

PERSPECTIVES D'USAGE DES GRANULES DE BOIS COMME COMBUSTIBLE DANS LES SECTEURS COLLECTIF, TERTIAIRE ET INDUSTRIEL

Rapport final

Juin 2011

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME, du Syndicat National des Producteurs de Granulés et de la DRAAF Pays de Loire par le CIBE

Rédacteurs : Guillaume Lefrançois (BIOMASSE NORMANDIE)
Jean-Michel Servant (PERDURANCE)
Pierre Schneider (ENERGICO)

(Convention n° 1001C0173)



Coordination technique : "Sylvain BORDEBEURE",

Département Bioressources - Direction des Energies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés
Énergétiques - ADEME (Angers)

CIBE

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, du Développement et de l'Aménagement durable, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre 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

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 le 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.

ADEME

SOMMAIRE

PARTIE 1 : SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE	3
PARTIE 2 : RESULTATS DE L'ÉTUDE	13
1. Le contexte de l'étude.....	15
1.1 Les atouts des granulés de bois	15
1.1.1 Les aspects techniques	15
1.1.2 Les aspects environnementaux	16
1.1.3 Les aspects économiques	16
1.2 Les objectifs de l'étude	19
1.3 La méthodologie et les outils développés.....	20
1.3.1 La constitution des cas-types.....	20
1.3.2 Les outils de simulation et les cas de figure étudiés.....	22
1.4 Avertissements et précisions	23
2. Une chaufferie dédiée de moyenne puissance (80 à 500 kW)	26
2.1 Un raisonnement en coût global	26
2.2 L'influence de la variation de paramètres techniques et économiques sur le coût global de la chaleur.....	28
2.3 Le point de vue du maître d'ouvrage : la solution la moins coûteuse à taux d'aide publique fixé	31
2.4 Le point de vue de l'organisme financeur : le niveau d'aide nécessaire pour atteindre 5 % d'économie en coût global face à une énergie de référence fossile	34
2.5 Synthèse.....	36
3. Les autres cas de figure étudiés	37
3.1 Une chaufferie aux granulés sur un réseau de chaleur	37
3.1.1 L'usage des granulés pour un réseau de chaleur de moyenne puissance	37
3.1.2 L'usage des granulés dans le cadre de la montée en puissance des besoins d'un réseau de chaleur : l'exemple d'une ZAC de logements neufs.....	41
3.1.3 Synthèse.....	45
3.2 Le choix entre une chaufferie dédiée aux granulés ou le raccordement à un réseau de chaleur aux plaquettes existant	46
3.2.1 Le point de vue du maître d'ouvrage.....	46
3.2.2 Le point de vue de l'organisme financeur.....	48
3.2.3 Synthèse.....	49
3.3 Un cas industriel	50
3.3.1 La « rentabilité » des projets en milieu industriel.....	50

CIBE

3.3.2	L'usage des granulés en milieu industriel.....	50
3.3.3	Synthèse.....	51
4.	Conclusions	52
PARTIE 3 : Annexes		53
1.	Les cas référents	54
2.	La méthodologie et les hypothèses retenues	57
	Le chauffage collectif au gaz naturel	57
	Le chauffage collectif aux plaquettes.....	57
	Le chauffage collectif aux granulés.....	57
	Les hypothèses retenues	58
	Les hypothèses techniques.....	58
	Les investissements des chaufferies dédiées	59
	Les coûts d'exploitation des chaufferies dédiées	60
3.	Glossaire	61
4.	Cahier des charges de l'étude	67

CIBE

Le présent document correspond au rapport final relatif à l'étude sur les perspectives d'usage des granulés de bois comme combustible dans les secteurs collectif, tertiaire et industriel. Cette étude a été réalisée par le CIBE pour le compte de l'ADEME, du Syndicat National des Producteurs de Granulés et de la DRAAF des Pays de la Loire.

Il est structuré en trois parties principales, qui traitent respectivement :

- d'une synthèse des principaux résultats de l'étude ;
- des résultats de l'étude présentés de manière exhaustive ;
- des annexes (détail des cas référents, présentation de la méthodologie et des hypothèses, glossaire, cahier des charges de l'étude).

Les mots soulignés dans le texte sont définis dans le glossaire situé en annexes.

