importants
[11] Parfois aussi désigné par « coût complet »

jeu des « charges récupérables », le coût de la chaleur pour l'utilisateur final recouvre encore une autre notion qui doit être également analysée lors du montage des projets.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse uniquement au total du coût de la chaleur produite par l'installation, au travers de la somme de tous les postes de la facture énergétique.

2.2. LES TERMES DE LA FACTURE ENERGETIQUE

Quelque soient le type du projet et son mode de gestion, on décompose généralement la facture énergétique en coût global en quatre termes, représentant les charges liées respectivement :

- A la fourniture de **combustible** (bois et fossile en appoint / secours),
- A l'achat d'**électricité** nécessaire au fonctionnement de la chaufferie proprement dite (équipements mécaniques assurant l'alimentation automatique de la chaudière, circulation des fluides en chaufferie, force motrice nécessaire à la distribution de l'eau chaude). D'autres charges sont parfois prises en compte au sein de ce poste (consommation d'eau de réseau, abonnement au gaz naturel…) sous le terme de **consommations auxiliaires**,
- Aux **charges de conduite et d'entretien courant** de l'installation, qui intègrent généralement, non seulement des coûts variables liés à la main d'œuvre en chaufferie et en sous-stations ou au remplacement de pièces d'usure courante, mais également des frais fixes liés aux charges de structure de l'exploitant de chauffage ou aux taxes et redevances diverses,
- Au **gros entretien et renouvellement**, qui correspond à des provisions sur certaines charges prévisibles sur le long terme (réfection du réfractaire de la chaudière par exemple). Il convient de préciser que, dans certains cas (chaufferies dédiées avec contrat d'exploitation notamment), ce poste peut correspondre à une « garantie totale », c'est-à-dire au remplacement de l'équipement à l'identique en fin de contrat,
- A l'**amortissement des investissements** (chaufferie, réseau, sous-stations, équipements thermiques) sur une période généralement évaluée entre 20 et 24 années (moyenne pondérée entre les durées d'amortissement des équipements thermiques : 15 ans et du réseau et du génie civil : 30 ans), y compris la prise en compte des frais financiers associés.

Selon le type de projet, ces différents postes de la facture énergétique sont souvent désignés par les acteurs de la profession par les termes suivants, que l'on conserve dans la suite de ce rapport :

Charges couvertes par les termes de la facture énergétique	Réseau de chaleur (recettes)	Chaufferie dédiée (dépenses)
Fourniture de combustible bois	R1bois	P1bois
Fourniture de combustible fossile	R1fossile (ou appoint)	P1fossile (ou appoint)
Electricité et consommations auxiliaires	**r21**	**P'1**
Conduite et entretien courant	**r22**	**P2**
Gros entretien et renouvellement	**r23**	**P3**
Financement des installations	r24	Financement (P4)

Tableau 2 : les différents postes de la facture énergétique

Parmi ces différents postes de la facture énergétique, les termes r21 (P'1), r22 (P2) et r23 (P3) constituent les « coûts d'exploitation » des projets, qui font l'objet de la présente étude.

Concernant la facturation de la chaleur, si l'on prend par exemple le cas sur les réseaux de chaleur, celle-ci s'effectue suivant une **tarification** binôme, comprenant :

- L'énergie calorifique mesurée au compteur (R1) qui correspond aux charges de combustible bois et d'appoint. Ce terme est dit « variable », la clé de facturation étant l'énergie distribuée
- Un abonnement (R2) établi en fonction de la puissance souscrite ou d'une autre clé de répartition forfaitaire, pour couvrir les charges fixes d'amortissement et d'exploitation. Pour

une installation donnée, du point de vue de l'usager, ce terme est « fixe » au sens où il n'est pas facturé en fonction de l'énergie effectivement distribuée annuellement.

Ce mode de facturation n'est pas spécifique à l'énergie bois et peut laisser penser que les clés de répartition du prix de vente de la chaleur (énergie distribuée, puissance souscrite ou URF) sont aussi des inducteurs directs des postes de coûts avec lesquels ils sont mis en correspondance. En réalité, dans le cas des coûts d'exploitation, un distinguo doit être fait puisque ceux-ci résultent en réalité de la somme de coûts prévisionnels variables liés à l'énergie distribuée, aux heures de fonctionnement, à la puissance de l'installation ou à d'autres paramètres comme le chiffre d'affaires de l'unité. Le choix de la clé de répartition utilisée pour absorber ces coûts, qui plus est lissés sur la durée de vie de l'installation, pourrait être différent : il résulte aujourd'hui de l'application de textes règlementaires et non d'une réalité technique analytique. Il convient donc de bien faire le distinguo entre clé utilisée pour la facturation et paramètre inducteur d'un poste de coûts, comme on le verra par la suite.

Attention : dans tout ce qui suit, le coût global de la chaleur est exprimé en EUR TTC, incluant la TVA, soit ce qui est véritablement facturé d'une façon ou d'une autre aux consommateurs. En revanche, la comparaison des postes de coûts d'exploitation est effectuée en EUR HT.

3. COUTS D'EXPLOITATION MOYENS PAR TYPE D'INSTALLATION

3.1. RESEAUX DE CHALEUR

3.1.1. Coût global de la chaleur

Le coût global de la chaleur (rapporté à l'énergie distribuée, en EUR TTC / MWh utile) a été étudié en fonction de la puissance bois. Le résultat est différent, mais cohérent, selon la gamme de puissance concernée (graphique ci-dessous) :

- A l'exception d'un point isolé[12], les projets analysés d'une puissance bois supérieure à 2 MW présentent un coût global, situé entre 45 et 70 EUR TTC / MWh, indépendant de la puissance bois, autour d'une moyenne à 57 EUR TTC / MWh,
- Les projets de puissance bois inférieure à 2 MW présentent des valeurs plus élevées (entre 40 et 95 EUR TTC / MWh), avec une décroissance linéaire du coût global en fonction de la puissance bois.

Cette analyse permet également de conforter la cohérence et l'homogénéité des projets de l'échantillon, puis de situer la part des coûts d'exploitation dans le coût global. Le graphique ci-dessous montre sa répartition sur l'ensemble des réseaux de chaleur, en distinguant régies et DSP, de l'échantillon analysé et des projets « CNA » analysés en complément.

[12] Repéré par un cercle pointillé (Pbois = 3MW ; coût de l'ordre de 90 EUR TTC/MWh)

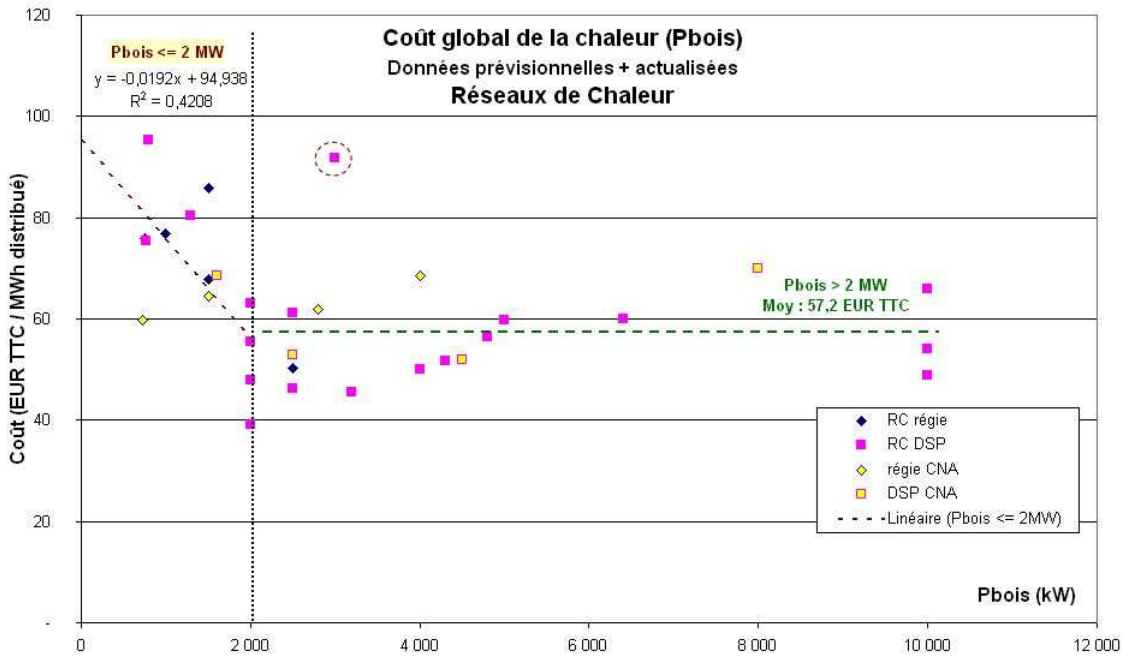


Figure 3 : Coût global de la chaleur (EUR TTC / MWh utile) en fonction de la Puissance bois (kW) pour les Réseaux de Chaleur analysés

L'analyse a été également conduite en fonction de l'énergie distribuée et conforte ce résultat, avec un seuil autour de 7 000 MWh distribués, conforme aux ratios E/Pbois moyens de cette catégorie[13]. On n'observe pas de différence significative selon le mode de gestion, entre régies (les régies de l'échantillon s'arrêtent à 3 MW) et DSP.

NB : le CIBE effectue périodiquement une enquête auprès des maîtres d'ouvrages ou gestionnaires de réseaux de chaleur au bois, au sens juridique. Celle de 2009 a recensé près de 150 unités. Celle-ci montre un prix moyen de la chaleur de 53,7 EUR HT / MWh au delà de 3 MW de puissance bois. Les projets d'une puissance bois située entre 500 kW et 3 MW évoluent, avec (en moyenne) une dégressivité en fonction de la puissance bois, dans une plage comprise entre 30 et 90 EUR HT / MWh utile. Les chiffres de cette enquête, collectés hors taxes, sont globalement cohérents de ceux de la présente étude.

Les chapitres suivants présentent les résultats[14] pour chacun des postes des coûts d'exploitation.

3.1.2. Electricité et consommations auxiliaires

L'analyse montre que les recettes compensant les frais d'électricité sont directement proportionnelles à la **quantité d'énergie** délivrée par le réseau, indépendamment de la puissance bois de l'installation.

80 % des projets de l'échantillon analysé présentent ainsi un ratio compris entre 2 et 4 EUR HT / MWh utile, autour d'une valeur moyenne de **2,75 EUR HT / MWh utile**.

La grande stabilité du ratio relatif au terme r21, observée sur l'échantillon, peut s'expliquer par le lien direct entre les consommations d'électricité, majoritairement liées à la force motrice nécessaire à la distribution de l'eau chaude aux différents clients du réseau, et la quantité d'énergie distribuée.

[13] Cf. annexe
[14] Détail de la modélisation des coûts d'exploitation en annexe 1

3.1.3. Conduite et entretien courant

Concernant le terme r22, deux analyses ont été conduites :

- L'évolution du terme r22 en fonction de la puissance bois,
- L'évolution du terme r22 en fonction de la quantité d'énergie distribuée.

Ces deux analyses présentent une certaine pertinence. On rappelle en effet que les frais de r22 intègrent :

- Des frais de main d'œuvre et de remplacement de pièces d'usure courante, directement liés à la technologie, et donc à la puissance de la chaudière bois,
- Des frais de structure et de siège de l'exploitant de chauffage, généralement définis en proportion du chiffre d'affaires, donc en corrélation avec la quantité d'énergie vendue,
- Des frais fixes d'impôts, taxes et redevances, quasiment équivalents quelle que soit la taille de l'installation, et qui bénéficient de ce fait d'un effet d'échelle relatif, tant sur la puissance de l'installation que sur la quantité d'énergie vendue.

Sur l'échantillon étudié, on note cependant que l'interpolation linéaire réalisée en fonction de la **quantité d'énergie** semble plus satisfaisante, car elle réduit l'amplitude des écarts entre observations et prévisions.

Par ailleurs, le ratio r22 évolue de façon croissante en fonction de la puissance de l'installation lorsqu'il est construit en rapportant le poste à cette puissance, alors qu'il évolue de façon décroissante lorsque le calcul est fait en fonction de la quantité d'énergie vendue (tableau ci-après). Ce dernier point peut s'expliquer par le fait que les projets de forte puissance présentent généralement un ratio Energie distribuée / Puissance bois de l'installation (E/Pbois) plus élevé.

80 % de projets de l'échantillon présentent des recettes d'entretien courant comprises, selon la gamme de puissance, entre :

Pbois référence (MW)	Plage de variation - r22 (EUR HT / MWh utile)	Valeur moyenne - r22 (EUR HT / MWh utile)
1	14 à 21	14,7
2	9 à 16	11,7
4,5	9 à 13	11,1
10	10 à 12	10,6

Tableau 4 : les recettes de conduite et d'entretien courant rapportées à l'énergie vendue, en fonction de la puissance bois, pour les Réseaux de Chaleur analysés

L'évolution du terme r22 présente une économie d'échelle liée à la taille du projet.

3.1.4. Gros entretien et renouvellement

Concernant le terme r23, deux analyses ont été conduites :

- L'évolution du terme r23 en fonction de la puissance bois,
- L'évolution du terme r23 en fonction d'une partie de l'investissement. Dans ce dernier cas, la meilleure corrélation a été obtenue en exprimant le r23 sous forme d'un ratio entre la valeur du poste étudié et un montant d'investissement constitué par la somme du poste d'investissement « production de chaleur » et de 40 % du poste d'investissement « réseau de chaleur » (selon la terminologie de l'ADEME pour les dossiers du fonds chaleur).

C'est la seconde analyse qui présente les résultats les plus pertinents. Ainsi, le tableau ci-dessous permet de traiter dans un **cadre commun** l'ensemble des projets rencontrés, **en prenant l'investissement comme critère**, ce qui ne dispense pas d'analyser au cas par cas la cohérence des coûts d'investissement de chaque dossier.

Le ratio défini pour le terme r23 varie donc entre 1 % et 1,3 % du **montant d'investissement « production de chaleur » + 40 % du « réseau »** tel que défini ci-dessus. Le tableau propose en outre une correspondance indicative avec les gammes de puissance,

Investissement (A) : Production Chaleur + 40% Réseau (M EUR)	**Plage de variation - r23 (ratio vs. Invest. (A)) (%)**	**Valeur moyenne - r23 (ratio vs. Invest. (A)) %**	***Gamme de puissance bois (MW)***
1	0,1 à 2,0 %	1,0 %	*de 0,750 à 2*
2	0,3 à 2,0 %	1,2 %	*de 1,5 à 4*
5	0,6 à 1,9%	1,3 %	*de 2,5 à 5*
7,5	0,9 à 1,7%	1,3 %	*de 8 à 10*

Tableau 5 : les recettes de gros entretien et renouvellement en fonction de l'investissement, pour les Réseaux de Chaleur analysés

On observe de plus que la plage de variation du ratio diminue sensiblement vers les fortes puissances.

3.1.5. Synthèse et agrégation des coûts d'exploitation

L'analyse des coûts d'exploitation sur les réseaux de chaleur de l'échantillon a montré que les meilleures prévisions des postes de recette sont obtenues respectivement :

- Pour le poste « électricité et consommations auxiliaires » (r21) indépendamment de la classe de puissance, directement en fonction de la quantité d'énergie vendue.
- Pour le poste « conduite et entretien courant » (r22), en fonction de la quantité d'énergie vendue selon un ratio dégressif en fonction de puissance bois (économie d'échelle).
- Pour le poste « gros entretien et renouvellement », en fonction de l'investissement initial selon un ratio qui semble augmenter légèrement en moyenne en fonction de la puissance bois, mais dont la plage de variation constatée diminue sensiblement vers les fortes puissances.

Pbois référence (MW)	**r21 (EUR HT / MWh utile)**		**r22 (EUR HT / MWh utile)**		**r23 (% vs. investissement : Production Chaleur + 40 % réseau)**	
	Plage de variation	Valeur moyenne	Plage de variation	Valeur moyenne	Plage de variation	Valeur moyenne
1	2 à 4	**2,75**	14 à 21	**14,7**	*0,1 à 2,0 %*	***1,0 %***
2			9 à 16	**11,7**	*0,3 à 2,0 %*	***1,2 %***
4,5			9 à 13	**11,1**	*0,6 à 1,9%*	***1,3 %***
10			10 à 12	**10,6**	*0,9 à 1,7%*	***1,3 %***

Tableau 6 : Synthèse des recettes liées aux coûts d'exploitation, pour les Réseaux de Chaleur analysés

Le tableau qui précède présente la synthèse des ratios tirés de l'étude réalisée, principalement structurée par des projets gérés en DSP. L'équivalence proposée avec les valeurs « de référence » de puissance bois est indicative dans le cas du r23, dans la mesure où, d'après ce qui précède, ce poste varie plutôt principalement en fonction d'un montant d'investissement initial.

Compte tenu, d'une part, de la diversité des situations contextuelles de montage des projets bois énergie, d'autre part, des limites[15] de l'étude, notamment de la taille modeste de l'échantillon, ces ratios « moyens » constatés peuvent certes être utilisés comme point de comparaison pour de nouveaux projets, mais ne présentent aucun caractère normatif : ils ne dispensent pas d'un examen au cas par cas des dossiers.

De plus, il faut souligner que, dans certains cas recensés, plusieurs « perméabilités» ont pu être observées entre postes de charges (coûts de personnel liés aux grosses réparations intégrés au poste r22 ou au poste r23 selon les projets, par exemple). Aussi, dans le cas où l'analyse d'un projet donné mettrait en évidence un poste de recette n'entrant pas dans les plages de variations indicatives présentées ci-dessus, il conviendrait d'abord de vérifier que l'écart identifié (surcoût ou décote) ne soit pas « compensé » sur un autre poste de recettes.

Concernant les projets en régie de l'échantillon, on a pu observer (par rapport aux ratios présentés plus haut) à la fois une plus grande dispersion des valeurs, et une tendance à ce que ces valeurs soient moins élevées en moyenne, de l'ordre de -25% sur l'ensemble des coûts d'exploitation (les trois postes cumulés). Toutefois, du fait du retour d'expérience plus important, dans un cadre de compétences mieux établi, dont bénéficient généralement les projets gérés en DSP, il semble raisonnable d'utiliser néanmoins le même cadre comme référence « moyenne-haute » de comparaison, de façon à ne pas sous-estimer les coûts d'exploitation réels encourus durant la vie des projets en fonctionnement. En tout état de cause, le biais éventuel qui serait ainsi introduit resterait inférieur à la dispersion des valeurs actuellement observées, plus difficilement explicable.

3.2. CHAUFFERIES DEDIEES

3.2.1. Coût global de la chaleur

Le coût global de la chaleur (rapporté à l'énergie distribuée) a été étudié en fonction de la puissance bois, de la même façon que pour les réseaux de chaleur. Le graphique ci-dessous montre sa répartition sur l'ensemble des chaufferies dédiées étudiées (en distinguant les 3 catégories selon l'usage : sanitaire et social, enseignement et autres bâtiments tertiaires, logement social), auquel ont été ajoutés en complément les cas « CNA » analysés et les réseaux de chaleur communaux.