Remerciements :

Commission Montage de Projets du CIBE

Xavier Kleitz, (stagiaire PERDURANCE)

David Trocherie (VIESSMAN – KOB)

Marc Rat (WEISS France)

PARTIE 1 : SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE

Le contexte et les objectifs de l'étude

Les granulés proviennent du compactage de co-produits de l'industrie du bois. Leur fabrication nécessite généralement un séchage, puis la compression mécanique des sciures ou d'autres broyats de bois au sein d'unités de granulation, sans adjonction de colle ou d'agglomérant chimique. Ils se présentent sous la forme de cylindres de 6 à 8 mm de diamètre et de 15 à 20 mm de longueur. La production française de granulés de bois a été multipliée par 9 ces 5 dernières années et a atteint 435 000 tonnes en 2010. Le produit, le plus souvent de qualité certifiée, est désormais disponible sur tout le territoire.

Par rapport aux autres combustibles biomasse (plaquettes de différentes provenances), les granulés de bois présentent les atouts suivants :

- une **densité et un pouvoir calorifique élevés**, qui permettent de réduire fortement l'emprise des installations à puissance thermique installée et autonomie de fonctionnement équivalentes ;
- une **grande fluidité**, qui autorise la mise en œuvre de systèmes d'alimentation automatique plus simples et une plus grande flexibilité d'usage (régulation, taux de charge) ;
- une plus **grande homogénéité** de la qualité du combustible ;
- un **intérêt marqué** lié aux éléments suivants : moins de cendres, émissions de poussières à priori mieux maîtrisées, meilleur rendement, taux de couverture des besoins par le bois plus important... ;
- **des coûts d'investissement et d'exploitation réduits**, grâce à la compacité des équipements, à la densité énergétique des granulés et à la simplicité du matériel.

Malgré ces atouts, le chauffage aux granulés reste insuffisamment connu des financeurs, décideurs et bureaux d'études et il est donc encore rarement préconisé pour les usages collectifs.

L'objectif de cette étude est de clarifier les conditions économiques de montage des projets de chauffage collectif aux granulés, afin notamment de **définir des cibles potentielles les plus adaptées** à cette technologie et d'analyser le **point de vue de l'organisme financeur**, attributaire des aides publiques à l'investissement.

Les granulés : un combustible manufacturé dense, fluide et homogène. A gauche : unité de granulation de l'entreprise Aswood, Bouleville (27)



La simplicité et l'emprise des chaufferies. A gauche, chaufferie plaquettes de l'IME Espoir à Bayeux (14), à droite, chaufferie granulés de Ronfeugerai (61)

Le chauffage collectif aux granulés

En France, l'usage principal des granulés est actuellement domestique. Ce n'est pas systématiquement le cas ailleurs en Europe, où les acteurs de la filière ont notamment pu développer un produit adapté aux besoins du chauffage collectif et industriel.

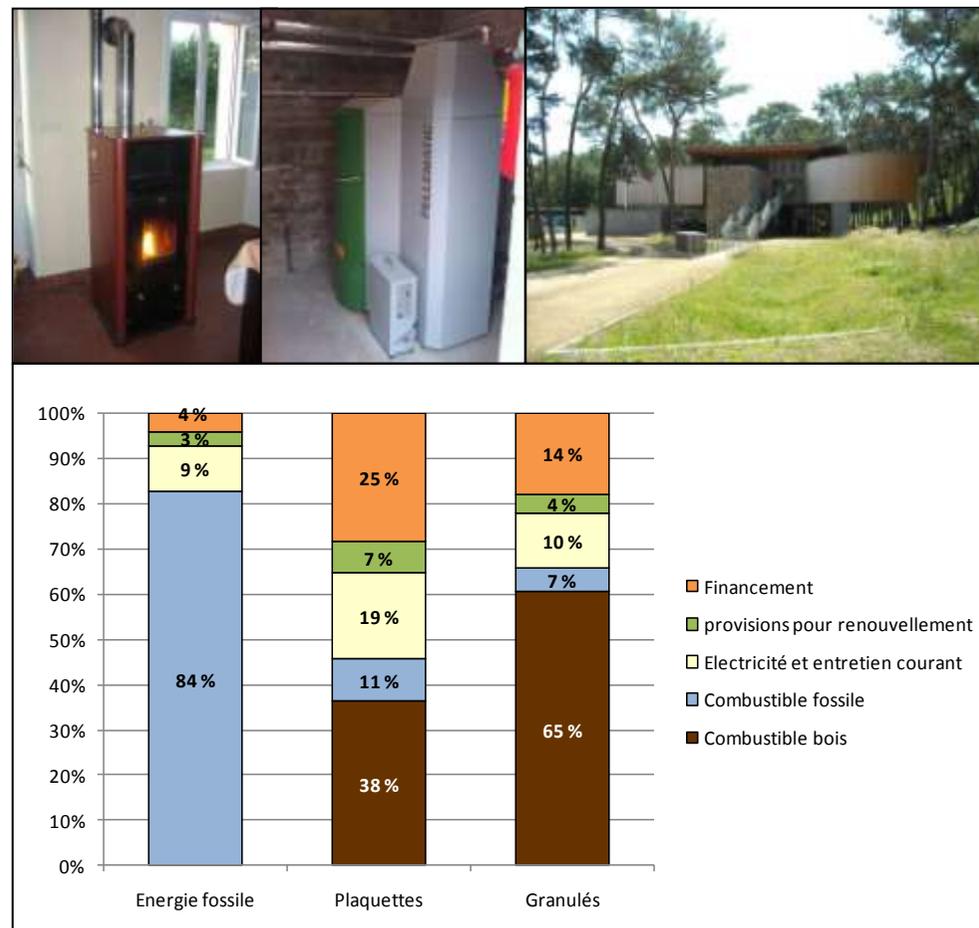
Les simulations conduites dans le cadre de cette étude visent à identifier les types d'installations à cibler en priorité pour le chauffage collectif aux granulés. Elles se fondent sur **l'analyse du coût global de l'énergie**, qui intègre l'ensemble des charges annuelles de fonctionnement (combustible, maintenance) et d'amortissement des investissements.