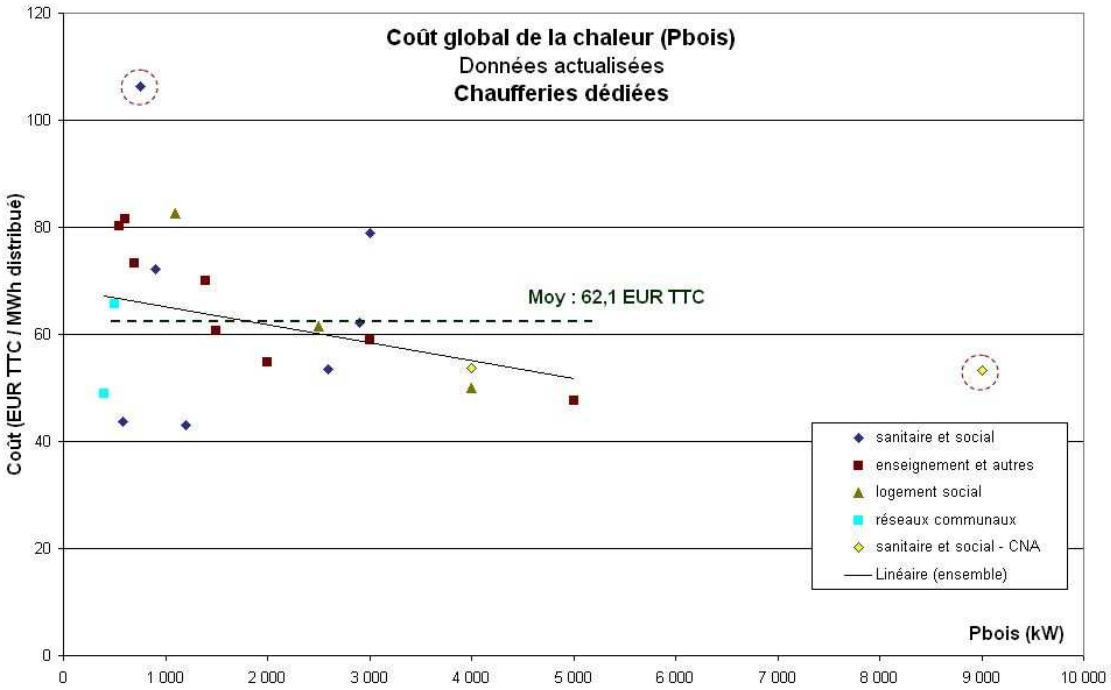


Figure 7 : Coût global de la chaleur (EUR TTC / MWh utile) en fonction de la Puissance bois (kW) pour les Chaufferies dédiées analysées

[15] Cf. précédemment

A l'exception d'un dossier CNA (cerclé à l'extrême droite du graphique), la **gamme de puissance** dans laquelle se situent les chaufferies dédiées est **moins large** que celle des réseaux de chaleur et s'arrête autour de 5MW. Un deuxième point[16] « atypique » présente une valeur élevée du coût global de la chaleur, sans être pour autant aberrante, par rapport aux valeurs observées pour les réseaux de chaleur.

En écartant ces 2 projets, on retrouve des résultats évoluant dans une **plage globalement convergente** avec celle observée pour les réseaux de chaleur dans la même gamme de puissance (ici de 600 kW à 5 MW), avec toutefois quelques différences :

- Les coûts se situent dans une plage de variation comparable (de 40 à 85 EUR TTC / MWh), voire un peu plus resserrée pour les puissances bois inférieures à 2MW, avec une moyenne à 62,1 EUR TTC / MWh.
- Sur l'ensemble de la gamme de puissance bois (plus étroite cependant), on observe globalement une dégressivité (plus faible) du coût global en fonction de la puissance bois, tous types d'usage des bâtiments confondus.

Une analyse complémentaire permet de mettre en évidence des écarts relatifs, par rapport à une moyenne commune[17], entre projets du secteur sanitaire et social, d'une part, et les autres, d'autre part, comme le résume le tableau ci-après.

Pbois	Coût global (EUR TTC / MWh)			écart moyen		
	valeur référence (moyenne pondérée)			sanitaire et social	enseignement et autres	logement social
(MW)	min	max	amplitude (+/-)			
tous projets	59,0		33%	-6%	5%	7%
	43,1	82,6				

Tableau 8 : Coût global de la chaleur (EUR TTC / MWh utile) et écarts moyens en fonction du type de projets selon l'usage principal du bâtiment, pour les Chaufferies dédiées analysées

Ces écarts moyens, fortement corrélés au ratio E/Pbois des projets, reflètent en grande partie l'écart d'absorption des frais « fixes » (annuités d'investissement, partie fixe des coûts d'exploitation) par une plus ou moins grande quantité d'énergie distribuée, à puissance bois constante.

Note : Lors de la comparaison avec les réseaux de chaleur, il faut rappeler que le coût global TTC supporte dans le cas des chaufferies dédiées une TVA plus élevée (autour de 16 à 18% en moyenne) que dans celui des réseaux de chaleur ayant une part EnR supérieure à 50% (TVA à 5,5%). A l'inverse, l'investissement « réseau » est en général très réduit voire inexistant pour les chaufferies dédiées.

Les chapitres suivants présentent les résultats pour chacun des postes des coûts d'exploitation.

3.2.2. Electricité et consommations auxiliaires

L'analyse montre que les recettes compensant les frais d'électricité sont directement proportionnelles à la **quantité d'énergie** délivrée par la chaufferie, indépendamment de la puissance bois de l'installation.

80 % des projets de l'échantillon analysé présentent ainsi un ratio compris entre 1,0 et 2,6 EUR HT / MWh utile, autour d'une valeur moyenne de **1,6 EUR HT / MWh utile**.

La stabilité observée du ratio relatif au poste P'1 en fonction de l'énergie distribuée s'explique par le lien direct entre la consommation électrique pour les auxiliaires (l'essentiel du poste) et l'énergie distribuée, comme dans le cas du r21 pour les réseaux de chaleur.

[16] Repéré par un cercle pointillé (Pbois = 750 kW ; coût de l'ordre de 105 EUR TTC/MWh)
[17] Calculée différemment, cf. annexe 1

Toutefois, on note que le ratio moyen se situe environ 40% en dessous de celui observé dans le cas des réseaux de chaleur. Ceci peut en partie s'interpréter comme l'énergie nécessaire aux fonctionnement des auxiliaires et équipements spécifiques liés à la distribution sur le réseau de chaleur.

3.2.3. Conduite et entretien courant

Concernant le poste P2, deux analyses ont été conduites :

- L'évolution du poste P2 en fonction de la puissance bois,
- L'évolution du poste P2 en fonction de la quantité d'énergie distribuée.

Dans le cas des chaufferies dédiées, sur l'échantillon étudié, l'interpolation linéaire réalisée en fonction de la **quantité d'énergie** est la seule qui permet d'obtenir une loi de variation plausible, même si les écarts entre observations et prévisions restent importants. L'approche en fonction de la puissance bois ne converge pas de façon satisfaisante.

Comme dans le cas des réseaux de chaleur, le ratio P2 rapporté à l'énergie distribuée, évolue de façon décroissante avec la puissance bois de la chaudière, et selon des résultats apparemment proches (en moyenne, et au regard de la dispersion des données) de la loi calculée pour les réseaux de chaleur (tableau ci-après).

80 % de projets de l'échantillon présentent des dépenses d'entretien courant comprises, selon la gamme de puissance, entre :

Pbois référence (MW)	**P2 - Chaufferies dédiées**		***r22 – Réseaux de chaleur (pour comparaison)***	
	Unité : EUR HT / MWh utile			
	Plage de variation	**Valeur moyenne**	***Plage de variation***	***Valeur moyenne***
1	12 à 23	14,2	*14 à 21*	*14,7*
2	8 à 21	12,3	*9 à 16*	*11,7*
3	8 à 21	11,8		
4,5	n/a	n/a	*9 à 13*	*11,1*
10	n/a	n/a	*10 à 12*	*10,6*

Tableau 9 : les recettes de conduite et d'entretien courant rapportées à l'énergie distribuée, en fonction de la puissance bois, pour les Chaufferies dédiées de l'échantillon, et comparaison avec les Réseaux de chaleur analysés

L'évolution du terme P2 présente donc une économie d'échelle liée à la taille du projet.

NB : on rappelle que les valeurs « de référence » pour la puissance bois utilisées pour les chaufferies dédiées ont été établies en fonction de la distribution constatée des projets de l'échantillon analysé. Ces valeurs sont différentes et se situent dans une gamme moins large que celle utilisées pour les réseaux de chaleur. Une autre limite à cette comparaison tient au fait que les chaufferies dédiées comme les réseaux de chaleur affichent un ratio E/Pbois variable.

3.2.4. Gros entretien et renouvellement

Concernant le terme P3, deux analyses ont été conduites :

- L'évolution du terme P3 en fonction de la puissance bois,
- L'évolution du terme P3 en fonction de l'investissement initial total. Contrairement à l'échantillon des réseaux de chaleur, la répartition entre postes « production de chaleur » et « réseau » n'a pas pu être utilisée, du fait de la faible pertinence (et en conséquence de la fiabilité hasardeuse) de cette distinction entre postes d'investissement pour des projets de

chaufferies dédiées antérieurs à la création du fonds chaleur. En moyenne, la part réseau, bien que fortement variable se situe en dessous de 25% de l'investissement total.

L'analyse du ratio de ce poste rapporté à **l'investissement total** (qui donnait les meilleurs résultats pour les réseaux de chaleur mais avec une assiette différente, ce qui ne rend pas la comparaison immédiate) conduit à un résultat apparemment plus élevé, notamment pour les premières puissances (et dégressif avec la puissance entre 1,9 et 1,3% en moyenne), que dans le cas des réseaux de chaleur. Il semble préférable de ce corriger ce résultat brut pour retenir une moyenne commune autour de 1,3% de l'investissement comme référence, indépendamment de la puissance.

D'autre part, dans la mesure où l'influence de la part réseau dans l'investissement est en général plus faible, le ratio du poste P3 rapporté à la **puissance bois** mérite dans ce cas d'être employé, dans la mesure où, d'une part, il produit des résultats convergents, et ou d'autre part, on observe une dégressivité du P3 en fonction de la puissance bois, explicable par celle attendue du coût moyen de l'investissement spécifique de la chaufferie en fonction de cette même puissance. On a donc intérêt à **croiser les 2 analyses**, comme l'illustre le tableau ci-après.

Pbois référence (MW)	**Valeur moyenne – P3 (ratio vs. Invest.) %**	**Valeur moyenne - P3 (ratio vs. Pbois) EUR HT/kW**	**Plage de variation - P3 (ratio vs. Pbois) EUR HT/kW**
1	1,3% (de 1,2% à 1,7%)*	16,0*	11 à 21*
2		12,4	8 à 17*
3		10,8	7 à 14,5

Tableau 10 : les recettes de gros entretien et renouvellement en fonction de l'investissement, pour les Chaufferies dédiées analysées (* : valeurs corrigées)

3.2.5. Synthèse et agrégation des coûts d'exploitation

L'analyse des coûts d'exploitation sur les chaufferies dédiées de l'échantillon a montré que les meilleures prévisions des postes sont obtenues respectivement :

- Pour le poste « électricité et consommations auxiliaires » (P'1) indépendamment de la classe de puissance, directement en fonction de la quantité d'énergie vendue.
- Pour le poste « conduite et entretien courant » (P2), en fonction de la quantité d'énergie vendue selon un ratio dégressif en fonction de puissance bois (économie d'échelle).
- Pour le poste « gros entretien et renouvellement » (P3), en fonction de la puissance bois, tout en croisant le résultat avec un ratio moyen du poste autour de 1,3% de l'investissement initial total.

Pbois référence (MW)	**P'1 / E (EUR HT / MWh utile)**		**P2 / E (EUR HT / MWh utile)**		**P3 / Pbois (EUR HT / kW)**	
	Plage de variation	Valeur moyenne	Plage de variation	Valeur moyenne	Plage de variation	Valeur moyenne
1	1 à 2,6	**1,6**	12 à 23	**14,2**	11 à 21*	**16,0***
2			8 à 21	**12,3**	8 à 17*	**12,4**
3			8 à 21	**11,8**	7 à 14,5	**10,8**

Tableau 11 : Synthèse des recettes liées aux coûts d'exploitation, pour les Chaufferies dédiées analysées (* : valeurs corrigées)

Comme pour les réseaux de chaleur, il faut souligner que, compte tenu, d'une part, de la diversité des situations contextuelles de montage des projets bois énergie, d'autre part, des limites[18] de l'étude, notamment de la taille modeste de l'échantillon, ces ratios « moyens » constatés peuvent certes être utilisés comme point de comparaison pour de nouveaux projets, mais ne présentent aucun caractère normatif : ils ne dispensent pas d'un examen au cas par cas des dossiers.

Du point de vue de l'usage des bâtiments, on n'observe pas sur les projets de l'échantillon de différence notable, poste par poste, en fonction de ces usages. Toutefois, plusieurs aspects doivent être notés :

- un nombre relativement élevé de projets, réseaux communaux et bâtiments d'enseignement ou tertiaires notamment, ont dû être retirés des analyses statistiques car ils affichent des valeurs de coûts annuels, sur les postes P2 et P3, trop faibles (divergentes) par rapport à la majorité des projets. Ce constat peut s'interpréter par le fait que, dans ce cas, un certain nombre de coûts sont « cachés » càd qu'ils ne sont pas affectés au bilan analytique de l'exploitation de l'unité, notamment quand ils sont mutualisés à une échelle plus large avec des coûts de « services généraux » d'une collectivité. Ils peuvent aussi avoir été sous-estimés ;
- le meilleur résultat obtenu en utilisant l'énergie distribuée (plutôt que la puissance bois) pour analyser le poste P2, confirme que ce paramètre est l'inducteur prépondérant pour ce poste dans le cas des chaufferies dédiées. La valeur du P2 ramenée à la puissance bois, fortement variable, dépend largement du ratio E/Pbois (intermittence et durée d'utilisation des bâtiments) ce qui confirme le résultat.

4. DECOMPOSITION DES COUTS D'EXPLOITATION

4.1. NATURE DES COUTS D'EXPLOITATION

Après avoir analysé et comparé, d'abord le coût global complet de la chaleur, dont les coûts d'exploitation forment une composante, puis les ratios économiques portant sur les postes agrégés des coûts d'exploitation, l'étude a porté sur les **charges d'exploitation décomposées par nature**, mises en relation avec les grandeurs physiques inductrices (exemple : heures de personnel) et certaines caractéristiques de l'installation.

Le compte d'exploitation[19] de l'installation de chauffage, à travers son volet « charges » est le premier moyen d'aborder cette question. Il faut cependant noter que ce compte d'exploitation ne fait pas l'objet d'une présentation totalement standard, même dans le cas des DSP, et qu'il peut être incomplet ou noyé dans un suivi comptable portant sur un périmètre plus vaste dans le cas de projets de chaufferies dédiées, gérées par des collectivités.

Le tableau suivant illustre la décomposition type d'un compte de charge dans le cas où l'unité est une entité de gestion spécifique, ce qui du point de vue de l'analyse présente le plus grand degré de complétude par rapport au périmètre des coûts étudiés. Le tableau donne la correspondance avec les postes de coûts d'exploitation (les parties en grisé sont hors du périmètre de cette étude).

[18] Cf. précédemment
[19] « exploitation » au sens comptable classique

Charges d'exploitation			Poste
Achats d'énergie primaire			P1
	Bois		
	Appoint		
Autres consommations de matières premières et énergie			P'1
Consommation électrique		*	
	Abonnement		
	Consommations		
Consommation d'eau			
	Abonnement		
	Consommations		
Conduite et entretien courant, gestion de l'unité			P2
Conduite et entretien courant			
	Charges de personnel	*	
	Pièces, fournitures		
	Consommables		
	Traitement des cendres foyer		
	Traitement des cendres volantes		
	Sous-traitance (travaux, entretien)		
Services extérieurs			
	Contrôles règlementaires		
	Redevances de crédit-bail, locations		
	Assurances		
	Services bancaires		
	Frais postaux et de télécommunication		
	Frais de déplacements, missions, réceptions		
	Annonces, insertions, honoraires / frais d'actes		
Charges de gestion, frais de structure			
	Frais de gestion de société dédiée, yc honoraires CAC (le cas échéant)		
	Charges diverses de gestion courante		
	Frais de structure		
Redevances à la collectivité			
	Redevance pour frais de contrôle, suivi		
	Autres (occupation du domaine public...)		
Impôts et taxes			
	Taxes locales (cotisation foncière et frais de chambres, ex TP)		
	Taxe foncière et autres impôts		
Gros entretien et renouvellement			P3
	Charges de personnel		
	Pièces, fournitures		
	Sous-traitance (travaux)		
Dotation aux amortissements			
	Dotations aux amortissements des immobilisations		
Charges financières			
Charges financières			
	Intérêts d'emprunt		
	Autres charges financières		
Impôt sur les sociétés			
Impôt sur les sociétés			
	Participation		
	Impôt sur les sociétés (IS)		

Tableau 12 : exemple de compte de charges d'une chaufferie bois
(* : postes analysés par ratios clés)

Suivant cette décomposition comptable, on observe que les charges sont de nature très diverses. En première analyse, les charges du poste :

- P'1 dépendent principalement de la **consommation** d'électricité pour les auxiliaires (force motrice pour les équipements hydrauliques, systèmes d'alimentation en combustible solide…),
- P2 sont principalement constituées par des opérations de **main d'œuvre** (interne et sous-traitance), des achats (pièces, consommables) et divers frais et charges liés au fonctionnement de l'unité de gestion,

- P3 sont majoritairement constituées d'**achat de pièces**, avec parfois une part main d'œuvre associée, mais portant sur le gros entretien de l'installation.

4.2. DIMENSIONNEMENT

4.2.1. Electricité et consommations auxiliaires

La consommation électrique peut être estimée à partir des puissances unitaires des équipements et de leur durée de fonctionnement. De façon prévisionnelle comme en suivi réel, cette consommation exprimée en EUR/an est le produit d'une consommation en MWhél/an et d'un prix du MWhél.

La consommation électrique s'estime en général à partir d'un ratio où elle est rapportée à l'énergie calorifique de l'installation (chaufferie et réseau). Ce **ratio unitaire (en MWhél/MWh)** pourrait décroître légèrement avec la taille de l'installation (puissance bois).

En complément, le prix du MWhél décroit également en fonction de la consommation.

La consommation d'eau et frais afférents représente typiquement de l'ordre de 3 à 5% seulement de la totalité de ce poste.

4.2.2. Opérations de conduite et d'entretien

Le temps consacré aux diverses opérations est établi a priori à partir de gammes constituant le **programme** de suivi, d'entretien et de maintenance de l'installation. Chaque opération unitaire est caractérisée par une fréquence et une durée unitaire. Sur la durée de fonctionnement de l'installation dans l'année (par exemple : 8 mois, soit 35 semaines), on peut en déduire le besoin en temps en h/an, qu'il faut ensuite lisser dans l'année pour obtenir un profil de charges de travail sensiblement stable d'une semaine sur l'autre.

Ces gammes d'opérations sont établies par les exploitants à partir de leur expérience et en intégrant les recommandations des constructeurs (plan de maintenance), qui sont **très variables** en fonction de la gamme de chaudière, des choix technologiques (approvisionnement, combustion, traitement des cendres, traitement des émissions) et des choix de conception d'ensemble de l'installation (taille du silo, taux de couverture bois…).

Parmi les opérations de nature technique, c'est-à-dire nécessaires au bon fonctionnement de l'installation, certaines peuvent ou doivent être sous-traitées. Par exemple, certains équipements doivent être contrôlés ou maintenus par leur fournisseur, à une fréquence donnée, pour continuer à bénéficier du maintien de la garantie (équipements électriques, foyer chaudière, pont roulant…). D'autres opérations nécessitent un savoir-faire spécifique (ramonage, traitement de l'eau). Le coût de ces opérations dépend des taux horaires appliqués aux profils (internes, sous-traitance) devant réaliser ces opérations.

Par ailleurs, selon le régime (classement) de l'installation ou selon la nature des équipements (comptage), des intervenants qualifiés doivent intervenir régulièrement pour certaines opérations de maintenance et/ou de contrôle technique. Ces interventions ont en général un montant forfaitaire.

En plus des frais de main d'œuvre et de sous-traitance recensés, il faut prévoir un volant d'achat de pièces détachées et de consommables. Ces pièces peuvent soit constituer un stock de sécurité présent en général en chaufferie pour réaliser les opérations d'entretien et de maintenance corrective les plus fréquentes, soit être approvisionnées en cours d'exercice pour réaliser les opérations d'entretien ou de maintenance planifiées. Le stock de sécurité initial de pièces représente de l'ordre de 1 à 2% du coût d'investissement des équipements concernés (chaudière, chaîne d'approvisionnement du combustible, évacuation des cendres et traitement des fumées). La distinction avec le poste P3 n'est pas toujours faite (stock P2 à zéro).

Le traitement des cendres représente un poste qu'il est préférable d'isoler. Il ne s'agit pas des frais de maintien en condition opérationnelle des équipements de décendrage, ni de suivi du bon fonctionnement de ceux-ci (compris dans les opérations de conduite et d'entretien présentées précédemment) mais de la gestion et de l'évacuation des cendres. Il faut distinguer les cendres sous foyer, qui peuvent être extraites par voie sèche ou par voie humide, des cendres volantes plus

délicates à manipuler et qui sont en général évacuées par « big bag ». Ces catégories de cendres diffèrent sensiblement notamment par leur composition chimique et ne font pas appel aux mêmes chaînes de traitement (de l'épandage à l'enfouissement), de sorte que le coût unitaire (ramené à la tonne de cendres traitée) peut varier d'un facteur 1 à 4. Le chiffrage de la masse de cendres à traiter pour une installation se déduit de la consommation annuelle prévisionnelle de biomasse, par un ratio dépendant aussi de la puissance de l'installation, de sa technologie mais aussi de la qualité du combustible. On peut retenir un ratio typique autour de 3 à 3,5% pour la masse totale de cendres en fonction de la masse de combustible solide en entrée. Compte tenu de leur coût de traitement unitaire plus élevé, les cendres volantes peuvent représenter près de 50% du coût de traitement des cendres.