Le coût global de l'énergie d'une installation au **gaz naturel ou au fioul domestique** est très majoritairement constitué **d'achats de combustible fossile** (85 à 90 %). En conséquence, c'est la variation du cours du baril qui est le paramètre le plus influent dans l'évolution de la facture énergétique.

Celui d'une **installation aux plaquettes** est plus équitablement réparti entre les charges de combustible (50 %), les frais de maintenance (25 %) et l'amortissement des investissements (25 %). Le coût global d'une installation aux plaquettes est très dépendant de la **quantité d'énergie consommée** (rigueur climatique, taille et intermittence d'usage des bâtiments chauffés à puissance appelée identique).

La structure du coût global d'une **installation aux granulés** est intermédiaire entre les deux cas de figure précédents : les charges de combustible représentent environ 70 % du coût global, les 30 % restant étant répartis entre les frais de maintenance et l'amortissement des investissements. Le coût global d'une installation aux granulés est donc moins sensible aux quantités d'énergie consommées. **Le coût des granulés** est le paramètre qui présente la plus grande influence sur son évolution.

A gauche : poêle à granulés pour usage domestique, au centre : chaudière aux granulés de 35 kW, à droite : Maison des forêts à Saint-Etienne-du-Rouvray (76), chauffée par une chaufferie granulés



Structures comparées de la facture énergétique en coût global d'une chaufferie collective énergie fossile, plaquettes, granulés

Solution technique la plus avantageuse en coût global à taux d'aide publique fixé (50 %, cas théorique, non systématique), face au gaz naturel (haut) et face au fioul domestique (bas), cours moyen 2009-2010

Les cibles de développement du chauffage collectif aux granulés : les chaufferies dédiées