NB : l'existence ou non de cendres volantes dépend de la présence ou non de filtres avancés de traitement des fumées. Ces filtres ne sont pas en général nécessaires pour les puissances les plus basses, jusqu'à un certain seuil de puissance. Ce seuil varie dans le temps (à la baisse) et dans l'espace, en fonction des évolutions de la réglementation (ou des conditions d'accès aux dispositifs d'aides[20]), et des exigences particulières régionales en matière de qualité de l'air.

4.2.3. Gros entretien et renouvellement

Le poste GER obéit à une logique particulière puisqu'il s'agit d'une dotation établie a priori pour la durée de vie de l'installation, ou du contrat qui s'y rapporte, de façon à permettre la rénovation, la réfection ou le remplacement d'équipements faisant partie de l'installation.

Les parties potentiellement concernées sont :

- la chaudière bois et ses équipements (barreaux de grille, réfractaire, système d'approvisionnement selon les technologies : poussoirs/racleurs, chaînes, tapis…), système d'extraction des cendres (vis), ventilateurs / extracteurs, conduits de fumée, éléments de filtres (manches, marteaux)
- les équipements périphériques en chaufferie (moteurs, vannes, bennes à cendres ou à mâchefers, vérins, câbles…) et relatifs la chaudière d'appoint
- certains éléments de génie civil (silo)
- les sous-stations du circuit primaire
- le réseau de distribution.

La durée de vie considérée et l'état final souhaité sont structurants pour la construction de ce poste.

Pour chaque élément concerné, le programme de renouvellement, établi en étroite collaboration avec les constructeurs de chaudière, défini année par année, les équipements à remplacer ou rénover dans le cadre d'opérations de maintenance programmée. En général, les plans des constructeurs sont établis sur 10 ans ; l'extrapolation sur une durée plus longue (typiquement 24 ans) s'appuie sur l'expérience des exploitants. Pour chaque opération, le coût main d'œuvre et pièces est établi.

Le total des achats de pièces lié à ces interventions constitue le coût global du renouvellement (avec parfois une partie des heures associées, plutôt que de les mutualiser dans le P2). Ce coût varie fortement d'une année sur l'autre ; il est alors réparti linéairement sur la durée de vie prévisionnelle de l'installation pour constituer la dotation au GER (P3). Le graphique ci-après illustre cette construction (sur 2 cas types hors échantillon ; pour le deuxième cas type, la planification n'est pas détaillée au-delà de la dixième année).

[20] Cf. site de l'Ademe, pour les conditions à date du fonds chaleur

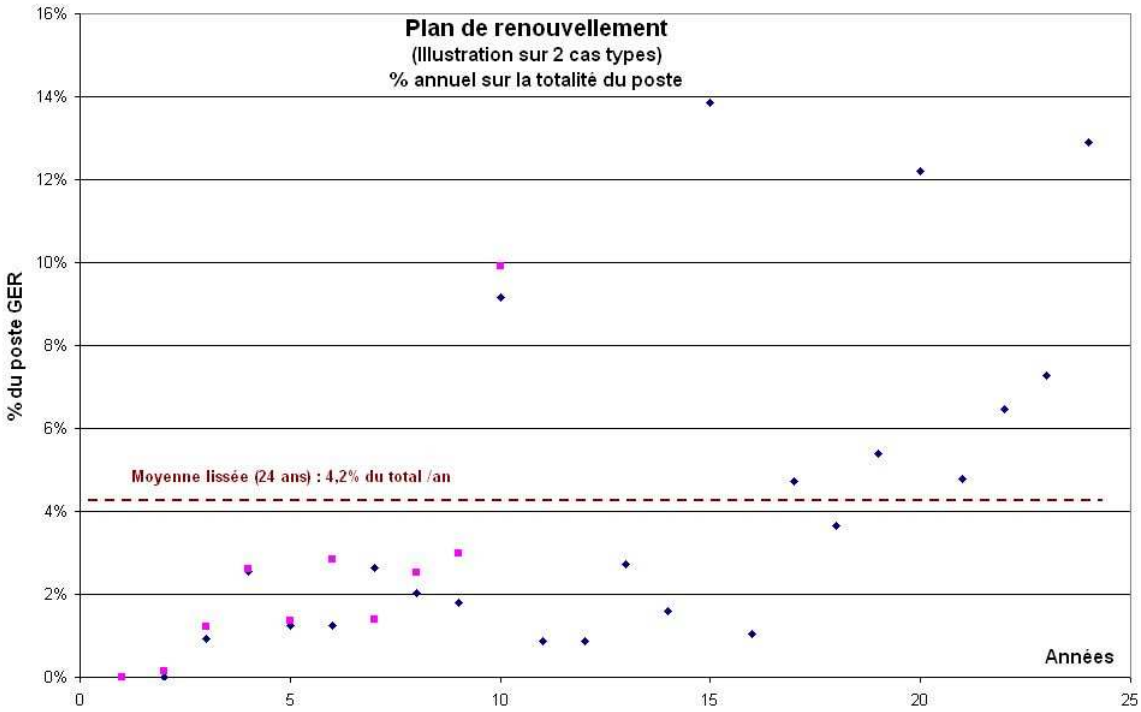


Figure 13 : Profil de répartition du poste GER en fonction d'un plan de renouvellement établi sur la durée de vie de l'installation (en % de la totalité du poste) en fonction du temps (années) pour 2 cas types de Réseaux de chaleur

Il peut arriver que suite à des incidents de fonctionnement les opérations programmées soient avancées à l'occasion d'une opération de maintenance corrective.

4.3. ANALYSE PAR RATIOS MOYENS

A partir de l'analyse quantitative et qualitative des données, plusieurs ratios clés ont été retenus pour faire l'objet d'une étude sur les données de suivi visant à déterminer des valeurs typiques moyennes pour ces ratios. Il faut reconnaître que cette analyse détaillée a été effectuée selon le niveau de détail permis par les données source disponibles. A ce sujet, seuls les coûts structurellement stables dans le temps, intrinsèquement ou sous la forme d'un ratio spécifique par rapport à un paramètre lié au fonctionnement, du fait de leur nature, ont pu être étudiés à partir de séries limitées en général à un seul exercice, qui plus est en période de montée en puissance des installations et non en régime « stabilisé ».

4.3.1. Consommation électrique

Pour les réseaux de chaleur

L'analyse confirme la proportionnalité, en moyenne, entre consommations électriques et quantité d'énergie délivrée par le réseau, indépendamment de la puissance bois de l'installation (graphique ci-après), aussi bien pour les données prévisionnelles que pour les données tirées du suivi des installations.

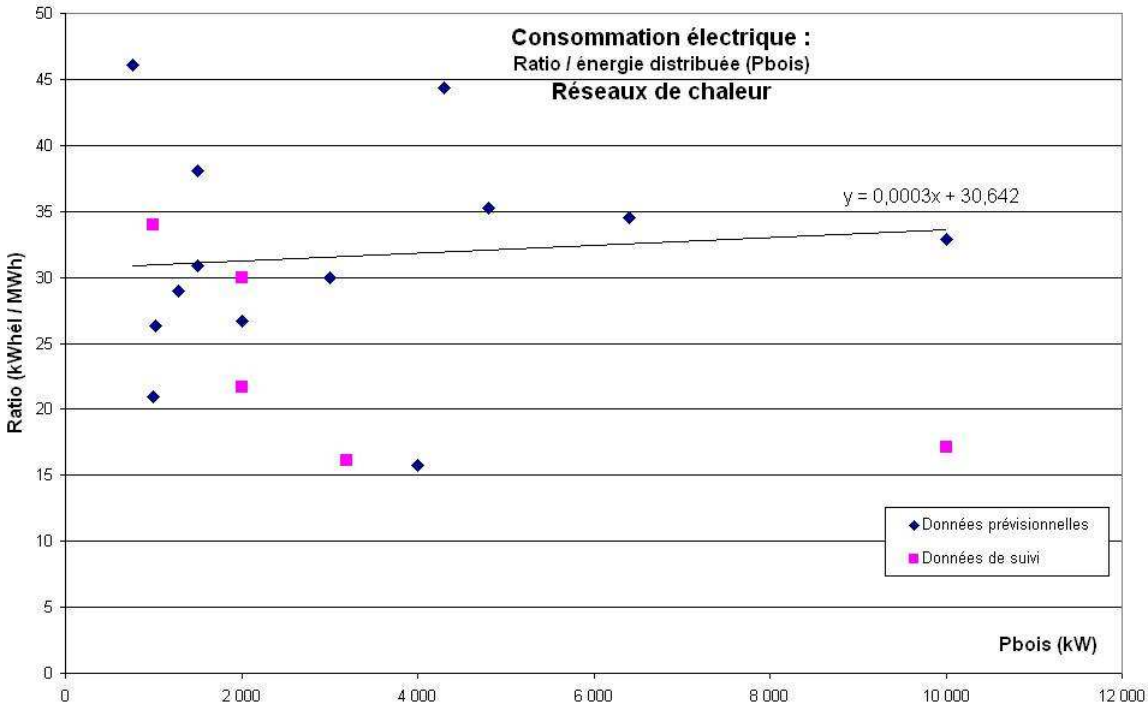


Figure 14 : Consommation électrique rapportée à l'énergie distribuée (kWhél / MWh utile) en fonction de la Puissance bois (kW) pour les Réseaux de chaleur analysés

75 % des projets de l'échantillon analysé présentent ainsi un ratio compris entre 20 et 40 kWhél / MWh utile, autour d'une valeur moyenne de **31 kWhél / MWh utile**. On retrouve un résultat cohérent de l'analyse du r21, avec un prix moyen de l'électricité autour de 90 EUR HT / MWhél.

L'analyse de l'influence de la longueur du réseau sur ce terme ne montre pas de résultat concluant ; on s'attend toutefois à ce que le réseau influence la consommation électrique du fait de la force motrice nécessaire à la distribution de l'eau chaude (typiquement de l'ordre de 60% pour la chaufferie et 40% pour le réseau).

Pour les chaufferies dédiées
L'échantillon ne contient pas suffisamment de projets pour lesquels les consommations électriques sont renseignées pour faire une analyse systématique. Toutefois, les projets pour lesquels on dispose des données se situent autour de la même plage de variation, mais avec une dispersion plus large. Ce « résultat » (à relativiser toutefois) n'est pas à retenir, dans la mesure où, la part réseau étant réduite, on devrait retrouver, d'une part, un écart à la baisse par rapport aux réseaux de chaleur (cf. analyse sur le poste P'1), d'autre part, une dispersion plus faible des valeurs.

4.3.2. Charges de personnel

L'analyse du poste P2 dans son ensemble montrait de meilleurs résultats plutôt en fonction de l'énergie distribuée. En ce qui concerne spécifiquement les heures de personnel, on a vu que la construction des besoins de main d'œuvre est faite à partir de gammes opératoires qui dépendent uniquement de la puissance bois de l'installation.

Pour les réseaux de chaleur
L'analyse confirme la proportionnalité, en moyenne, entre heures de main d'œuvre et puissance bois de l'installation (graphique ci-après), aussi bien pour les données prévisionnelles que pour les données tirées du suivi des installations.

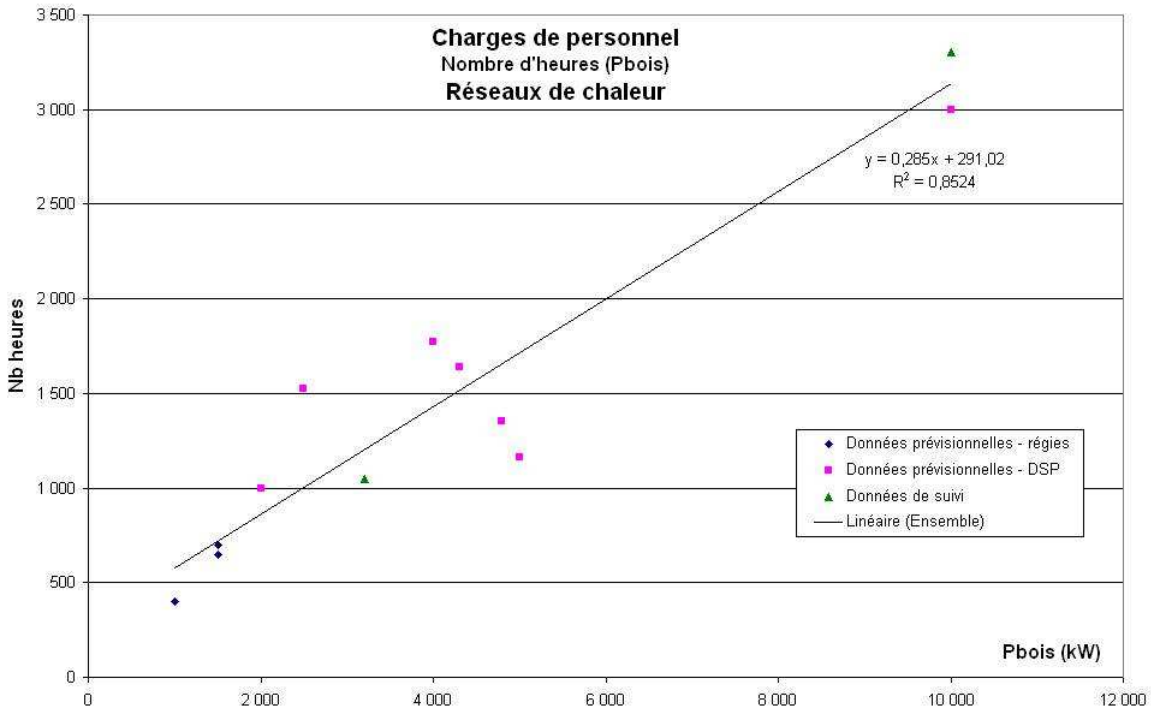


Figure 15 : Heures de main d'œuvre – Conduite et entretien courant (heures/an) en fonction de la Puissance bois (kW) pour les Réseaux de chaleur analysés

80 % de projets de l'échantillon présentent des heures de conduite et d'entretien courant comprises, selon la gamme de puissance, dans une plage de +/- 35 % autour des valeurs moyennes suivantes :

Pbois référence (MW)	Valeur moyenne (heures/an)	Ratio Heures/Pbois (heures/an/MW)
1	580	580
2	860	430
4,5	1 570	350
10	3 140	310

Tableau 16 : les heures de conduite et d'entretien courant en fonction de la puissance bois, pour les Réseaux de Chaleur analysés

L'évolution de ce nombre d'heures présente clairement une économie d'échelle liée à la taille du projet. Il faut toutefois rappeler que ce poste présente un périmètre variable en fonction, d'une part, de la part des activités sous-traitées (et non comptabilisées dans ce poste) et d'autre part, de la perméabilité avec le poste GER (les heures de GER tendant à être de plus en plus comptabilisées en tout ou partie dans le poste P2).

NB : sur le même échantillon, le nombre d'heures ramené à l'énergie distribuée varie dans une plage plus large, allant de 70 à 430 heures/ an par GWh utile distribué, directement influencé par la valeur du ratio E/Pbois.

4.3.3. Frais externes de conduite et entretien

Cette analyse concerne les frais extérieurs : sous-traitance, services extérieurs, charges de gestion et de structure (soit le poste complet, moins les frais de main d'œuvre, d'achats de pièces et fournitures, les redevances, impôts et taxes). De la même façon que les charges de personnel, ce poste comporte structurellement une part de variabilité élevée liée à son périmètre même qui varie

d'un projet à l'autre ; c'est notamment pour cette raison que nous avons analysé un poste regroupant plusieurs natures de coûts externes.

Pour les réseaux de chaleur
Le graphique ci-après illustre la plage de variation du ratio de ce poste rapporté au chiffre d'affaires de l'unité (lui-même directement lié à l'énergie distribuée) en fonction de la puissance bois.

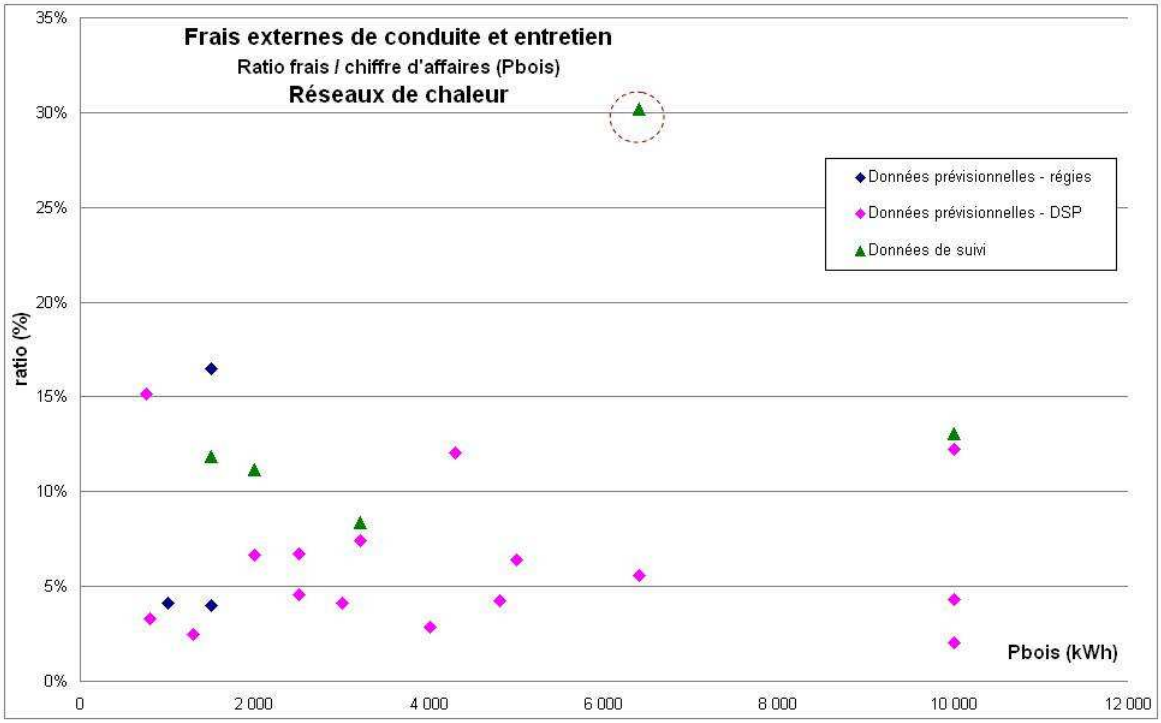


Figure 17 : Ratio des frais externes de conduite et entretien courant (heures/an) rapportés au chiffre d'affaires HT en fonction de la Puissance bois (kW) pour les Réseaux de chaleur analysés

A l'exception d'un point atypique, l'ensemble des projets évolue dans une large plage entre 3 et 16% du chiffre d'affaires, aussi bien pour les régies que les DSP, pour les données prévisionnelles comme pour celles tirées du suivi des projets.

4.3.4. Gros entretien et renouvellement

Le poste P3 étant un poste obéissant à une logique de construction particulière (provision sous forme de dotation annualisée), on se reportera aux chapitres 3 .1.4 et 3.2.4 pour l'analyse du ratio de ce poste par rapport à l'investissement.

4.4. NATURE ET CONSEQUENCES DES ECARTS EN FONCTIONNEMENT

4.4.1. Performance de l'exploitation

L'objectif général de l'exploitation est de maintenir l'installation en bon état de fonctionnement, mais aussi de faire en sorte, par la conduite de celle-ci, qu'elle atteigne ses objectifs opérationnels qui conditionnent son résultat sur le plan économique.

Le **taux de disponibilité** effectif de la chaufferie bois, conditionne directement le **taux de couverture bois**, et donc la rentabilité de l'unité. Le principal souci des personnels en charge de l'installation est donc de réduire au maximum les arrêts de la chaudière, en dehors des plages de maintenance programmée, du fait de pannes ou d'incidents de fonctionnement. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le taux de disponibilité est un objectif contractuel.

Un autre objectif primordial est le **rendement** de l'installation, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie distribuée par le réseau et l'énergie primaire contenue dans le combustible solide. Ce rendement se

décompose entre le rendement de la chaudière (énergie produite en sortie de chaudière / énergie primaire) et le rendement du réseau de distribution (énergie distribuée / énergie produite).

Ces indicateurs essentiels sont à mettre en rapport avec les coûts d'exploitation pour en évaluer l'efficacité.