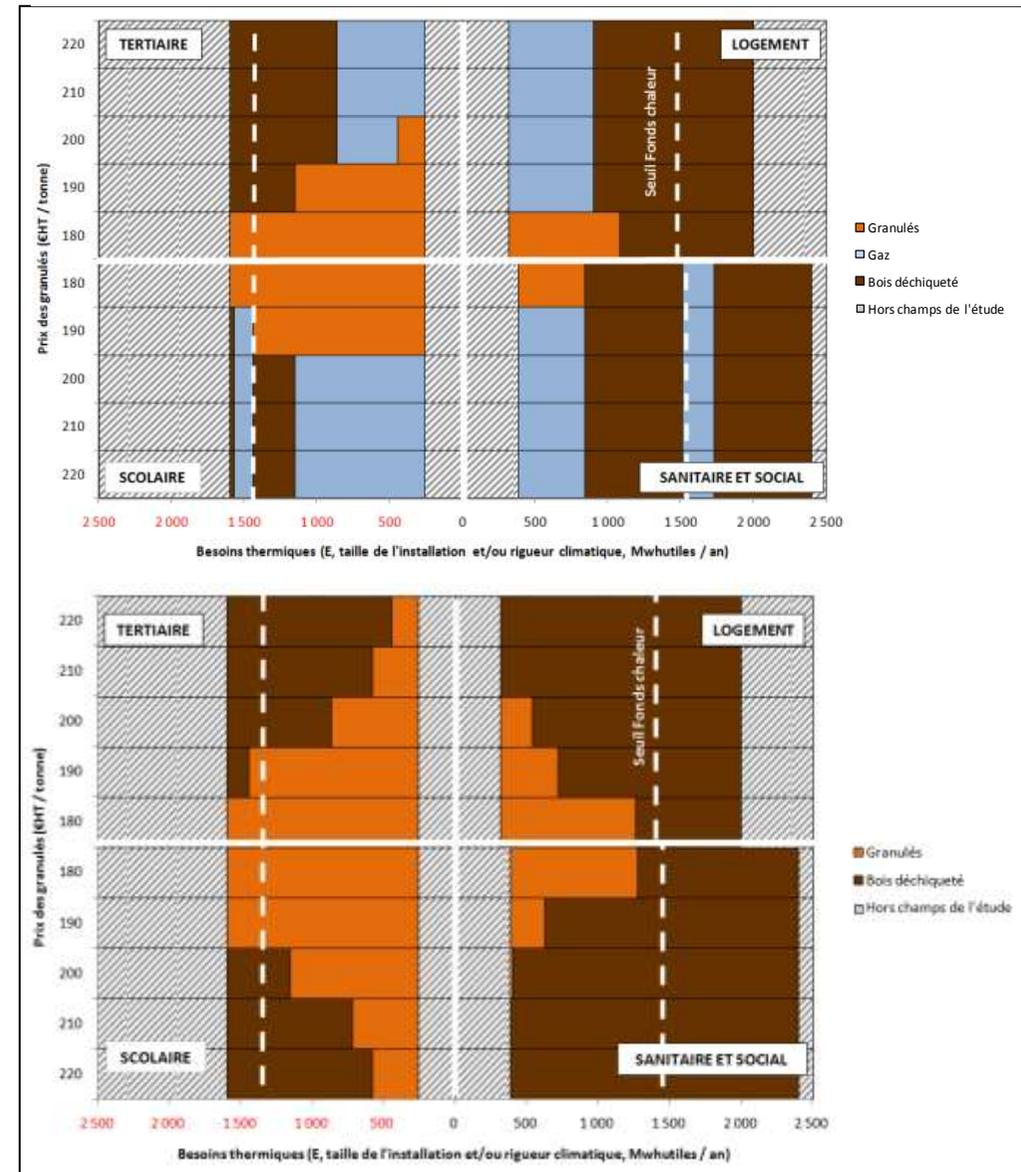
Les simulations, conduites dans une gamme de puissance comprise entre 80 et 500 kW, font intervenir les paramètres variables dont l'influence sur le coût global de l'énergie est prédominante. Il s'agit du **prix des énergies fossiles**, de **celui des granulés**, des **quantités d'énergies consommées** et de **l'intermittence d'usage des bâtiments** (moyenne : logements collectifs, élevée : secteur sanitaire et social, faible : établissements scolaires ou secteur tertiaire).

Les résultats des simulations sont synthétisés dans les graphiques ci-contre, sur lesquels est représentée, en couleur, **la solution technique la moins coûteuse pour l'utilisateur final à taux d'aide publique fixé**, pour une quantité d'énergie produite variant entre 0 et 2 500 MWh utiles/an (axe horizontal) et un prix des granulés variant dans le cadre de l'étude entre 180 et 220 € HT/tonne (axe vertical). Les graphiques sont décomposés en quatre quarts correspondant à des types d'usage différents et qui peuvent se lire indépendamment.

Il apparaît que :

- face à un cours des énergies fossiles bas (gaz naturel, graphique du haut), les granulés, comme les plaquettes, ne peuvent être concurrentiels que pour des coûts de combustibles très bas. Face à un cours des énergies fossiles élevé (fioul, graphique du bas), les zones de pertinence des granulés et des plaquettes sont plus étendues. **L'intérêt économique des granulés est donc, au même titre que celui des plaquettes, très dépendant du cours des énergies fossiles ;**
- la zone de pertinence du chauffage aux granulés se concentre sur des **établissements de taille modeste** (centre des graphiques) présentant de **fortes intermittences d'occupation** (secteurs scolaire et tertiaire).

Il convient donc **d'encourager les maîtres d'ouvrage de bâtiments des secteurs scolaire** (écoles, collèges, voire lycées) **et tertiaire** (bureaux, gymnases, administrations...) qui envisagent de chauffer leur patrimoine à partir de biomasse à **étudier systématiquement la pertinence du chauffage collectif aux granulés**, à moins que le bâtiment à chauffer ne se trouve à proximité immédiate d'un réseau de chaleur aux plaquettes existant.



Les cibles de développement du chauffage collectif aux granulés : les réseaux de chaleur

On parle de réseau de chaleur lorsqu'une chaufferie centrale alimente, par l'intermédiaire de canalisations enterrées et de points de livraison avec comptage, **plusieurs bâtiments appartenant à des maîtres d'ouvrage différents.**

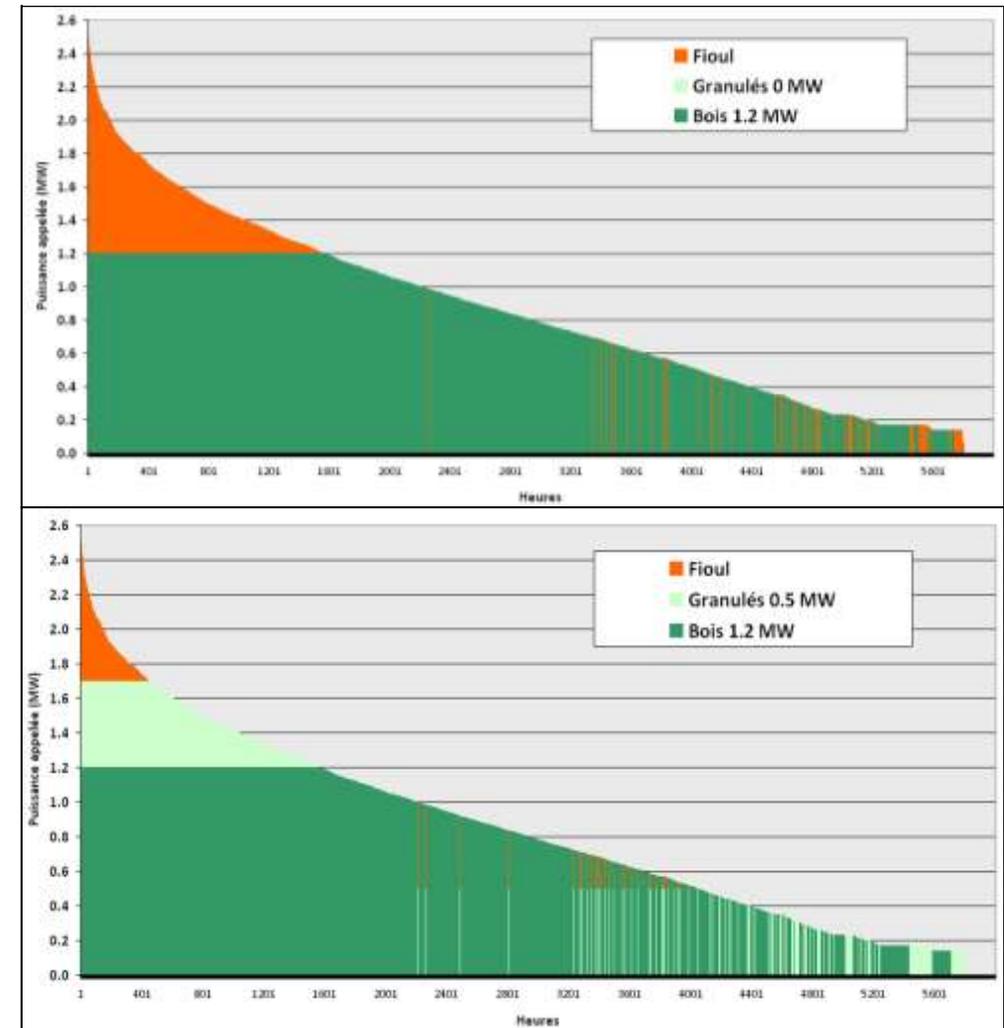
En France, la création d'un réseau de chaleur au bois s'envisage à ce jour le plus souvent par la mise en œuvre d'une chaudière aux plaquettes, fournissant la base des besoins du réseau associée à une ou plusieurs chaudières conventionnelles (gaz et/ou fioul) assurant l'appoint et le secours. L'usage des granulés n'est à ce jour insuffisamment pris en considération.