4.4.2. Points clés / spécificités des chaufferies bois

La présente étude n'avait pas pour objet de réaliser un retour d'expérience « qualité » sur les principales causes d'arrêt, de pannes ou de sous-optimisation du fonctionnement des chaufferies, néanmoins, certains aspects on pu être remontés de façon récurrente :

- **alimentation automatique** : le système comprend l'extraction, le convoyage et l'introduction du combustible dans la chaudière. Il est constitué par des éléments mécaniques mobiles qui peuvent présenter pour certains d'entre eux une usure rapide, surtout quand le combustible est abrasif (composition chimique, bois de recyclages incluant des corps étrangers…) ou en cas de granulométrie inadaptée. Les désordres peuvent être limités par la conjonction de plusieurs actions : le choix d'un combustible de qualité (impact P1), une surveillance attentive des livraisons et des équipements (P2) et un programme de maintenance convenablement dimensionné (P3) ;
- **réglage de la combustion** : les chaufferies bois sont équipées d'automates permettant de régler les débits de combustible et d'air comburant, en fonction des besoins thermiques et des caractéristiques du combustible. Toutefois, la qualité du combustible reste bien souvent variable, et justifie pour obtenir une combustion optimale (ce qui impacte le rendement mais aussi l'entretien) l'intervention régulière de personnel compétent, maitrisant le couple chaudière/combustible, en fonction d'une expérience acquise progressivement lors de la première saison de chauffe (pas toujours significative du fonctionnement « stabilisé » de ce fait). La présence de mâchefers vitrifiés dans le foyer nécessite également des interventions ;
- **traitement des émissions** : les limites applicables aux chaufferies bois en terme d'émissions gazeuses et particulaires sont définies par la réglementation. La tenue de ces objectifs peut être obtenue de différentes façons, combinant la technologie de la chaudière, la qualité du combustible, les équipements de filtration installés, et leur mise en œuvre/entretien régulier par des personnels compétents. Les équipements de filtration sont malheureusement parfois à l'origine d'incidents ou de pannes (remplacements, incendies…) qui dégradent la disponibilité des installations. NB : ces équipements sont bien souvent assurés en cas de sinistre, si bien que c'est d'avantage l'impact sur le résultat de l'unité qui pose problème que le fait d'avoir à réparer un dommage direct aux installations ;
- **traitement des cendres** : un suivi régulier doit être réalisé pour éviter que la présence de mâchefers ou la formation de croutes ne vienne empêcher le fonctionnement normal des systèmes d'extraction ;
- **embouage du réseau** : ce risque doit être prévenu par une surveillance régulière au niveau du réseau et des sous-stations.

5. SYNTHESE ET PERSPECTIVES

L'étude a permis de mettre en évidence, en fonction du type de projets (réseaux de chaleur, chaufferies dédiées) et des gammes de puissance, une liste des principaux ratios permettant d'évaluer et de comparer les coûts d'exploitation entre projets de chaufferies bois, dans le contexte d'une optimisation du coût global de la chaleur. L'étude des postes de coûts montre :

- une relative stabilité du ratio des consommations électriques et auxiliaires (P'1) en fonction de l'énergie distribuée,
- un effet d'échelle en fonction de la puissance bois, pour les coûts de conduite et d'entretien courant (P2) et de gros entretien et renouvellement (P3),
- des plages de variation, qui bien que relativement larges, peuvent permettre « d'encadrer » les valeurs typiques des projets.

Des ratios techniques (consommation électrique, heures de personnel, frais externes) avec des plages de variation type associées ont été proposés pour permettre de croiser les informations, tout

reconnaissant que le caractère spécifique de chaque projet nécessite un examen approfondi au cas par cas.

Cette étude a également permis de confirmer plusieurs aspects complémentaires :

- L'absence d'un système de suivi qualité des projets à l'échelon national, qui permettrait de disposer en temps réel des données nécessaires à l'organisation du retour d'expérience, sur la durée de vie des installations,
- La faible répétitivité des situations des projets, tant sur le plan technique qu'économique, et en conséquence la difficulté à les comparer à des « cas types »,
- L'interdépendance des différents postes (investissement, exploitation, combustibles) entrant dans la composition du coût global de la chaleur, et la nécessité de concevoir et d'optimiser l'installation au niveau consolidé.

Dans ce contexte, il apparaît que la **mutualisation des bonnes pratiques** est certainement le principal levier pouvant permettre de maîtriser voire de réduire les coûts d'exploitation dans les nouveaux projets. Plusieurs recommandations peuvent ainsi être proposées, à plus ou moins long terme :

- Mettre en place au niveau national un **système de gestion de la qualité des projets**, couvrant les phases de conception, de réalisation et d'exploitation, **sur la durée de vie** des installations. Mettre en place une animation associée qui permette la diffusion des résultats vers les structures d'animation, cabinets d'AMO, BET spécialisés et délégataires,
    - En conséquence, renforcer le suivi systématique par des cabinets d'AMO spécialisés des installations en fonctionnement, pour améliorer la fiabilité des données et la pertinence des recommandations,
    - Ce suivi devrait inclure une base de faits techniques, permettant un meilleur dimensionnement des charges de maintenance préventive et corrective
- Promouvoir une **standardisation du contenu** des postes de coûts (et de la terminologie associée), entre les professionnels, à partir par exemple du modèle de grille de décomposition des coûts d'exploitation par nature, proposé dans ce rapport.
- Encourager la mise en place d'une **comptabilité auxiliaire spécifique** pour faire le suivi des projets gérés par les collectivités,
- Favoriser la **mutualisation des compétences** (structures intercommunales, externalisation) pour bénéficier du retour d'expérience d'opérations précédentes, lors de la conception et de l'exploitation en fonctionnement des chaufferies bois,
- Mettre à disposition des délégations régionales, chargées de l'instruction des dossiers d'aide, une **« checklist » de ratios techniques et économiques,** établis à partir des résultats de l'étude et visant à réduire les disparités entre projets et à en promouvoir davantage l'optimisation économique,
- Evaluer l'opportunité d'un programme national de recherche et développement pluri-disciplinaire de type « **ingénierie concourante** pour la maintenabilité » avec les constructeurs de chaudières et d'équipements, les exploitants de chauffage et les bureaux d'études spécialisés, ayant pour objectif d'augmenter la performance (disponibilité, rendement) des unités tout en réduisant les coûts d'exploitation associés.

Annexes

Annexe I : **MODELISATION DES COUTS D'EXPLOITATION**

Annexe II : **TYPOLOGIE DES PROJETS ANALYSES**

Annexe III : **GLOSSAIRE**

Annexe IV : **BIBLIOGRAPHIE**

Annexe I : MODELISATION DES COUTS D'EXPLOITATION

1. RESEAUX DE CHALEUR

1.1 Coût global de la chaleur (Pbois)

Ratio : coût global de la chaleur produite par l'installation (somme de tous les postes de la facture énergétique) rapporté à l'énergie distribuée, en fonction de la puissance bois.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

Unité : EUR TTC / MWh utile

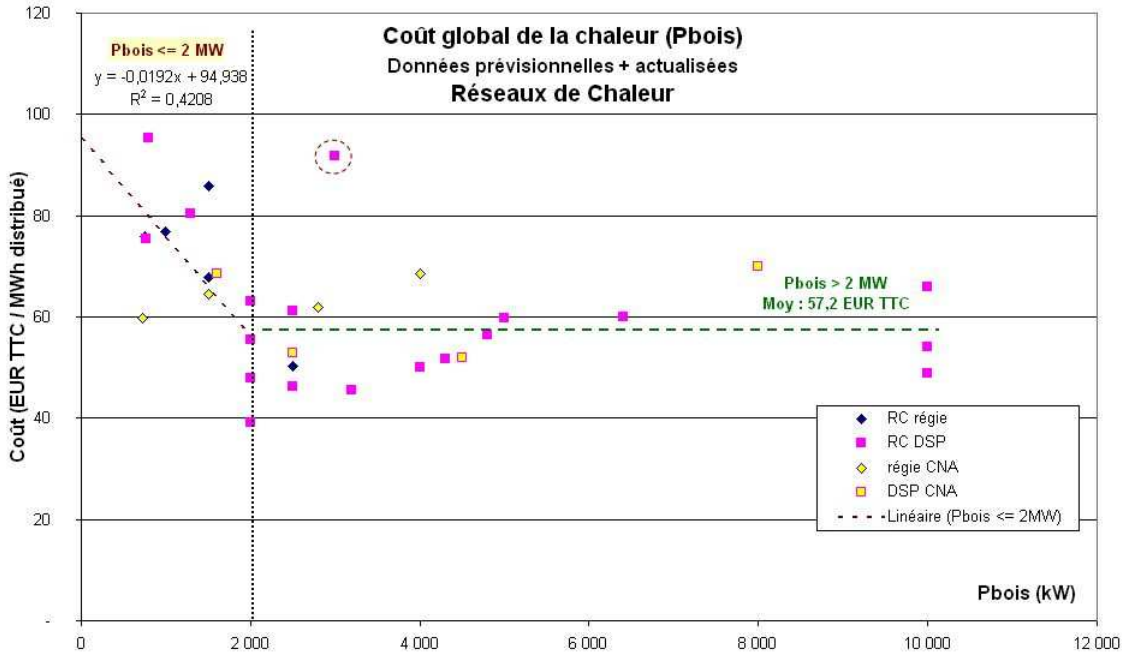
Mode de calcul :
- régression linéaire + valeur de référence (cas types) pour P<= 2 MW
- moyenne pondérée pour P> 2 MW (et <= 10 MW)

Projets conservés : 31 sur 32 (14+18) (97%).

Lois de variation[21] :
- Pbois <= 2 MW :
  Coût global = 94,9 - 0,02 * P bois (avec R^2 = 0,42, e = 11,9)

- Pbois > 2 MW :
  Coût global = 57,2 (avec amplitude des variations +/- 22%)

Courbe :



[21] Par convention, on note dans ce document « 0,00 » une valeur inférieure à 0,005 (mais non nulle)

Résultat :

Pbois	Coût global (EUR TTC / MWh)		
référence	valeur référence (par interpolation)		
(kW)	min	max	amplitude (+/-)
1 000	**75,7**		31%
	52,4	98,2	
2 000	**56,5**		
	39,1	73,3	

Pbois	Coût global (EUR TTC / MWh)		
	valeur référence (moyenne pondérée)		
(MW)	min	max	amplitude (+/-)
entre 2 et 10	**57,2**		22%
	45,5	70,0	

Commentaires :
Pour les réseaux d'une puissance bois > 2 MW, l'utilisation de la moyenne pondérée a été préférée à une interpolation linéaire car celle-ci indiquerait une augmentation du coût global avec la puissance, difficilement justifiable, ainsi qu'une plage d'amplitude plus importante (24%). La moyenne pondérée utilise ici la puissance comme coefficient pour compenser le fait que le nombre de projets est plus important dans les puissances les plus basses ; la moyenne arithmétique simple s'établit à 56,2 EUR TTC / MWh.

On observe :
- Une plage de variation importante dans l'absolu : entre 40 et 100 EUR TTC/ MWh, qui peut s'interpréter différemment sur 2 plages de puissance
  - Une dégressivité forte pour les puissances bois <= 2MW, avec une plage de variation relative de +/- 30% par rapport à l'interpolation linéaire sur cette plage
  - Un coût moyen évoluant dans une plage plus retreinte autour d'une constante (moyenne) au-delà de 2 MW
- pour les quelques projets issus de dossiers CNA, une tendance à des coûts globaux plus élevés ainsi qu'un resserrement de la plage de variation. Le nombre limité de projets concernés doit toutefois inciter à la prudence quant à l'interprétation de ce résultat.

NB : Le même type d'analyse a été effectué en utilisant l'énergie distribuée plutôt que la puissance bois. Cette analyse conforte le résultat et n'apporte pas d'éléments supplémentaires (si ce n'est l'influence du ratio E/Pbois). En effet, le seuil équivalent à 2 MW de Pbois se retrouve autour de 7 000 MWh distribués, conformément aux ratios E/Pbois moyens (3,5) de cette catégorie.

1.2 Gros entretien et renouvellement (Pbois)

Grandeur étudiée : poste de recette r23 couvrant les provisions pour entretien et renouvellement des installations, exprimé en fonction de la puissance bois.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

Unité : EUR HT

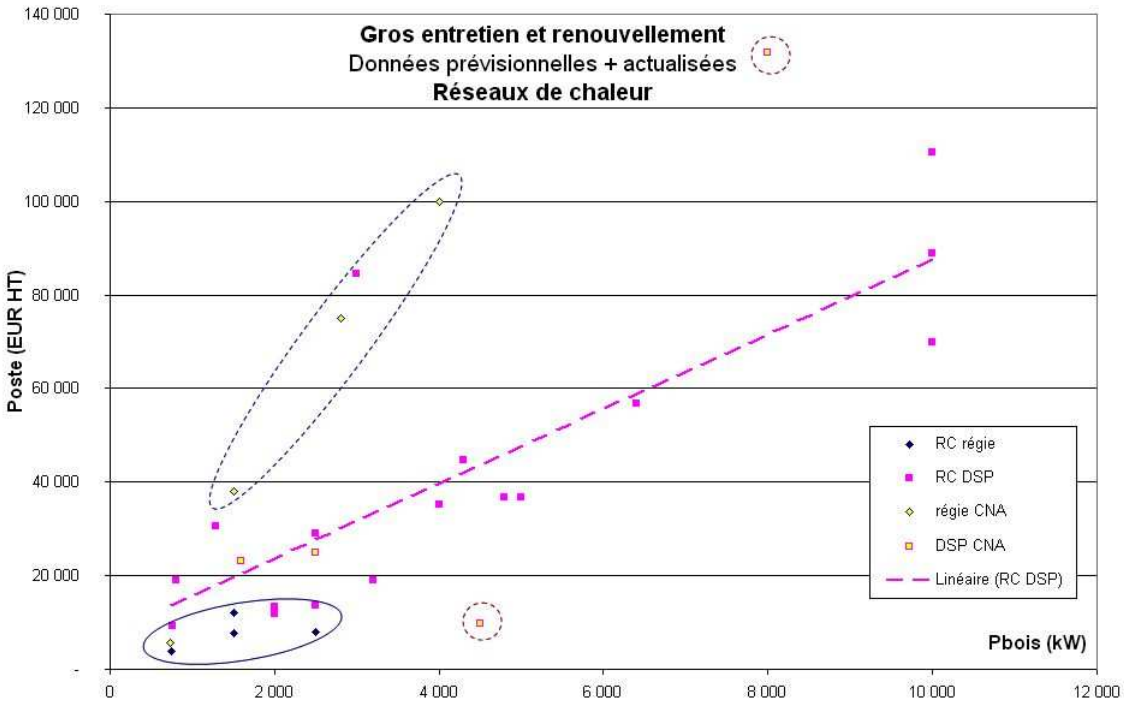
Mode de calcul :
- régression linéaire + valeur de référence (cas types) pour les DSP
- constat des plages de variation pour les régies

Projets conservés : 17 DSP sur 17 (100%).

Lois de variation :
- DSP :
  Poste = 7 580 + 8,0 * P bois (avec R^2 = 0,68, e = 17 740)

- Régies : non applicable

Courbe :



L'analyse illustrée par la courbe qui précède montre des résultats assez différents :

- Les réseaux de chaleur de l'échantillon, gérés en DSP suivent une loi linéaire en fonction de la puissance bois (à 1 exception près). Cette interpolation linéaire semble également former une sorte de « médiane » pour les projets CNA du même type, tout en notant que l'amplitude des écarts augmente (2 projets cerclés en pointillés bruns)
- Les projets de l'échantillon collecté, gérés en régie, se situent dans le bas de la courbe enveloppe des projets de DSP de puissance équivalente (cercle bleu en plein). Ils ne sont pas suffisamment nombreux (4 cas) pour qu'on tente de former pour eux une loi propre. En référence à la valeur extrapolée pour un projet « type » en DSP de même puissance, la « décote » serait de l'ordre de -40% à -70%
- Cette situation s'inverse radicalement pour la plupart des réseaux en régie issus des dossiers CNA (dans 3 cas sur 4) avec un surcoût de 100 à 150% par rapport à la valeur DSP extrapolée pour la même puissance.

Résultat :
Pour les projets gérés en DSP, on peut construire le tableau suivant

	Pbois	Poste GER (EUR HT/an)		
	référence	valeur référence (par interpolation)		
	(MW)	min	max	amplitude (+/-)
DSP	2,0	**23 600**		51%
		11 700	35 500	
	4,5	**43 600**		43%
		24 900	62 300	
	10,0	**87 600**		26%
		64 800	110 400	

Pour les projets en régie, on peut considérer que le cadre ci-dessus, établi pour les projets en DSP, devrait également constituer un « majorant » pour la valeur du poste. La divergence observée pour les projets CNA mériterait une analyse plus poussée, pour laquelle nous ne disposons pas des éléments détaillés nécessaires.

Commentaires :

Pour les projets en DSP, les valeurs min/max sont établies en appliquant l'amplitude de la variation observée sur l'échantillon dans la gamme de puissance concernée (hors 1 point éloigné) à la valeur de référence calculée pour cette gamme.

Par enquête auprès de professionnels, plusieurs pistes pourraient en partie expliquer l'écart observé pour les régies, entre projets de l'échantillon et dossiers récents « CNA » :

- Les projets de l'échantillon sont des projets lancés entre 2000 et 2008, soit avant la mise en place du « fonds chaleur ». A l'inverse, les projets mis à l'étude après fin 2008 incluent, dès les moyennes puissances, des moyens de traitement des émissions plus stricts et plus coûteux, ce qui impacte directement ce poste (cf. chapitre suivant)
- Une augmentation des standards de renouvellement, l'état final en « fin de vie » de l'installation pouvant ne pas être le même dans les 2 cas. Par le passé, la gestion en régie n'imposait pas de façon systématique que l'installation soit toujours en état parfait de fonctionnement à l'issue de sa durée de vie planifiée, ce qui en pratique pouvait conduire à refaire ou remplacer la chaufferie en fin de période (et à une sous-estimation du poste en comparaison). En revanche, dans le cas des projets en régie où le contrat d'exploitation prévoit une gestion analogue aux conditions d'une DSP, le poste est dimensionné sur les mêmes hypothèses. Ce point structurant est donc à vérifier au cas par cas
- Les règles comptables peuvent être différentes. Lorsque les achats de pièces (provisions) sont amortis sur des durées plus courtes, leur poids relatif augmente à budget constant
- Une tendance à l'augmentation des prix de certains équipements de réseau, notamment les sous-stations (cf. étude investissement[22])
- Une partie des charges de main d'œuvre, spécifique à ces opérations, peuvent être inclues dans le P3, alors que les énergéticiens auraient plutôt tendance à « mutualiser » et à lisser les charges sur l'année et à en faire supporter l'essentiel dans le P2 (difficile d'isoler précisément les 2 composantes).

Toutefois, même si ces pistes seraient de nature à expliquer une augmentation du poste pour les régies entre la situation d'avant et d'après la mise en place du fonds chaleur, il semble plus difficile de justifier que le résultat dépasse en montant absolu la valeur moyenne prévue pour un projet équivalent qui serait géré en DSP (le retour d'expérience étant aussi plus important pour ce mode de gestion). Un examen attentif au cas par cas des dossiers concernés semble indispensable.

1.3 Gros entretien et renouvellement (Investissement)

D'un point de vue pratique, il est intéressant pour l'examen des dossiers de pouvoir relier le montant du poste gros entretien et renouvellement à la puissance bois comme principal critère d'analyse (chapitre précédent). Toutefois, ce poste est majoritairement constitué de pièces et équipements qu'il s'agit de remplacer, refaire voire remettre en état, pendant la vie de l'installation. C'est pourquoi nous avons étudié de quelle façon il pouvait être mis en relation avec les coûts d'investissement initiaux du projet. Un objectif supplémentaire a été d'essayer de mettre en évidence un cadre unique qui puisse s'appliquer à l'ensemble des projets (échantillon, CNA) et quel que soit le mode de gestion (régie, DSP).

Grandeur étudiée : poste de recette r23 couvrant les provisions pour entretien et renouvellement des installations, exprimé en fonction de l'investissement en distinguant, conformément à la grille du fonds chaleur, « production de chaleur » d'une part, et « réseau » d'autre part.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

Unité : EUR HT

Mode de calcul :

- régression linéaire + valeur de référence

Projets conservés : 26 sur 32 (81%).