Pourtant, les simulations conduites dans le cadre de cette étude montrent que si l'usage des granulés, pour assurer la base des besoins du réseau, n'est pas économiquement compétitif face aux plaquettes (aux conditions économiques considérées dans cette étude), **l'installation d'une chaudière aux granulés pour assurer l'appoint des plaquettes** (le secours restant assuré par une chaudière conventionnelle) **présente de nombreux atouts :**

- Le **coût global de la chaleur** est du même ordre de grandeur que celui d'une installation plaquettes/énergie fossile ;
- L'**intérêt environnemental** d'une telle solution est accentué, puisqu'elle permet de substituer plus d'énergie fossile (taux de couverture des besoins par le bois supérieur à 90 %) ;
- L'**efficacité environnementale** de l'aide publique est plus pertinente.

La création d'un réseau de chaleur alimenté par une chaufferie centrale plaquettes/granulés est par ailleurs une solution particulièrement satisfaisante au plan technique **en cas d'évolution programmée des besoins du réseau à la hausse sur plusieurs années** (cas de la création d'une ZAC par exemple). Elle permet en effet de limiter le risque dû à un fonctionnement en sous régime de la chaudière aux plaquettes lors des premières années d'exercice ou en cas de retard de livraison des constructions programmées.

*Courbe des appels de puissance d'un réseau de chaleur de moyenne puissance. En haut : solution plaquettes/énergie fossile
En bas : solution plaquettes/granulés/énergie fossile*



Les cibles de développement du chauffage collectif aux granulés : l'industrie

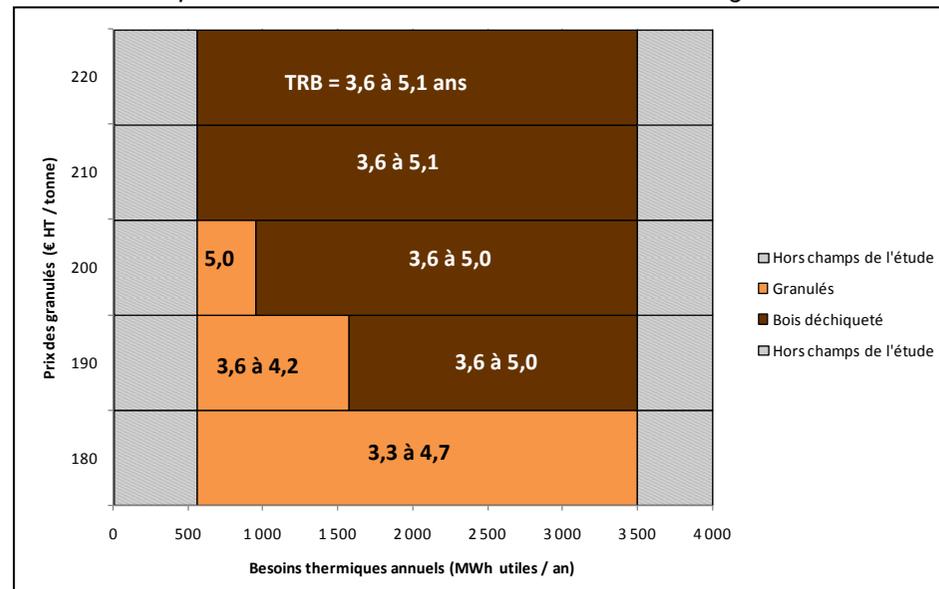
Certains secteurs industriels présentent d'importants besoins énergétiques, soit pour du chauffage, soit pour du process spécifique. Ces industriels sont donc très attentifs à l'évolution du cours des énergies fossiles, et s'intéressent à des modes de chauffage alternatifs.

Dans le milieu industriel, l'intérêt économique d'un projet s'évalue généralement en temps de retour brut sur investissement plutôt qu'en coût global de l'énergie. Ce mode de raisonnement simple, qui présente certaines limites, favorise les solutions techniques présentant des surcoûts d'investissement faibles (granulés) face aux solutions techniques coûteuses en investissement, même si ces dernières présentent un gain plus sensible sur les coûts de fonctionnement (plaquettes).