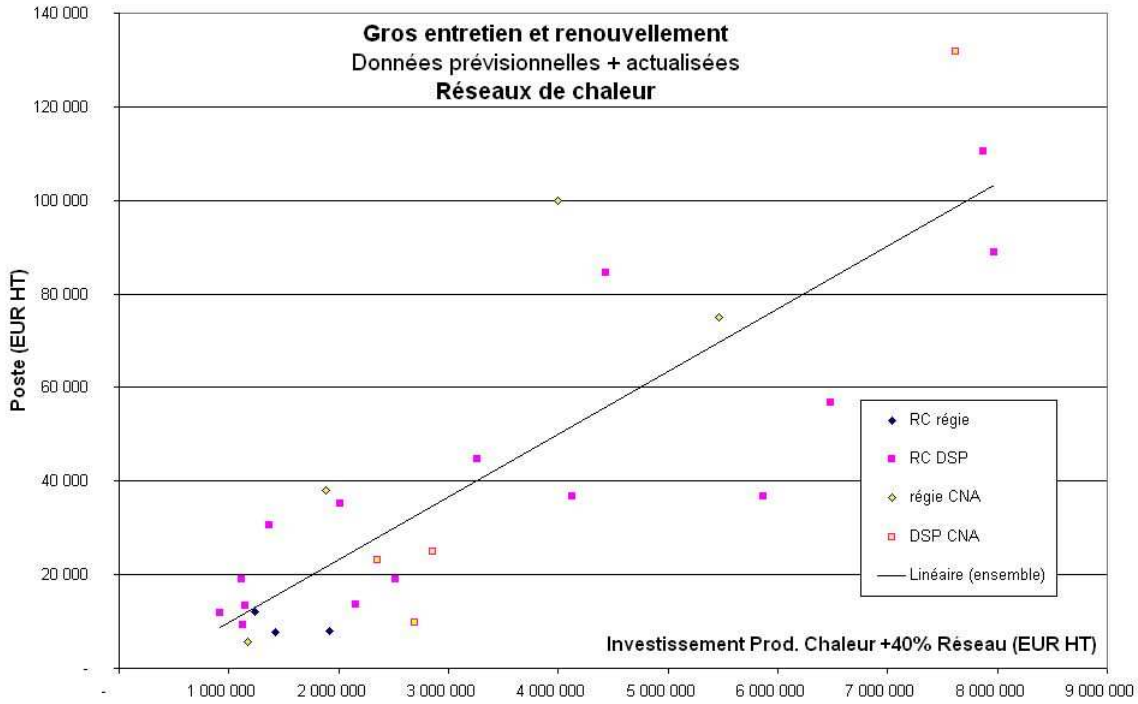
[22] Voir bibiliographie

Loi de variation[23] :

- **Poste = -3 591** + 0,0134 * (Inv. Prod. + 40% Inv. Rés.) (avec R^2 = 0,72, e = 19 440)
  où :
  Inv. Prod. = Investissement Production de Chaleur[24] (exprimé en EUR HT)
  Inv. Rés. = Investissement Réseau de Chaleur

L'analyse a permis de mettre en évidence (analyse de sensibilité) que le meilleur résultat, c'est-à-dire celui pour lequel une loi linéaire interpole le mieux la distribution rencontrée pour l'échantillon, est obtenu en appliquant un coefficient de 40% à l'investissement de la partie « réseau de chaleur » de l'investissement (variation analysée de 0% à 100%). Le terme constant négatif est peu important par rapport au résultat, et même par rapport à l'incertitude.

Courbe :



Résultat :

Investissement (M EUR)		Poste GER (EUR HT/an)			Ratio %	Gammes de puissance Pbois (MW)			
Production Chaleur		valeur référence (par interpolation)			GER /	régie		DSP	
+ 40% Réseau		min	max	amplitude (+/-)	Invest.*	min	max	min	max
tous projets	1,0	**9 800** n/a	20 200	106%	1,0%	0,750	1,5	0,8	2,0
	2,0	**23 200** 5 700	40 700	75%	1,2%	1,5	2,5	1,6	4,0
	5,0	**63 500** 31 000	96 000	51%	1,3%	2,8	4,0	3,0	5,0
	7,5	**97 000** 64 600	129 400	33%	1,3%			8,0	10,0

Commentaires :
Les 2 postes d'investissement retenus sont ceux de la grille du **fonds chaleur** : production de chaleur et réseau. L'intérêt de cette approche est qu'elle peut permettre à l'avenir une vérification de cohérence à partir des mêmes informations, de façon simple.

Pour l'analyse du poste « provisions pour gros entretien et renouvellement », une approche plus détaillée viserait normalement à isoler les coûts d'ingénierie et divers, qui sont agrégés au prorata dans la décomposition « fonds chaleur » de l'investissement en 2 postes. De plus, au sein du poste

[23] Par convention, on note dans ce document « 0,00 » une valeur inférieure à 0,005 (mais non nulle)
[24] Au sens de la définition du « fonds chaleur »

« production de chaleur », on s'intéresserait uniquement au lot « process » regroupant la chaufferie et ses équipements, par opposition au génie civil, en tous cas pas en totalité. De la même façon, on aimerait pouvoir distinguer la part sous-stations des canalisations au sein de l'investissement « réseau ». Une vérification a été menée sur les projets de l'échantillon où les données étaient disponibles avec le détail suffisant ; celle-ci n'apporte toutefois pas de meilleurs résultats pour l'interprétation du « r23 » que l'approche retenue ici.

Le tableau ci-dessus permet de traiter dans un **cadre commun** l'ensemble des projets rencontrés, y compris les régies « CNA », **en prenant l'investissement comme critère**. Cela ne dispense pas d'analyser au cas par cas la cohérence des coûts d'investissement de chaque dossier.

L'analyse de sensibilité a montré de meilleurs résultats avec un coefficient de 40% sur le poste « investissement réseau » (au sens du fonds chaleur) là où, à dire d'experts, on aurait plutôt attendu un coefficient **de l'ordre de 10%**, mais en isolant la part équipements et sous-stations dans le poste « réseau » et hors agrégation avec l'ingénierie et les frais divers. La vérification effectuée avec 10% ne donne pas de résultats plus simplement interprétables.

1.4 Conduite et entretien courant (Pbois)

Grandeur étudiée : poste de recette r22 couvrant les charges pour entretien et conduite des installations, exprimé en fonction de la puissance bois.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

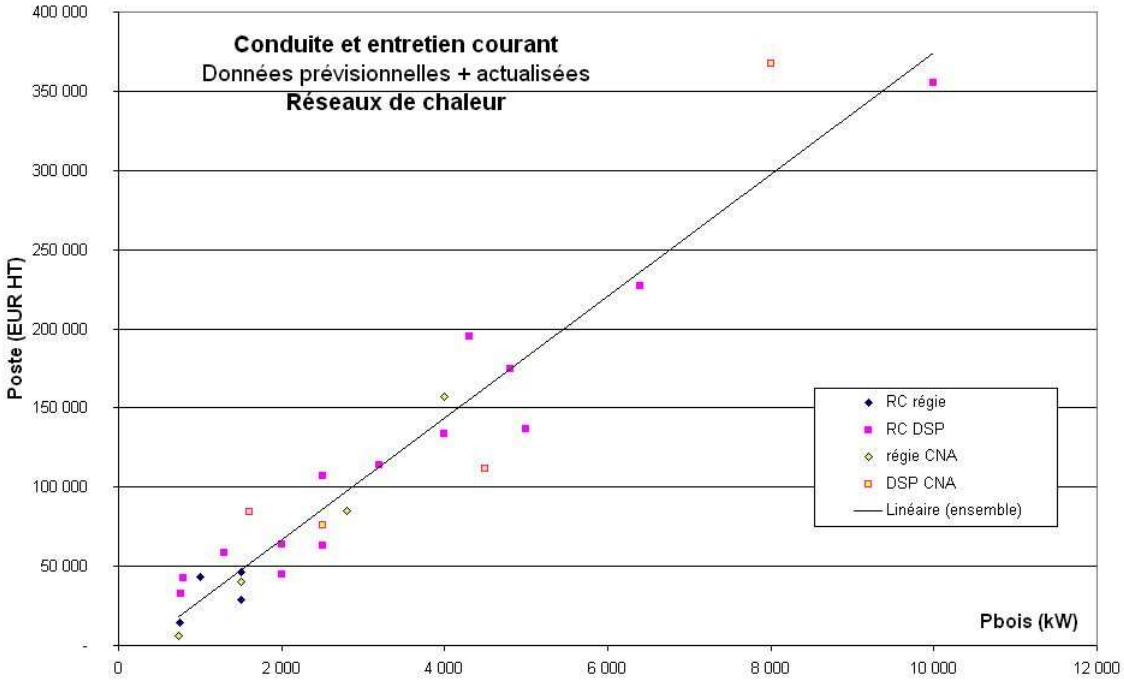
Unité : EUR HT

Mode de calcul :
- régression linéaire + valeur de référence (cas types)

Projets conservés : 26 sur 32 (84%).

Loi de variation :
- **Poste = -10 145** + 38,4 * P bois (avec R^2 = 0,92, e = 26 190)

Courbe :



Résultat :

	Pbois référence (MW)	Poste C&E (EUR HT/an) valeur référence (par interpolation) min	max	amplitude (+/-)	Ratio C&E / Pbois (EUR/kW)
tous projets	1,0	**28 300**		56%	28,3
		12 400	44 200		
	2,0	**66 700**		51%	33,4
		32 600	100 800		
	4,5	**162 800**		25%	36,2
		121 800	203 800		
DSP uniquement	10,0	**374 100**		19%	37,4
		303 700	444 500		

Commentaires :
L'analyse montre une remarquable convergence sur le plan des données vers un modèle linéaire en fonction de la puissance bois, modèle commun quel que soit le mode de gestion et la gamme de puissance. Cela pourrait être interprété comme le signe d'une meilleure maîtrise du contenu technique et économique de ce poste par les exploitants, délégataires ou régies.

Toutefois, plusieurs aspects doivent tempérer cet optimisme :

- le terme constant de l'interpolation linéaire est nettement négatif, ce qui ne fait pas grand sens en pratique. Cependant, la gamme de puissance étudiée ne commence pas à zéro, et l'existence de paliers techniques est confirmée par les exploitants
- peu de projets ont du être écartés, mais parmi ceux-ci plusieurs projets de forte puissance pour lesquels les valeurs collectées apparaissent soit très élevées (projets récents), soit très basses (projets anciens), de sorte qu'il n'est pas possible de les réconcilier avec le modèle. La principale explication mise en avant tient au durcissement des critères environnementaux. Une autre hypothèse pourrait tenir au fait que les contours entre ce poste et le poste GER voire Consommations électriques et auxiliaires sont parfois perméables, et qu'une partie des charges (notamment la part main d'œuvre) pourrait ainsi être comptabilisée de façon différente d'un projet à l'autre. Cela est d'autant plus plausible que ces postes sont facturés selon la même clé tarifaire (puissance installée ou URF[25]) ;

[25] Unité de Répartition Forfaitaire

une approche qui consiste à analyser l'ensemble des coûts d'exploitation de façon agrégée est présentée plus loin.

On remarque aussi que le ratio spécifique du montant de ce poste rapporté à la puissance bois de l'installation croît avec cette puissance. Il n'y aurait donc pas d'effet d'échelle. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de ce phénomène :

- L'essentiel des charges associées à ce poste sont d'avantage liées à l'énergie distribuée qu'à la puissance bois elle-même. Or, le nombre d'heures équivalent pleine puissance augmente avec la puissance (au travers du ration E/Pbois).
- Un certain nombre de contraintes pèsent plus lourdement sur les installations de plus forte puissance, par exemple : les aspects règlementaires (passage de déclaration à autorisation : frais de contrôles règlementaires), le traitement des émissions (consommation de manches de filtres, évacuation des cendres volantes) et les assurances
- Chez certains constructeurs de chaudière bois, l'optimisation technique / l'automatisation des installations est plus poussée sur certaines gammes « packagées » situées en milieu de gamme, alors que les projets de forte puissance moins nombreux font plutôt l'objet d'une conception au cas par cas ; les seuils dépendent des constructeurs.
- Enfin, on notera que l'amplitude de variation est la plus élevée avec les puissances les plus basses et que, dans la première plage de puissance (inférieure à 2 MW), les projets pour lesquels la valeur du poste est la moins élevée sont les projets en régie, alors que le ratio des projets en DSP est du même ordre que celui des projets plus élevés. L'écart moyen observé entre régies et DSP dans cette gamme est de l'ordre de 30% environ.
- Cet écart constaté est toutefois à interpréter avec prudence. En effet, certains cas de régies de l'échantillon, pour lesquelles sont reportées ici des données prévisionnelles, sont passés, après quelques années de fonctionnement, d'une régie gérée en propre à la mise en place d'un contrat d'exploitation (sur le P2), suite à des difficultés ou des « désordres » récurrents et les conclusions d'un audit. Cela souligne la nécessité de disposer d'un cadre professionnel entrainé pour gérer ces installations, qui bien souvent ne peut être accessible aux « petites » structures (qui ne peuvent atteindre seules le seuil critique en compétences) qu'au moyen d'un contrat avec un énergéticien ou d'une structure de maîtrise d'ouvrage mutualisée, à condition dans ce dernier cas de l'avoir envisagé et mis en place dès le montage du projet.

1.5 Conduite et entretien courant (Energie distribuée)

D'un point de vue pratique, il est intéressant pour l'examen des dossiers de pouvoir relier le montant du poste « conduite et entretien courant » à la puissance bois comme principal critère d'analyse (chapitre précédent). Ceci se justifie d'autant plus que ce poste est pour une bonne partie le résultat de l'addition de différents postes récurrents simplement liés à la taille de l'installation, en relation avec la gamme technologique de la chaudière bois.

Toutefois, une autre partie des charges est proportionnelle à l'usage de l'équipement. C'est pourquoi nous avons analysé l'évolution de ce poste en fonction de l'énergie distribuée annuellement.

Grandeur étudiée : poste de recette r22 couvrant les charges pour entretien et conduite des installations, exprimé en fonction de l'énergie distribuée annuellement

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

Unité : EUR HT / MWh utile / an

Mode de calcul :

- régression linéaire + valeur de référence (cas types) pour les DSP
- constat des plages de variation pour les régies

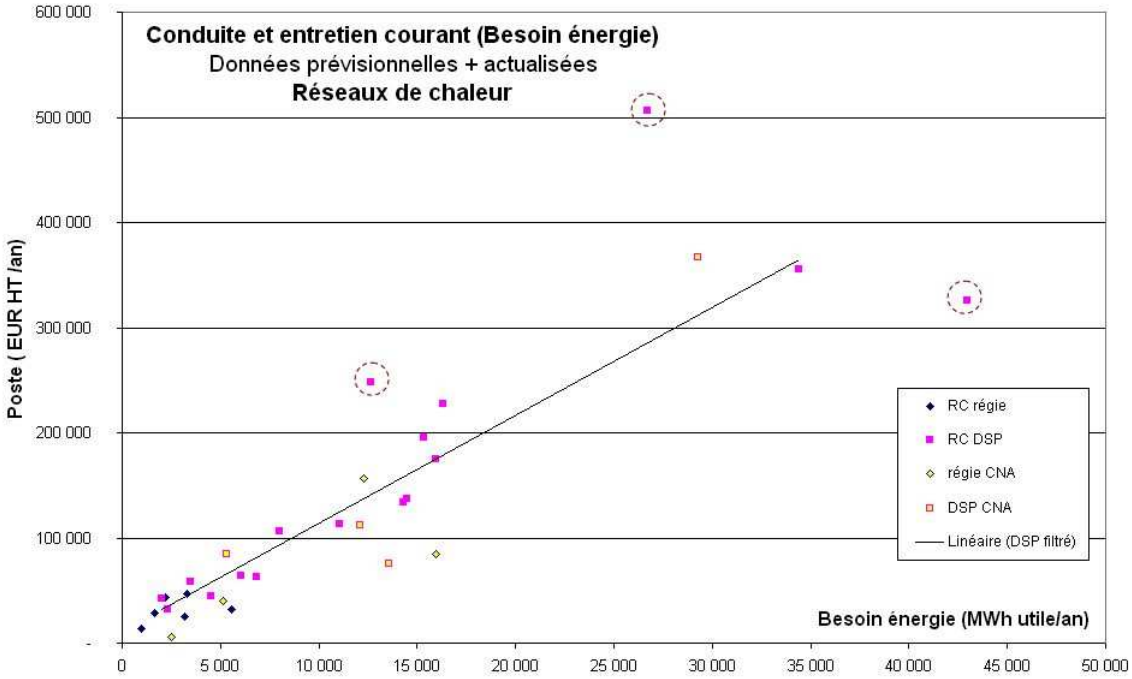
Projets conservés : 14 DSP sur 17 (82%).

Loi de variation :

- DSP :
  Poste = 11 084 + 10,27 * Energie (avec R^2 = 0,95, e = 21 332)

- Régies : non applicable

Courbe :



Les points cerclés en brun pointillé correspondent aux projets en DSP avec des valeurs « éloignées » des autres, qui ont été écartés avant interpolation.

Résultats : tableau pour les projets **en DSP**.

Pbois	Ratio C&E / Besoin énergie (EUR HT/MWh/an)		
référence	valeur référence (par interpolation)		
(MW)	min	max	amplitude (+/-)
1,0	**14,7**		41%
	13,8	20,8	
2,0	**11,7**		35%
	9,2	15,8	
4,5	**11,1**		17%
	9,2	12,7	
10,0	**10,6**		19%
	10,3	12,5	

La valeur « référence » est obtenue par calcul à partir de l'interpolation (moyenne des prévisions correspondant à l'énergie distribuée dans la plage de puissance). Les valeurs min et max portent sur les ratios calculés sur les valeurs relevées dans la gamme de puissance concernée (hors projets écartés). On en déduit l'amplitude des variations sur l'échantillon.

Les projets **en régie** de l'échantillon (hors projet CNA) évoluent dans une plage relativement large, entre -50% et + 30% par rapport à la prévision établie pour les projets en DSP, utilisée ici comme point de comparaison. La moyenne des écarts constatés se situe à : **-15%**.

Commentaire :

Cette méthode alternative fondée sur le besoin en énergie permet de **réduire la plage d'amplitude** prévisionnelle dans laquelle évoluent la plupart des projets de DSP, par rapport à la prévision calculée à partir de la puissance bois.
La comparaison des influences comparées de la puissance bois et de l'énergie distribuée (régression double) indique que celles-ci pèsent pratiquement autant dans le résultat, avec une influence plus importante de la puissance en dessous de 2 MW environ, et de l'énergie distribuée au-delà. Toutefois, cette interpolation donne en moyenne une prévision de moins bonne qualité que celle utilisant simplement l'énergie.

1.6 Electricité et consommations auxiliaires

Grandeur étudiée : poste de recette r21 couvrant les consommations d'électricité et auxiliaires, exprimé en fonction de l'énergie distribuée annuellement.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

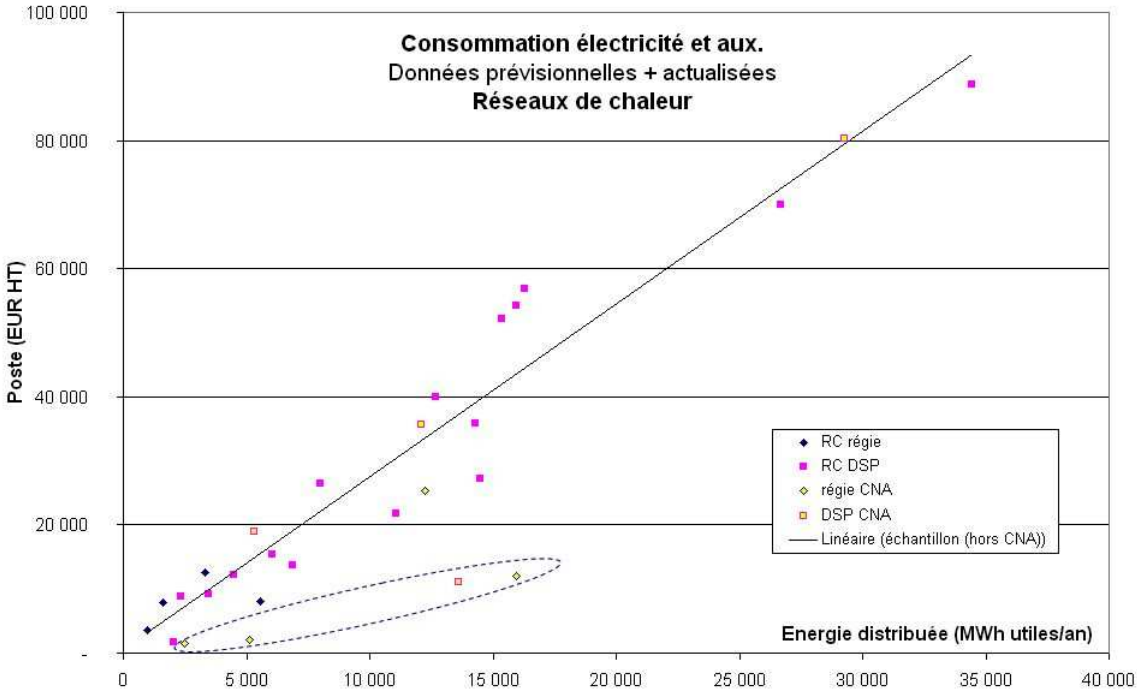
Unité : EUR HT / MWh utiles / an

Mode de calcul :
- régression linéaire (hors projets CNA)

Projets conservés : 20 sur 27 (75%).

Loi de variation :
- **Poste =** 536 + **2,70** * E (avec R^2 = 0,93, e = 6 740)

Courbe :



Résultat :

	Poste Elec auxiliaires		
	ratio / energie distribuée (EUR HT/MWh)		
	min	max	amplitude (+/-)
tous projets	2,75		34%
	1,9	3,8	

Commentaires :

L'analyse montre une remarquable convergence sur le plan des données vers un modèle linéaire en fonction de l'énergie distribuée, modèle commun quel que soit le mode de gestion et la gamme de puissance. Cela s'explique par le lien direct entre consommation électrique pour les auxiliaires (l'essentiel du poste) et l'énergie distribuée sur le réseau. L'analyse en fonction de la puissance bois de l'installation conduit à de plus fortes disparités.

Dans le cas présent, le résultat est conforté par le fait que le terme constant est négligeable devant la prévision de la valeur pour le poste, ce qui fait que l'on peut se contenter d'un simple ratio, avec une précision convenable.

Une analyse spécifique portant sur les projets incluant des électrofiltres a montré que ceux-ci affichaient une consommation plus importante à puissance équivalente, mais sans que cela soit véritablement détectable en fonction de l'énergie distribuée. Ceci doit toutefois être nuancé par le fait qu'il s'agit de données prévisionnelles et que le modèle de consommation des électrofiltres est susceptible, d'une part d'être de mieux en mieux appréhendé (retour d'expérience) en fonction de leur usage, et d'autre part d'évoluer avec la technologie.

Il faut enfin remarquer qu'il a été choisi de ne pas consolider les projets issus des dossiers CNA, un certain nombre d'entre eux (entourés d'un pointillé bleu) montrant des consommations nettement plus basses que les autres projets, à l'inverse de ce qui avait été observé pour le poste « gros entretien et renouvellement », bien que le rapport semble difficile à justifier a priori. Cela mériterait d'être creusé à partir de données détaillées. En pratique, cela renforce l'intérêt d'une vérification globale de cohérence au niveau du poste exploitation agrégé.

1.7 Poste exploitation (agrégé)

Grandeur étudiée : poste de recette **r21+r22+r23** couvrant les consommations d'électricité et auxiliaires, les charges pour entretien et conduite des installations, ainsi que les provisions pour entretien et renouvellement, exprimé en fonction de l'énergie distribuée annuellement.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

Unité : EUR HT / MWh utiles / an

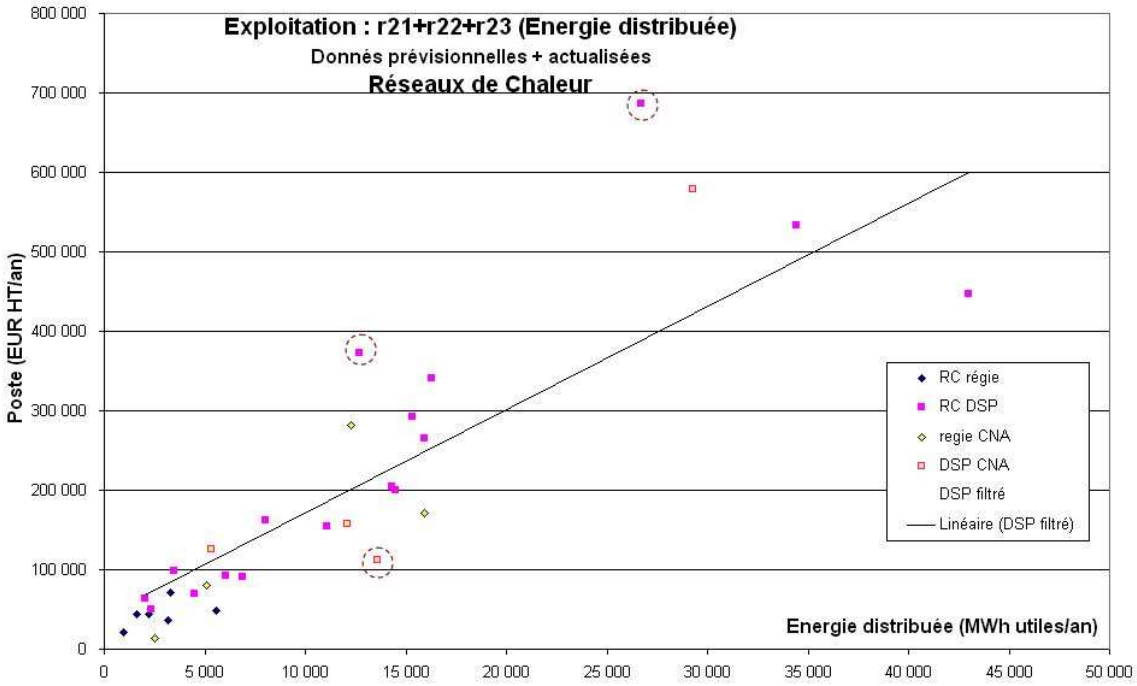
Mode de calcul :
- régression linéaire + valeur de référence (cas types) pour les DSP
- constat des plages de variation pour les régies

Projets conservés : 18 DSP sur 21 (86%).

Loi de variation :
- DSP :
  Poste = 41 057 + 13,01 * Energie (avec R^2 = 0,84, e = 65 893)

- Régies : non applicable

Courbe :



Les points cerclés en brun correspondent aux projets en DSP avec des valeurs « éloignées » des autres, qui ont été écartés avant interpolation. On notera que ce sont les mêmes projets qui présentaient également des valeurs extrêmes pour le poste r22.

Résultats : tableau pour les projets **en DSP**.

Pbois	Ratio Exploitation / B. énergie (EUR HT/MWh/an)			
référence	valeur référence (par interpolation)*			
(MW)	min	max	amplitude (+/-)	coefficient
1,0	**24,4**		27%	-17%
	21,5	30,9		
2,0	**20,9**		37%	
	13,2	23,7		
4,5	**16,2**		20%	
	13,0	19,0		
10,0	**14,2**		39%	
	10,4	19,8		
	* ajustée pour la 1ère gamme de puissance			

La valeur « référence » est obtenue par calcul à partir de l'interpolation (moyenne des prévisions correspondant à l'énergie distribuée dans la plage de puissance). Dans le cas de la première gamme de puissance, la valeur ainsi calculée a semblé élevée (29,5) ; une analyse de sensibilité en écartant un quatrième point de l'échantillon conduit à une valeur plus faible du ratio (19,2) : on a retenu comme référence la moyenne entre les deux qui présente aussi l'avantage de mieux s'inscrire dans la plage de variation observée pour cette gamme.

Les projets **en régie** de l'échantillon (hors projet CNA) évoluent dans une plage large, entre -60% et + 40% par rapport à la prévision établie pour les projets en DSP, utilisée ici comme point de comparaison. La moyenne des écarts constatés se situe autour de : **-25%**.

Commentaires :
Ces postes font partie du « R2 ». Bien que celui-ci soit habituellement dénommé « partie fixe » de la facture de vente de chaleur, et le plus souvent réparti suivant la puissance distribuée auprès de chaque abonné, on observe que la meilleure loi de variation pour prédire ce poste utilise l'énergie distribuée et non pas la puissance bois par exemple. Ce paradoxe n'est qu'apparent et on ne doit pas en tirer de conclusion hâtive. En effet, l'énergie distribuée considérée ici est l'énergie moyenne distribuée telle qu'établie au moment du montage du projet, à partir des prévisions de

consommation et des moyennes de température. Une fois l'installation dimensionnée, construite et mise en route, sur la base de ce besoin, l'essentiel des charges du poste est bien fixe : elle dépend peu des fluctuations énergétiques d'une année sur l'autre.

2. CHAUFFERIES DEDIEES

2.1 Coût global de la chaleur

Ratio : coût global de la chaleur produite par l'installation (somme de tous les postes de la facture énergétique) rapporté à l'énergie distribuée, en fonction de la puissance bois.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles[26], actualisées

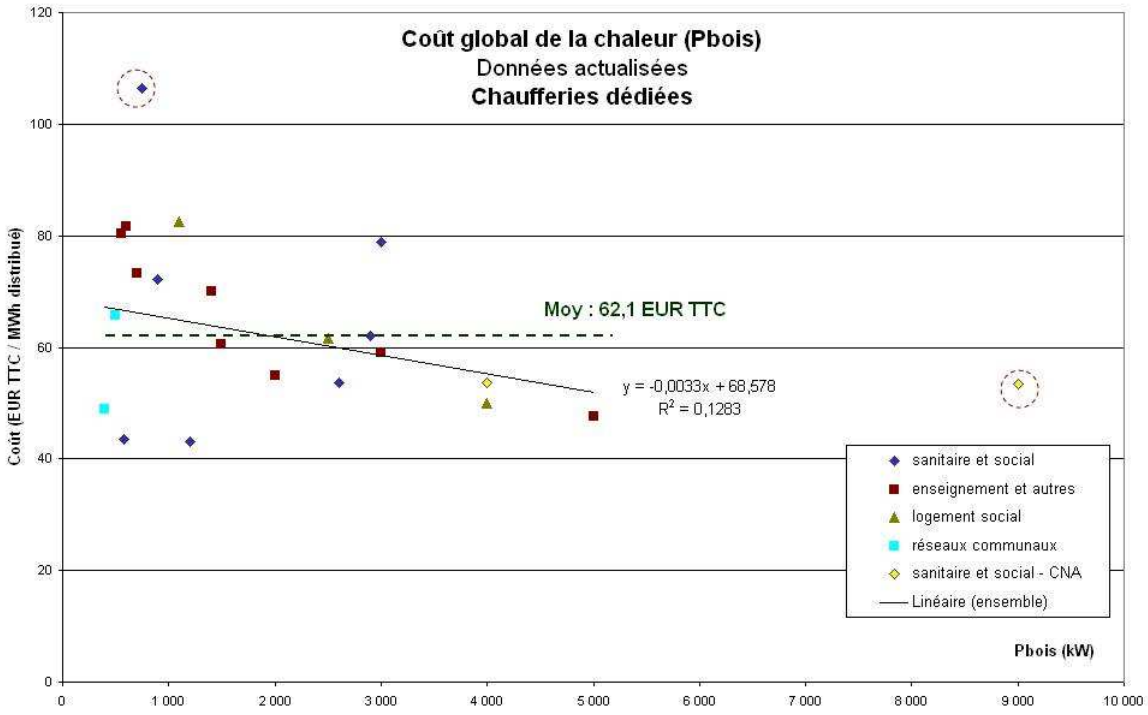
Unité : EUR TTC / MWh utile

Mode de calcul :
- régression linéaire + valeur de référence (cas types)

Projets conservés : 20 sur 22 (90%).

Lois de variation :
- **Coût global** = 68,6 - 0,0033 * P bois (avec R^2 = 0,12, e = 12,4)

Courbe :



Résultat :

[26] Pour la plupart des projets, complétées par des moyennes lissées des charges réelles pour quelques projets en complément (pour tout ce qui concerne les chaufferies dédiées)

Pbois	Coût global (EUR TTC / MWh)		
référence	valeur référence (par interpolation)		
(kW)	min	max	amplitude (+/-)
1 000	**65,2**		35%
	42,7	87,9	
2 000	**61,9**		
	40,5	83,4	
3 000	**58,5**		
	38,3	78,9	

Commentaires :
Ce résultat traduit simplement la dégressivité observée sur l'échantillon en fonction de la puissance bois, avec une plage de variation relative de +/- 35% par rapport à l'interpolation linéaire calculée, tous types de bâtiments confondus.

Une autre approche consiste à calculer la moyenne pondérée (en fonction de la puissance bois) sur l'échantillon et conduit sensiblement à la même amplitude de variation, cette fois par rapport à une moyenne commune à tous les projets (moyenne pondérée, contrairement à la moyenne arithmétique figurant sur la courbe précédente). On peut alors observer des écarts moyens différents selon le type de projets, entre ceux du secteur sanitaire et social, d'une part, et les autres, d'autre part, comme le montre le tableau ci-dessous.

Pbois	Coût global (EUR TTC / MWh)			**écart moyen**		
	valeur référence (moyenne pondérée)			sanitaire et social	enseignement et autres	logement social
(MW)	min	max	amplitude (+/-)			
tous	**59,0**		33%	-6%	5%	7%
projets	43,1	82,6				

Ces écarts moyens, fortement corrélés au ratio E/Pbois, reflètent en grande partie l'écart d'absorption des frais « fixes » (annuités d'investissement, part fixe des coûts d'exploitation) par une plus ou moins grande quantité d'énergie distribuée, à puissance bois constante.

2.2 Gros entretien et renouvellement (Pbois)

Grandeur étudiée : poste couvrant les provisions pour entretien et renouvellement des installations (P3), exprimé en fonction de la puissance bois.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

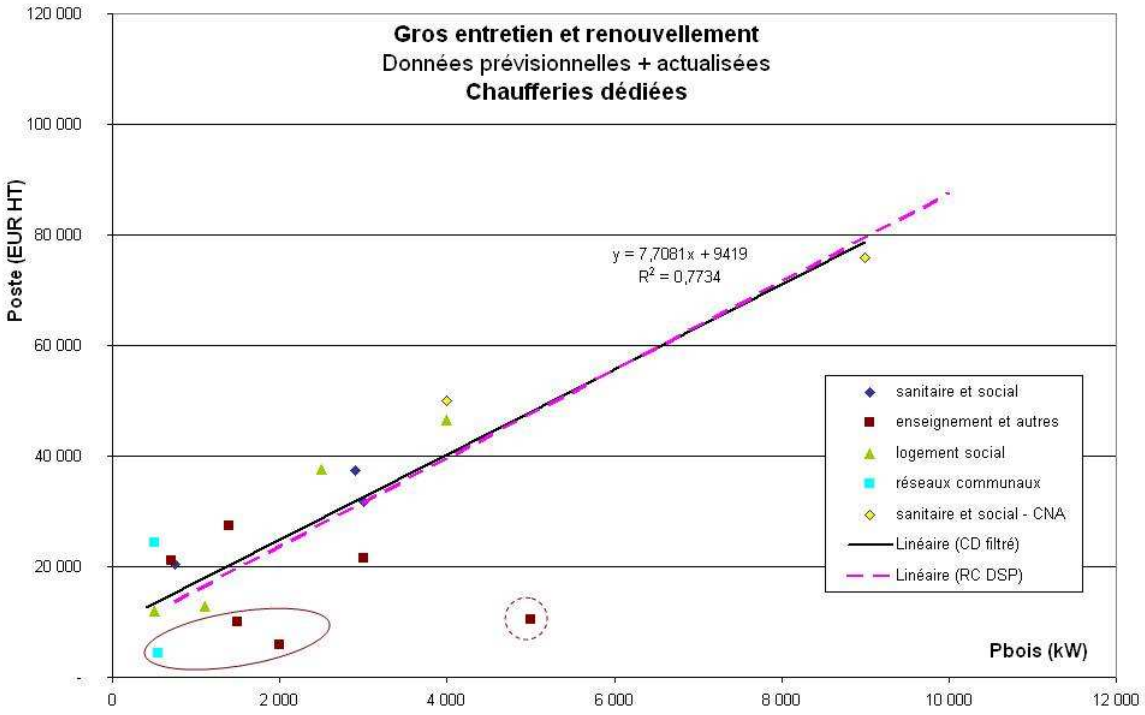
Unité : EUR HT

Mode de calcul :
- régression linéaire + valeur de référence (cas types)

Projets conservés : 16 sur 22 (72%).

Lois de variation :
- **Poste = 9 419** + 7,7 * P bois (avec R^2 = 0,77, e = 9 300)

Courbe :



L'analyse illustrée par la courbe qui précède montre :

- Une bonne linéarité des valeurs en fonction de la puissance bois, même si certains points (cerclés de brun) semblent s'éloigner, par défaut, de l'interpolation,
- Cette loi linéaire est d'autant plus remarquable que, si l'on exclut seulement 1 point, le plus atypique (pour 5MW, cerclé en pointillé), elle converge avec celle obtenue pour le poste de même nature dans le cas des réseaux de chaleur en DSP (courbe en pointillés roses),
- Par rapport à la loi constatée pour les réseaux de chaleur en DSP, l'erreur type est deux fois plus faible
- On n'observe pas d'écarts particuliers en fonction de l'usage des bâtiments desservis.

Résultat :

Pbois	Poste GER (EUR HT/an)		
référence	valeur référence (par interpolation)		
(kW)	min	max	amplitude (+/-)
1 000	**17 100**		36%
	11 000	23 200	
2 000	**24 800**		52%
	11 800	37 800	
3 000	**32 500**		34%
	21 400	43 600	

Commentaires :
Les valeurs min/max du tableau précédent sont établies en appliquant l'amplitude de la variation observée sur l'échantillon dans chaque gamme de puissance concernée (hors 1 point éloigné) à la valeur de référence calculée pour cette gamme.

Les valeurs prédites (ex : à 2MW) et l'amplitude des variations sont comparables à celles calculées pour les réseaux de chaleur en DSP, confortant la convergence des modèles sur ce poste.

2.3 Gros entretien et renouvellement (Investissement)

Grandeur étudiée : poste couvrant les provisions pour entretien et renouvellement des installations (P3), exprimé en fonction de l'investissement **total**.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

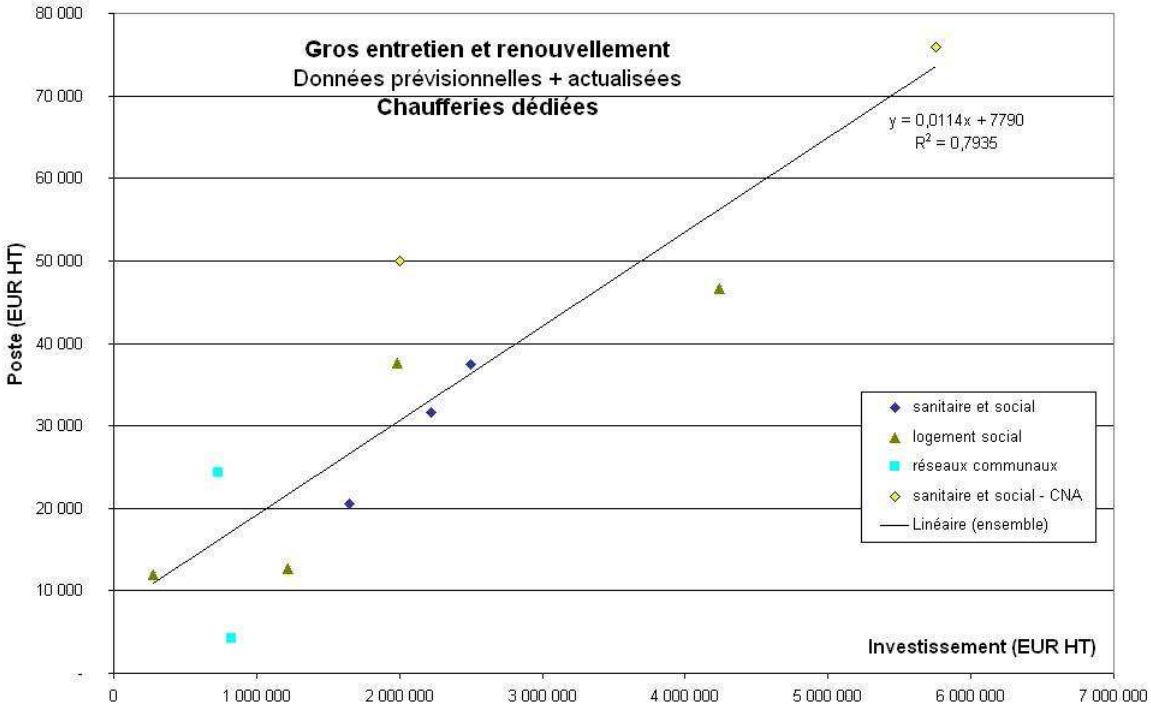
Unité : EUR HT

Mode de calcul :
- régression linéaire + valeurs de référence

Projets conservés : 11 sur 22 (50%).