L'analyse conduite sur un cas d'espèce permet de mettre en évidence que pour un taux d'aide publique fixé (25 %), **un projet granulés présentera un meilleur temps de retour brut sur investissement qu'un projet plaquettes lorsque le prix des granulés est maîtrisé et pour des besoins énergétiques faibles.**

On peut rappeler ici que le choix des granulés face aux plaquettes peut intégrer **d'autres notions que la seule rentabilité économique** : les granulés peuvent être plus adaptés que les plaquettes à certains secteurs d'activité industrielle, notamment du fait de leur simplicité d'usage et de moindres émissions de poussières tant au stade de la livraison du combustible, de son stockage que de la combustion.

Solution technique présentant le temps de retour brut le plus faible en comparaison à une situation de référence aux énergies fossiles.



Fromagerie d'Epenoy (25), équipée d'une chaudière aux granulés de 300 kW

Le point de vue de l'organisme financeur : l'efficacité environnementale de l'aide publique

A puissance équivalente, les montants d'investissement dans une installation aux granulés sont généralement inférieurs à ceux d'une installation aux plaquettes. **Un taux fixe de 50 % d'aide publique correspond donc en valeur absolue à un recours à l'aide publique moindre pour une chaufferie aux granulés.**

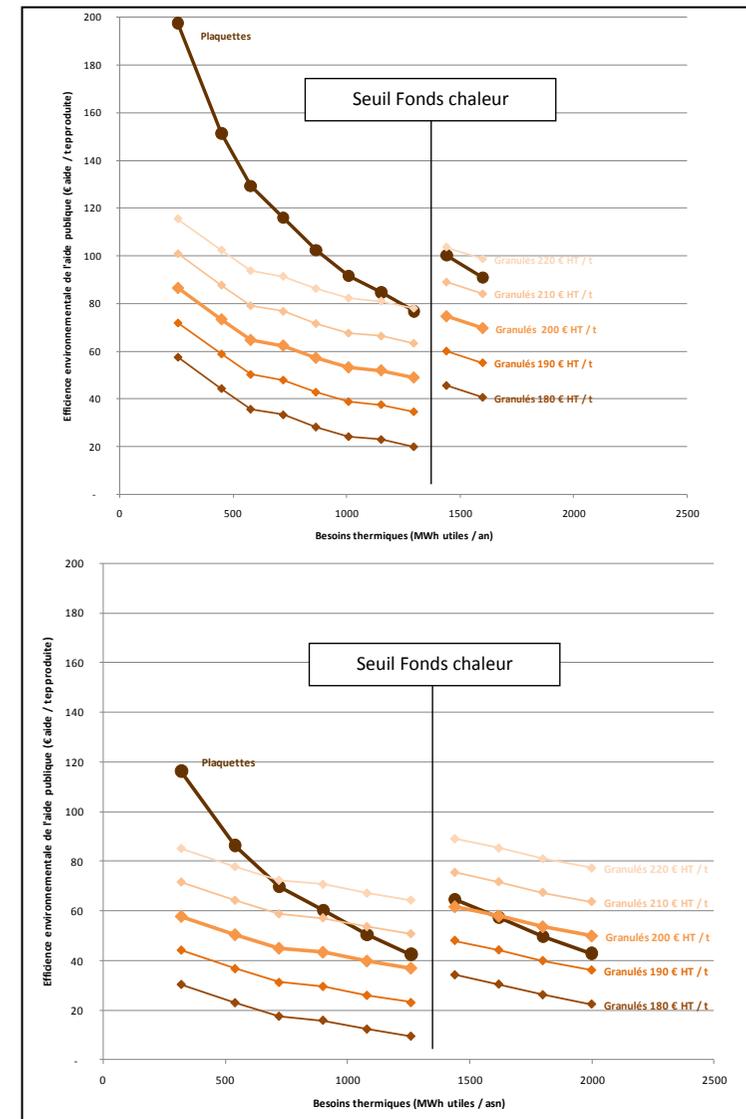
Ce point a été analysé par le calcul de l'efficacité de l'aide publique (€ d'aide publique/tep produites sur 20 ans) nécessaire pour atteindre un niveau d'économie de 5 % en coût global par rapport à une situation de référence aux énergies fossiles.