Loi de variation[27] :
- **Poste = 7 790** + 0,0114 * (Inv. total) (avec R^2 = 0,79, e = 9 890)
  où :
  Inv. total = Investissement total (exprimé en EUR HT)

Courbe :



Résultat :

Investissement (M EUR)		Poste GER (EUR HT/an)			Ratio %
Total		valeur référence (par interpolation)			GER /
		min	max	amplitude (+/-)	Invest.
tous projets	1,0	**19 200**		75%	1,9%
		n/a	33 600		
	2,0	**30 600**		63%	1,5%
		11 200	50 000		
	5,0	**64 900**		17%	1,3%
		53 800	76 000		

Commentaires :

[27] Par convention, on note dans ce document « 0,00 » une valeur inférieure à 0,005 (mais non nulle)

L'échantillon est moins fourni : 50% des projets seulement ont ainsi pu être exploités. En effet, les projets préalablement écartés de l'analyse en fonction de la puissance bois (trop faible par rapport au seuil de 100 tep) le sont restés (il restait 16 projets à ce niveau). Parmi ces projets, ceux du secteur « éducation et autres » ont du être également écartés en raison de données d'investissement imprécises ou absentes.

Contrairement à l'échantillon des réseaux de chaleur, la répartition entre postes « production de chaleur » et « réseau » n'a pas pu être utilisée, du fait de la faible pertinence (et en conséquence de la fiabilité hasardeuse) de cette distinction entre postes d'investissement pour des projets de chaufferies dédiées antérieurs à la création du fonds chaleur. Toutefois, pour les projets pour lesquels cette distinction existe, on observe que pour les 2/3 d'entre eux, le poste « réseau » évolue entre 17% et 27% de l'investissement total (entre 7% et 68% sur la totalité de l'échantillon).

De ce fait, la comparaison avec la catégorie des réseaux de chaleur n'est pas immédiate. On observe néanmoins que le ratio de ce poste rapporté à l'investissement (total dans ce cas) semble plus élevé, notamment pour les premières puissances, que dans le cas des réseaux de chaleur. Etant donné la convergence observée (entre chaufferies dédiées et réseaux de chaleur) de la loi de variation en fonction de la puissance bois, cela tend à indiquer que, dans le cas des réseaux de chaleur, l'influence de la part « réseau » n'est probablement pas aussi élevée que les 40% obtenus par le calcul itératif.

En synthèse, dans le cas présent des chaufferies dédiées, il convient certainement :

- de croiser avec l'analyse du P3 en fonction de la puissance bois, puisque l'influence en principe faible de la part réseau dans l'investissement, rend plus pertinente la comparaison avec ce poste lié à la chaudière et à ses équipements périphériques,
- de corriger le ratio GER/investissement total observé, un peu fort pour les premières puissances, et de plutôt retenir une moyenne autour de 1,3% de l'investissement (entre 1,2 et 1,5%) comme référence, sur la base d'entretiens avec les professionnels.

2.4 Conduite et entretien courant (Pbois)

Grandeur étudiée : poste couvrant les charges pour entretien et conduite des installations (P2), exprimé en fonction de la puissance bois.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

Unité : EUR HT

Mode de calcul :

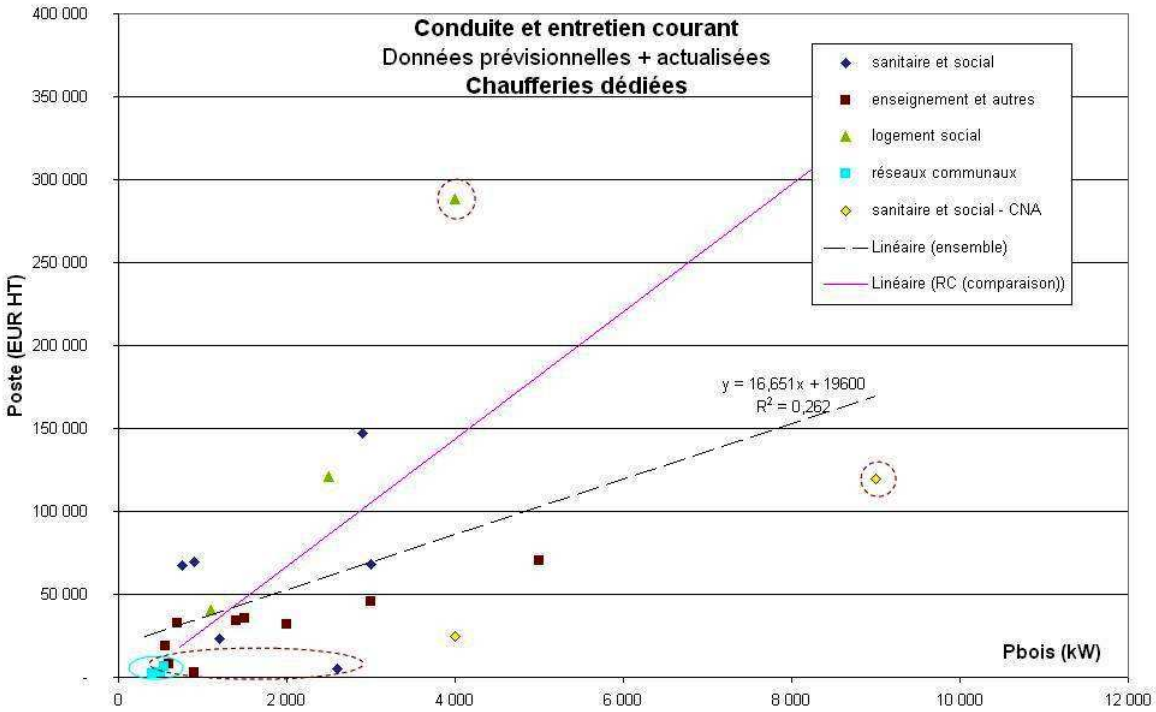
- régression linéaire

Projets conservés : 13 sur 17 (76%), par exemple.

Loi de variation :

- ***Poste =*** *36 366 + 8,95 * P bois (avec R^2 = 0,42, e = 25 467)*

Courbe :



Résultat :
Non applicable.

Commentaires :
L'interpolation présentée ci-dessus est uniquement illustrative. En effet, le modèle ne converge pas véritablement au sens où les écarts sont très importants et où le fait de retirer progressivement des valeurs fait fortement varier la loi calculée (cf. schéma ci-dessus), avec un coefficient de détermination qui reste faible.

L'analyse graphique permet tout de même de repérer quelques projets « atypiques » (cerclés de brun) qu'on préférera écarter lors d'autres analyses (ci-après en fonction de l'énergie distribuée).

Le graphique rappelle, pour permettre la comparaison, la loi de variation (interpolation) observée pour les réseaux de chaleur en DSP (laquelle était remarquablement linéaire). Si l'on compare les projets par rapport à cette courbe, en les différenciant en fonction de la destination des bâtiments, on remarque que les projets dans le secteur sanitaire et social et dans celui du logement social sont plutôt au dessus de cette courbe, alors que les bâtiments d'enseignement et les réseaux communaux se situent en dessous. Cette hiérarchie correspond aux ratios moyens E/Pbois observés, sensiblement différents selon les types de bâtiments (intermittence et durée d'utilisation des installations) alors que l'échantillon des réseaux de chaleur est plus homogène selon ce critère. Cela semble nettement confirmer que l'énergie est l'inducteur prépondérant pour ce poste, par rapport à la puissance bois.

On considérera donc que la loi de variation indiquée n'est pas significative.

2.5 Conduite et entretien courant (Energie distribuée)

Grandeur étudiée : poste couvrant les charges pour entretien et conduite des installations (P2), exprimé en fonction de l'énergie distribuée annuellement

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

Unité : EUR HT / MWh utile / an

Mode de calcul :

- régression linéaire + valeurs de référence

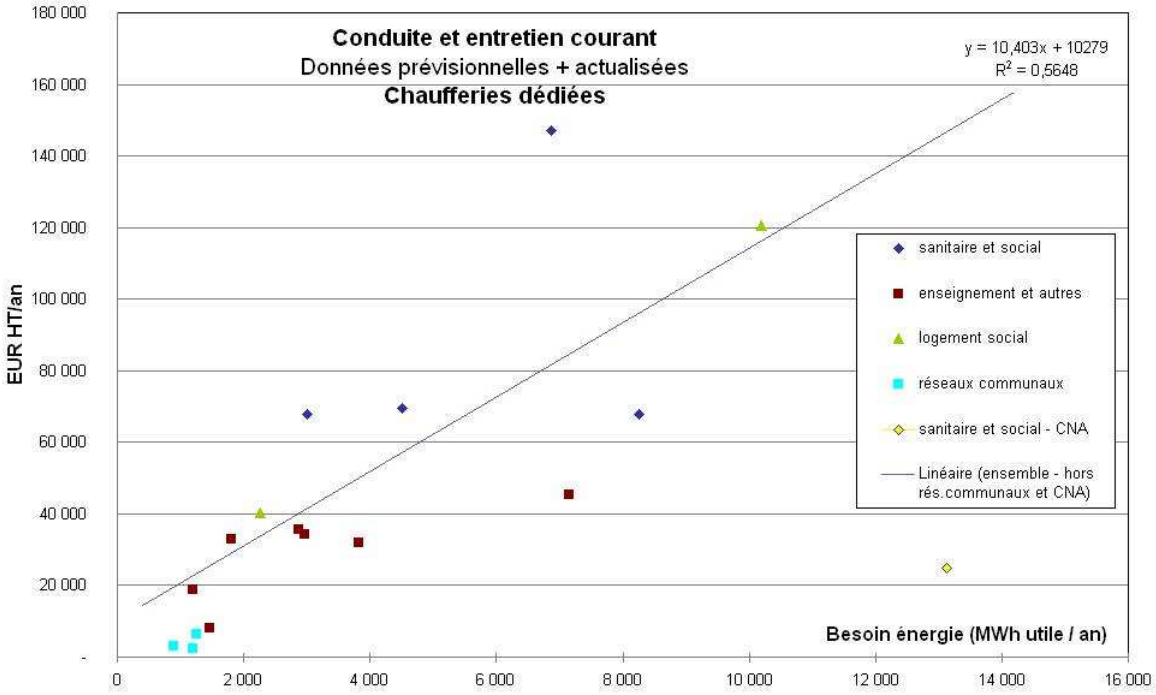
Projets conservés : 13 sur 18 (78%).

NB : réseaux communaux (3) et projets CNA (2) exclus

Loi de variation :

- **Poste =** 10 279 + 10,40 * Energie (avec R^2 = 0,56, e = 27 405)

Courbe :



Résultats :

Pbois référence (MW)	Ratio C&E / Besoin énergie (EUR HT/MWh/an) valeur référence (par interpolation) min	max	amplitude (+/-)
1,0	**14,2** 11,5	22,6	59%
2,0	**12,3** 8,3	12,4	32%
3,0	**11,8** 8,2	21,4	82%

La valeur « référence » est obtenue par calcul à partir de l'interpolation (moyenne des prévisions correspondant à l'énergie distribuée dans la plage de puissance). Les valeurs min et max portent sur les ratios calculés sur les valeurs relevées dans la gamme de puissance concernée (hors projets écartés). On en déduit l'amplitude des variations sur l'échantillon.

Commentaire :

Dans le cas des chaufferies dédiées, cette méthode fondée sur le besoin en énergie est la seule qui permet d'établir une loi de variation plausible, par opposition à l'analyse en fonction de la puissance bois. Toutefois, l'incertitude est importante, d'autant qu'il a fallu écarter nombre de projets sur un échantillon déjà limité au départ (dont les projets de réseaux communaux, trop peu consommateurs, et à l'inverse les projets CNA dans le secteur sanitaire et social).

En conséquence, même si la loi de variation obtenue se révèle très proche de celle calculée pour les réseaux de chaleur, cette « convergence » doit s'interpréter avec prudence dans la mesure où le fait d'ajouter ou d'enlever une valeur supplémentaire modifierait sensiblement le résultat.

2.6 Electricité et consommations auxiliaires

Grandeur étudiée : poste couvrant les consommations d'électricité et auxiliaires (P'1), exprimé en fonction de l'énergie distribuée annuellement.

Origine et traitement des données : Prévisionnelles, actualisées

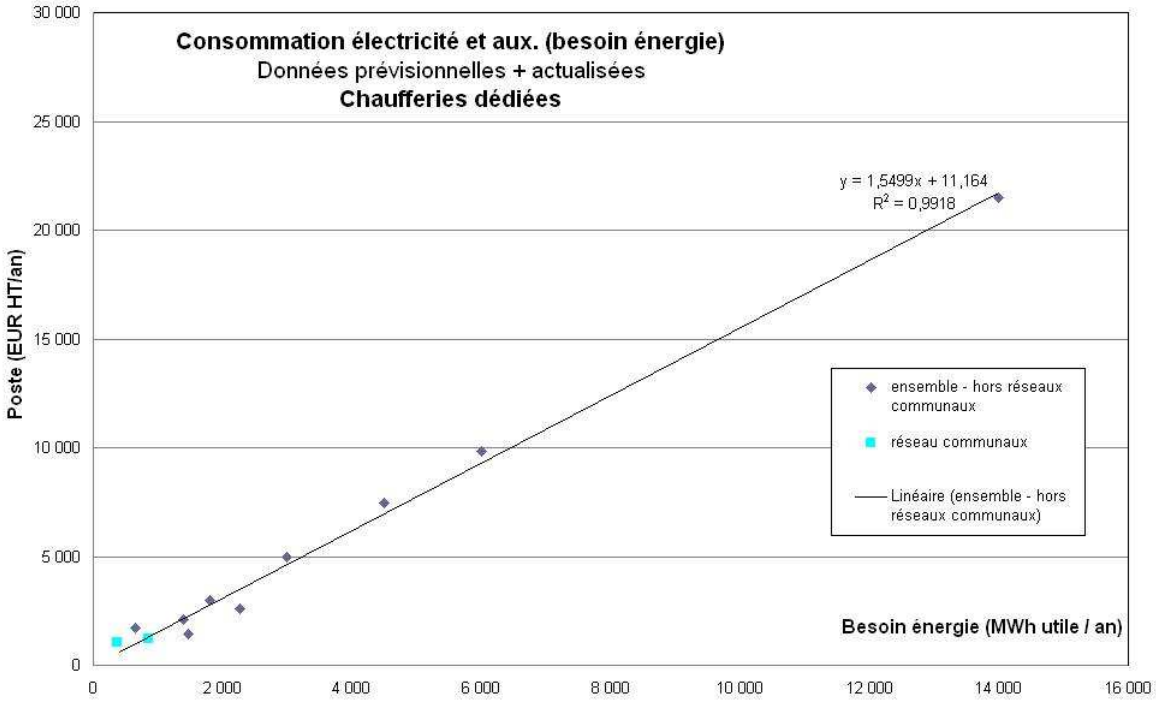
Unité : EUR HT / MWh utiles / an

Mode de calcul :
- régression linéaire

Projets conservés : 9 sur 11 (82%).

Loi de variation :
- **Poste =** 11 + **1,55** * E (avec R^2 = 0,99, e = 622)

Courbe :



Résultat :
Ratio moyen : **1,6 EUR HT / MWh** distribué.

Commentaires :
Comme pour les réseaux de chaleur, l'analyse montre une remarquable convergence vers un modèle linéaire en fonction de l'énergie distribuée, tout au long de la gamme de puissance. Cela s'explique par le lien direct entre consommation électrique pour les auxiliaires (l'essentiel du poste) et l'énergie distribuée.

Toutefois, on note que le ratio moyen se situe environ 40% en dessous de celui observé dans le cas des réseaux de chaleur. Ceci peut en partie s'interpréter comme l'énergie nécessaire aux fonctionnement des auxiliaires et équipements spécifiques liés à la distribution sur le réseau de

chaleur. Les valeurs un peu plus élevées des réseaux communaux (1,4 à 2,8 EUR HT / MWh) renforcent cette hypothèse.

Annexe II : TYPOLOGIE DES PROJETS ANALYSES

L'échantillon analysé[28] comprend 81 projets bois : 40 réseaux de chaleur (dont 5 réseaux existants[29]) et 41 chaufferies dédiées, y compris 6 réseaux communaux regroupés dans la même catégorie.

NB : en fonction de la qualité des données recueillies pour les projets, le nombre de projets effectivement utilisés peut varier d'une analyse à l'autre.

1. REPARTITION DES PROJETS PAR REGIONS

Pour les réseaux de chaleur :

Réseaux créés	27
Réseaux existant de forte puissance (substitution)	5
Dossiers CNA	8
Total réseaux analysés	***40***
Régions représentées	***17***
dont :	
Franche Comté	7
Basse-Normandie	6
Rhône-Alpes	5
Haute-Normandie	3
Auvergne	3
Autres régions	16

Pour les chaufferies dédiées (et réseaux communaux) :

Chaufferies dédiées	33
Dossiers CNA	2
Réseaux communaux	6
Total projets CD analysés	***41***
Régions représentées	***12***
dont :	
Centre	10
Bourgogne	7
Rhône-Alpes	5
Franche Comté	5
Pays de la Loire	4
Basse-Normandie	4
Autres régions	6

2. MODES DE GESTION

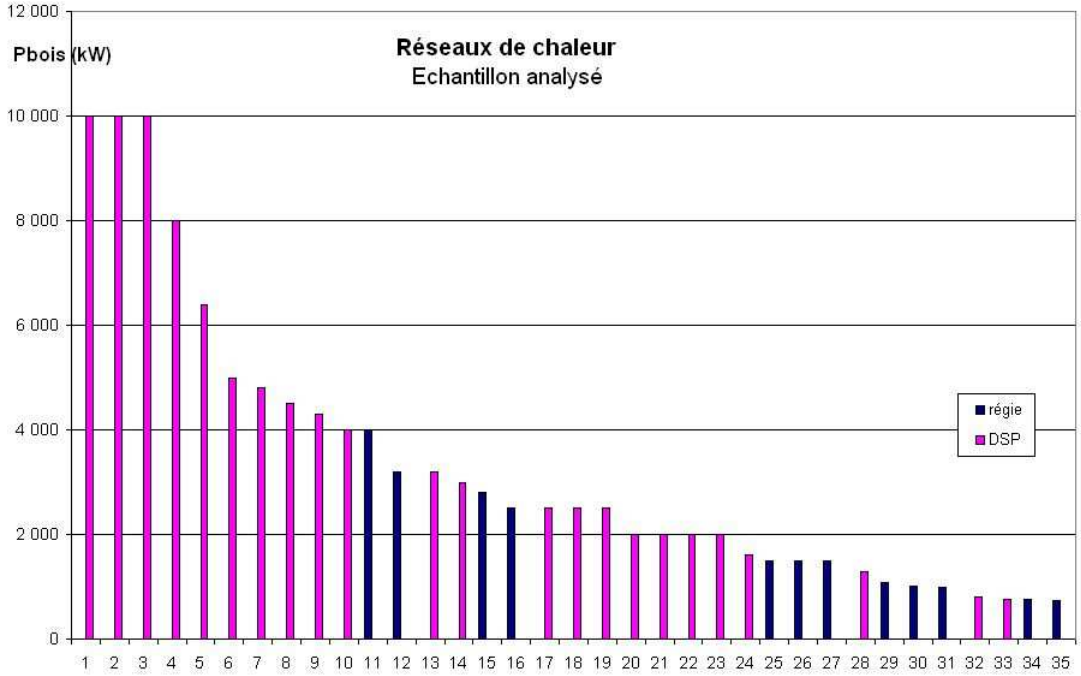
Hormis les cas de réseau de chaleur existant de forte puissance, la répartition des **réseaux de chaleur** selon le mode de gestion est la suivante :

	régies	DSP	*ensemble*
Réseaux créés	8	19	*27*
Dossiers CNA	4	4	*8*
Total réseaux (hors RCEFP)	***12***	***23***	***35***

Cette répartition vise à permettre d'évaluer l'influence éventuelle de ce critère sur les résultats. Parmi les projets en régie, la moitié environ possède un contrat d'exploitation (dit « P2 »). Pour les projets en DSP, on a pu collecter un certain nombre de projets en affermage, la majorité faisant l'objet d'une concession de service public. La taille relativement réduite de l'échantillon ne permet tout de même pas de constituer des sous-échantillons représentatifs si l'on entre trop dans le détail (ou si l'on voulait croiser différents critères) mais peut donner des indications pour l'interprétation.

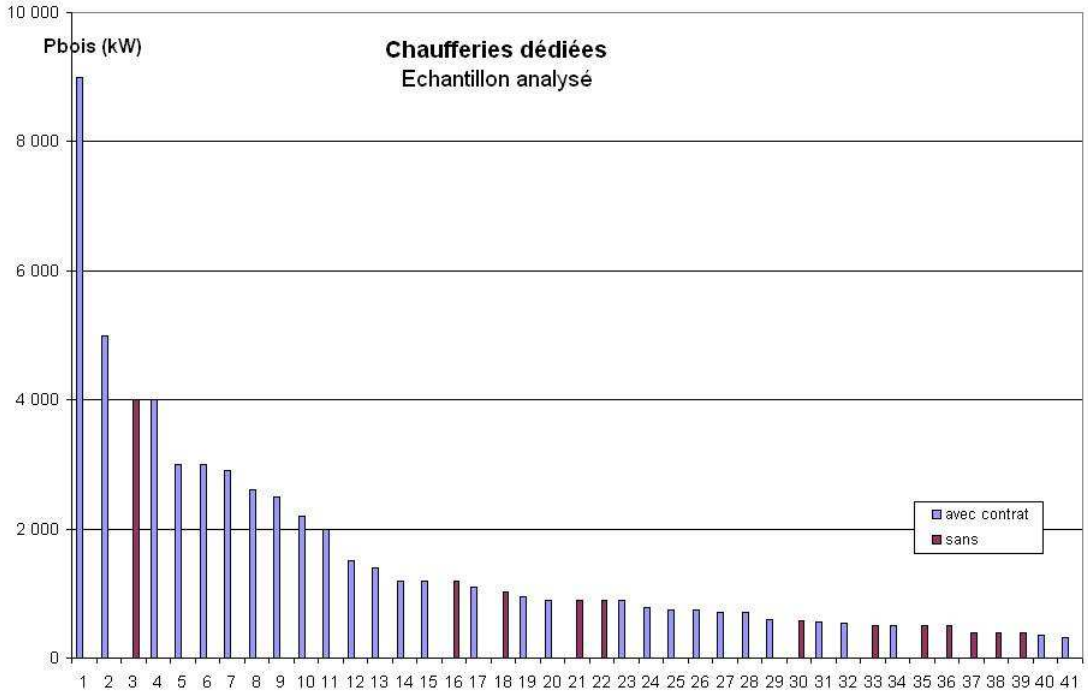
[28] Le détail qui suit respecte les conditions d'anonymat des projets (lié à collecte des données)
[29] RCEFP : réseau de chaleur existant de forte puissance

Le graphique ci-après montre la distribution des mêmes projets par puissance bois, en distinguant les 2 modes de gestion.



Pour les **chaufferies dédiées** (et réseaux communaux), la notion de mode de gestion ne s'applique pas dans les mêmes termes, dans la mesure où il ne s'agit en général pas d'un service public de distribution de chaleur (un seul client). En revanche, on peut différencier les projets pour lesquels le maître d'ouvrage à souscrit au moins un contrat d'exploitation, sans considération de durée.

Le graphique ci-après montre la distribution de ces projets par puissance bois, en faisant cette distinction.



3. CHALEUR PRODUITE (TEP)

Le fonds chaleur met en avant le concept de « tep sortie chaudière » comme critère d'entrée pour la détermination des aides. La répartition des projets de l'échantillon suivant celui-ci est la suivante.

Pour les réseaux de chaleur :

	< 200 tep	>=200 et < 1000 tep	>= 1000 tep	*ensemble*
Réseaux créés	5	12	10	*27*
Dossiers CNA	0	6	2	*8*
Total réseaux (hors RCEFP)	***5***	***18***	***12***	***35***

Les projets sur réseaux existants de forte puissance (RCEFP) de l'échantillon se situent autour de 1 000 tep voire au-delà.

Pour les chaufferies dédiées, la répartition est la suivante :

	< 100 tep	>= 100 et < 200 tep	>=200 et < 1000 tep	>= 1000 tep	*ensemble*
Chaufferies dédiées	8	9	15	1	33
Dossiers CNA	0	0	1	1	2
Total CD (hors rés. communaux)	***8***	***9***	***16***	***2***	***35***

On relève que certains projets pris dans l'échantillon se situent en dessous du seuil de 100 tep. En effet, ceux-ci ont été considérés quand même pour enrichir l'échantillon, dans la mesure où il n'y avait pas de discontinuité technologique par rapport à des projets similaires un peu plus consommateurs d'énergie. Lors de l'analyse, leur utilisation a été décidée au cas par cas en fonction de la pertinence des données considérées.

4. DATES DE REFERENCE DES PROJETS

La date de référence retenue dans les tableaux suivants est celle relative aux dossiers d'investissement. Elle précède en général de quelques mois la mise en service effective. Néanmoins, on peut observer que la plupart des projets de l'échantillon sont des projets en fonctionnement, pas trop anciens cependant, de façon à pouvoir analyser des installations relativement comparables sur le plan technologique. Les projets postérieurs à janvier 2009 sont des projets gérés par le « fonds chaleur ».

Pour les réseaux de chaleur :

Date des projets	
> janvier 2009	14
> janvier 2005	11
projets antérieurs	10
Total réseaux (hors RCEFP)	***35***

Pour les chaufferies dédiées et réseaux communaux:

Date des projets	
> janvier 2009	3
> janvier 2005	23
projets antérieurs	15
Total CD et rés. communaux	***41***

On note la proportion plus élevée de projets un peu plus anciens que dans le cas des réseaux de chaleur. Ceci s'explique par le nombre plus faible de dossiers donnant lieu à un suivi dans cette catégorie, et la nécessité de disposer soit d'informations prévisionnelles (projets avec contrats plutôt récents), soit de données obtenues par moyenne ce qui suppose un nombre de saisons de chauffe suffisant ou au moins un exercice en régime stabilisé.

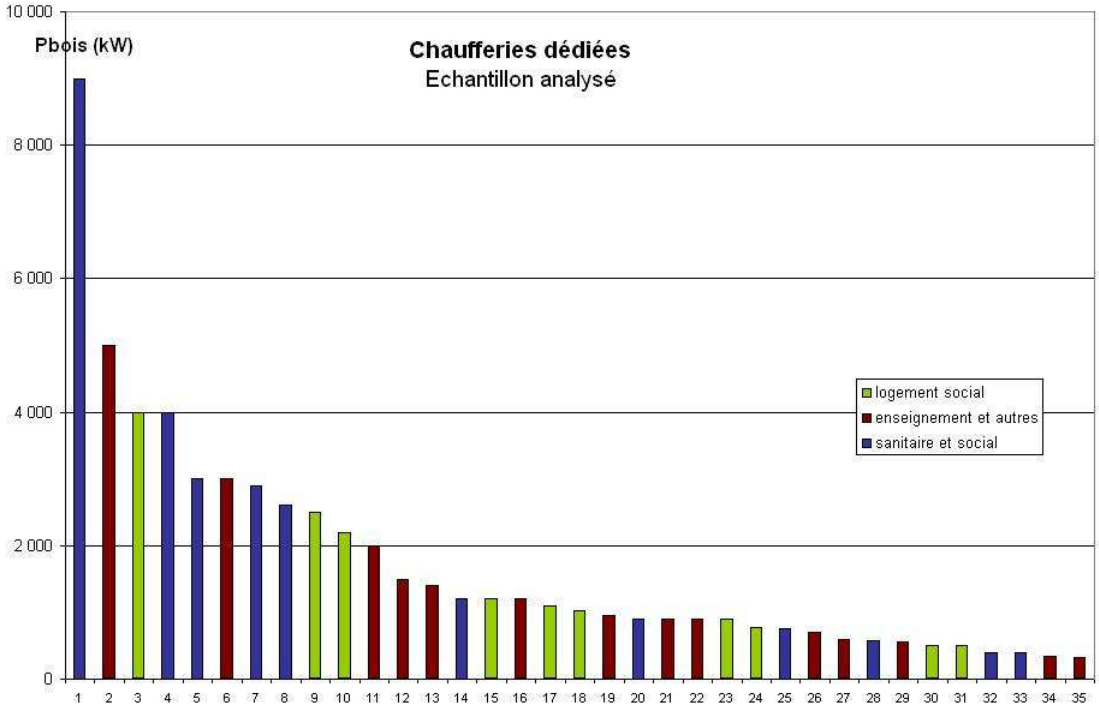
5. TYPE DE BATIMENTS / USAGE DE LA CHALEUR

Dans le cas des chaufferies dédiées, il peut être pertinent de s'intéresser au type de bâtiment raccordé, qui en général, conditionne le profil de consommation en terme de durée de

fonctionnement et d'intermittence, ce qui modifie sensiblement l'économie des projets. Trois catégories ont été définies pour cette étude:

- Sanitaire et social : centres hospitaliers, cliniques, maisons de retraite…
- Enseignements et autres bâtiments tertiaires : lycées, collèges, équipements sportifs, centres techniques, centres de formation, musées…
- Logement social : OPAC/HLM, bailleurs privés.

Le graphique ci-après montre la distribution de ces projets par puissance bois, en faisant cette distinction.



Annexe III : GLOSSAIRE

AMO : Assistance à Maîtrise d'ouvrage (cabinets spécialisés).

APD : Avant-Projet Détaillé. Fait référence à une phase du déroulement des projets publics.

BET : Bureau d'Etudes Techniques.

BT (INDEX BT) : Les index nationaux « Bâtiment » sont utilisés pour les actualisations et les révisions de prix et sont calculés à partir de formules pré-établies, intégrant les coûts de facteurs de production selon une structure pré-établie représentative du type de prestation, en concertation avec la Fédération Française du Bâtiment (F.F.B.). Ils sont publiés au Journal Officiel.

CD : Chaufferie dédiée. Il s'agit d'une installation dédiée qui alimente un bâtiment ou un groupe de bâtiments appartenant au même maître d'ouvrage (ex : site d'un hôpital, collège et ses annexes, ensemble de logements HLM du même bailleur social…). Une « chaufferie dédiée » peut posséder un réseau de distribution primaire (canalisations enterrées), mais en général celui-ci est techniquement plus simple ; on parle alors de « réseau technique ». Dans le cadre de cette étude, on a distingué les « réseaux communaux » alimentant un ensemble de bâtiments appartenant au patrimoine d'une collectivité (ex : mairie, écoles, logements, salle communale, bibliothèque, équipements de sports…) ; d'un point de vue juridique, ces réseaux appartiennent à la catégorie des chaufferies dédiées.

CIBE : Comité Interprofessionnel du Bois Energie. Cette association interprofessionnelle a pour champ d'intervention le chauffage collectif et industriel au bois (et aux autres biomasses lignocellulosiques), y compris la production combinée de chaleur et d'électricité, dans l'habitat et le tertiaire, les réseaux de chaleur et les entreprises industrielles. Le CIBE réunit et coordonne les réflexions des acteurs pour professionnaliser les pratiques « de la pépinière à la cendre » en s'appuyant sur le travail de commissions thématiques.

Densité thermique linéaire : ratio utilisé pour évaluer les réseaux de distribution, obtenu comme le rapport entre l'énergie utile distribuée annuellement (en MWh utiles / an) sur le réseau et la longueur du réseau (longueur aller des canalisations, en m).

DSP : délégation de service public. Un des modes de gestion qui peut s'appliquer au cas de la mise en place d'un réseau de chaleur au sens juridique.

EnR : Energie(s) renouvelable(s)

Fonds Chaleur : engagement du Grenelle Environnement, le Fonds Chaleur a pour objectif de développer la production de chaleur à partir des énergies renouvelables (biomasse, géothermie, solaire thermique …). Il est destiné à l'habitat collectif, aux collectivités et à toutes les entreprises (agriculture, industrie, tertiaire). Créé fin 2008, ce fonds est géré par l'ADEME. Son principe est de participer au financement des projets de production de chaleur renouvelable, tout en garantissant un prix inférieur à celui de la chaleur produite à partir d'énergies « conventionnelles ». Plus d'information sur le site de l'ADEME :
http://www.ademe.fr/fondschaleur/

MES : mise en service.

MO : maîtrise d'ouvrage.

MOE : maîtrise d'œuvre.

Loi MOP : Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 modifiée relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.

P1 : Rémunération de la fourniture d'énergie. Ce poste couvre le coût du combustible (cas des

chaufferies dédiées) lorsque le contrat d'exploitation comprend l'approvisionnement. Par extension (abus de langage), ce terme est parfois utilisé pour désigner le coût du combustible (EnR et appoint) quelque soit le type de projet, et son mode de gestion.

P'1 : Coût de l'électricité utilisée mécaniquement pour assurer le fonctionnement de l'installation (circuits chaufferie et primaire, équipements, alimentation …) et consommations auxiliaires associées.

P2 : Coûts de conduite et d'entretien courant des installations (personnel, petites fournitures, prestations) dans le cas des chaufferies dédiées. Par extension (abus de langage), ce terme est parfois utilisé pour désigner les coûts de même nature quelque soit le type de projet, et son mode de gestion.

P3 : Coût de gros entretien et de renouvellement éventuel des matériels existants (ou « GER ») dans le cas des chaufferies dédiées. Ce poste optionnel ne peut être contracté que jumelé à un P2 (même exploitant, même durée). Par extension (abus de langage), ce terme est parfois utilisé pour désigner les coûts de même nature quelque soit le type de projet, et son mode de gestion.

Pbois : Puissance bois de l'installation. Le cas général des chaufferies bois est un fonctionnement en bi-énergie, dans une optique d'optimum technico-économique. La chaudière bois est complétée par une/des chaudières d'appoint/secours « conventionnelles » (fossiles) qui fonctionnent en écrêtement les jours de grand froid et peuvent prendre le relai en demi-saison si le besoin est insuffisant pour justifier le fonctionnement de la chaudière bois. La chaudière bois est typiquement dimensionnée à hauteur de 50 à 60 % de l'appel de puissance maximum, ce qui permet d'atteindre un taux de couverture des besoins par le bois compris entre 80 et 90 %.

R1 : Rémunération couvrant le coût variable de l'énergie (cas des réseaux de chaleur). Le R1 est proportionnel à l'énergie calorifique consommée par l'usager (en MWh utiles) et est établi en fonction des coûts d'achats de combustible.

R2 : Part fixe (abonnement) du prix de la chaleur, dans le cas des réseaux de chaleur. Le R2 intègre l'amortissement des investissements ainsi que leur entretien. Il se décompose généralement en sous-postes :

- r21 : électricité
- r22 : exploitation
- r23 : provision pour le renouvellement
- r24 : financement de l'installation (après subventions).

R^2 (parfois aussi désigné abusivement par R2) **: Coefficient de détermination.** Le calcul de régression linéaire permet de déterminer la loi approchée minimisant l'erreur résiduelle moyenne (méthode des « moindres carrés ») par rapport aux valeurs observées constituant un échantillon (une « série » de données). Le coefficient de détermination permet de quantifier la valeur globale de l'estimation fournie par la loi calculée. Ce coefficient varie entre 0 et 1 ; plus R^2 s'approche de la valeur 1 et plus le modèle est intéressant, c'est-à-dire, qu'il offre une capacité à prédire les valeurs de la grandeur observée, même si cela ne signifie pas pour autant que la relation mise en évidence soit une relation de cause à effet ; on a simplement affaire à une corrélation dans un contexte donné.

RC : Réseau de chaleur. Dans le cadre de cette étude[30], on entend par « réseaux de chaleur » les projets dans lesquels plusieurs bâtiments appartenant à des maîtres d'ouvrage différents sont desservis par un réseau primaire (canalisations enterrées de distribution et sous-stations) alimenté par une chaufferie mixte bois/appoint. D'un point de vue juridique, les projets analysés correspondent à la mise en place d'un service public local de distribution d'énergie calorifique, dont l'organisation incombe à la collectivité (autorité organisatrice). Ce service public peut être géré suivant plusieurs modes de gestion alternatifs : en régie, ou en DSP (concession ou affermage).

[30] En réalité, on rencontre plusieurs définitions possibles au « réseaux de chaleur », mais ce n'est pas l'objet de l'étude

RCE : Réseau de chaleur existant. Il s'agit du cas des réseaux de chaleur, en général en milieu urbain, pour lesquels le projet bois consiste à réaliser une « substitution ». La chaudière bois vient alors remplacer une autre chaudière (bois plus ancienne, charbon, UIOM, fioul…) dans une unité existante de production de chaleur, au prix d'une restructuration plus ou moins importante de la chaufferie, voire la création d'une nouvelle chaufferie. Le réseau primaire n'est pas nécessairement impacté, sauf si une opération d'extension est réalisée en même temps.

Réseau communal : Ce terme désigne dans cette étude un réseau, monté par une collectivité pour alimenter un ensemble de bâtiments appartenant à son patrimoine (ex : mairie, écoles, logements, salle communale, bibliothèque, équipements de sports…). D'un point de vue juridique, ces réseaux appartiennent à la catégorie des chaufferies dédiées, tant qu'il n'y a pas mise en œuvre de la compétence du service public local (facultatif) de distribution de chaleur, en pratique lié à la vente à un tiers.

E/P (bois) : Dans le cadre de cette étude, ce ratio s'intéresse à la **capacité bois** de l'installation. Il est défini comme le rapport entre l'énergie totale utile distribuée annuellement (en MWh utiles/an), y compris par les systèmes d'appoint secours, et la puissance bois de la chaufferie (en kW). Le résultat est homogène à des milliers d'heures (kh) de fonctionnement. Du fait de sa définition, ce ratio n'est pas pertinent pour les grands réseaux de type RCE pour lesquels la part bois de l'énergie produite annuellement (couverture bois) n'atteint pas 75% au moins. NB : cet indicateur n'est pas le taux de charge technique, mais le potentiel maximum théorique d'utilisation de la chaudière bois.

tep (tonne équivalent pétrole[31]) : unité d'énergie communément utilisée d'un point de vue macro-économique, notamment pour faire des comparaisons entre sources d'énergie. Elle correspond au pouvoir calorifique primaire d'une tonne de pétrole (moyenne conventionnelle). Dans le cadre du fonds chaleur et de cette étude, cette unité est utilisée pour exprimer la quantité de chaleur renouvelable produite annuellement par la chaufferie biomasse (hors appoint/secours fossile) mesurée en sortie chaudière. Du point de vue des thermiciens, cette grandeur est habituellement exprimée au niveau des projets en MWh. L'équivalence est de : 1 tep/an = 1 162 MWh/an.

TP (INDEX TP) : Les index nationaux « Travaux Publics » sont utilisés pour les actualisations et les révisions de prix et sont calculés à partir de formules pré-établies, intégrant les coûts de facteurs de production selon une structure pré-établie représentative du type de prestation, en concertation avec la Fédération Française du Bâtiment (F.F.B.). Ils sont publiés au Journal Officiel.

TTC : toutes taxes comprises, en référence au coût global de la chaleur.

[31] « toe » dans les publications internationales

Annexe IV : **BIBLIOGRAPHIE**

A. « Guide de rédaction des clauses techniques des marchés publics d'exploitation de chauffage avec ou sans gros entretien des matériels et avec obligation de résultat » (2007). Observatoire économique de l'achat public, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie

B. LEFRANCOIS, G ; SERVANT, JM et al. (2009) ; « Chaufferies collectives et réseaux de chaleur au bois : Sensibilité de la rentabilité d'un projet aux paramètres technico-économiques ». CIBE (travaux de la commission « montage de projets »)

C. PENNEQUIN, J. ; COUSIN, S. ; LEFRANCOIS, G. ; CLAVE MF. et al. (2010); « Les 1000 mots du Bois-Energie ». Biomasse Normandie

D. POUET, JC. et al. (2007) ; « Mise en place d'une chaufferie au bois : Etude et installation d'une unité à alimentation automatique ». ADEME (EDP Sciences)

E. SERVANT, JM. (2009); « Evolution des couts d'investissements relatifs aux installations collectives bois- énergie (2000-2006) – rapport final ». Perdurance pour ADEME

F. « Chaufferies collectives au bois : approches économiques et financières », Le Cahier du Bois Energie n°41 (avril 2009). Le bois International (le Cahier du Bois Energie est co-édité par Biomasse Normandie et le CIBE)

G. (mai 2010) ; « Enquête sur le prix des combustibles bois en 2008 et 2009 (4ème enquête) – synthèse ». BASIC pour ADEME