Il apparaît que l'efficacité environnementale de l'aide publique d'un projet granulés est généralement meilleure que celle du même projet alimenté par une chaufferie aux plaquettes, notamment :

- lorsque la production est inférieure à 100 tep/an ;
- lorsque le bâtiment est fortement intermittent (secteur tertiaire par exemple) ;
- lorsqu'il n'y a pas de possibilité de raccordement du bâtiment à un réseau de chaleur aux plaquettes existant et présentant une densité thermique linéaire supérieure à 1,5 MWh utiles/ml (seuil d'application du Fonds Chaleur renouvelable pour l'extension des réseaux de chaleur existants).

On notera enfin que le taux d'aide publique mobilisé (en %) est quasi systématiquement supérieur pour la technologie granulés, même si l'efficacité environnementale de l'aide est meilleure. Il convient donc pour l'organisme financeur de **ne pas s'arrêter à la seule analyse du taux d'aide publique** (qui pourrait conduire au rejet du financement de certains projets présentant un taux d'aide supérieur 60 % par exemple), mais de **prendre en compte l'aide attribuée en valeur absolue ou ramenée à la quantité d'énergie renouvelable produite.**

Efficacité environnementale de l'aide publique permettant d'atteindre un niveau d'économie en coût global de 5 % par rapport à une référence fossile pour un bâtiment du secteur tertiaire (haut) et un groupe de logements collectifs (bas)



Conclusions

Les granulés de bois présentent, par rapport aux autres combustibles biomasse, de nombreux atouts d'ordre technique (densité énergétique permettant notamment de limiter l'emprise des installations, fluidité, homogénéité...) et l'offre de granulés de bois de qualité certifiée couvre désormais tout le territoire français. Le marché français actuel du granulé de bois est dominé par les usages domestiques dans les poêles et les chaudières des particuliers. En chauffage collectif, ce combustible est encore peu connu en France tant des financeurs que des décideurs et des bureaux d'études.

Cette étude a permis d'identifier différents modèles de projets de chauffage collectif pour lesquels l'usage des granulés présente une pertinence technique, environnementale et économique, malgré un coût unitaire des granulés naturellement supérieur à celui d'autres combustibles biomasse. Ces modèles de projets pourraient constituer **une cible de développement prioritaire de ce combustible au-delà des usages domestiques**. Il s'agit essentiellement :

- **d'établissements non desservis par le réseau de distribution de gaz naturel** ;
- **de chaufferies dédiées de petite puissance pour des établissements fortement intermittents tels que des établissements scolaires ou des bâtiments du secteur tertiaire**. On préférera en outre la création d'une chaufferie dédiée aux granulés pour ces bâtiments à leur raccordement à un réseau de chaleur existant alimenté par une chaufferie centrale bi-énergie plaquettes/énergie fossile, à moins qu'ils ne soient situés à proximité immédiate de la chaufferie centrale ;
- **de réseaux de chaleur à créer, en appoint d'une chaudière aux plaquettes**, qui assurera la base des besoins thermiques du réseau. L'usage des granulés est d'autant plus pertinent lorsqu'une progression des besoins thermiques du réseau est programmée sur plusieurs années (ZAC par exemple) ;
- **de la petite industrie**, lorsque le maître d'ouvrage privilégie un raisonnement en temps de retour brut sur investissement.

Par ailleurs, les niveaux d'investissement dans les installations aux granulés étant, à puissance installée et autonomie de fonctionnement équivalente, généralement inférieurs à ceux des installations aux plaquettes, **le recours à l'aide publique pour assurer la pertinence économique des projets est souvent moindre lorsque le maître d'ouvrage privilégie les granulés**.

Il convient donc d'encourager les maîtres d'ouvrage à étudier la solution du chauffage collectif aux granulés de bois en alternative aux plaquettes (chaufferies dédiées sur des bâtiments scolaires ou tertiaires de petite taille) ou en complément (réseaux de chaleur, créations de ZAC).

On rappelle enfin que :

- Cette étude se fonde sur plusieurs **analyses théoriques** et ne vise en aucun cas à se substituer à une étude de faisabilité technico-économique adaptée à chaque projet en développement. **Certaines hypothèses de travail considérées ne préjugent pas d'une position de principe** et ne doivent pas être interprétées comme un guide de bonnes pratiques. Cette remarque concerne notamment le choix d'installer ou non un appoint et/ou un secours fossile aux chaudières biomasse.
- Les analyses comparatives sont conduites sur la base du **prix actuel des énergies fossiles** (moyenne 2009 et 2010) et d'un prix des granulés compris entre 180 et 220 € HT / tonne. Certaines conclusions peuvent être amenées à évoluer, en cas de renchérissement du prix du gaz naturel.

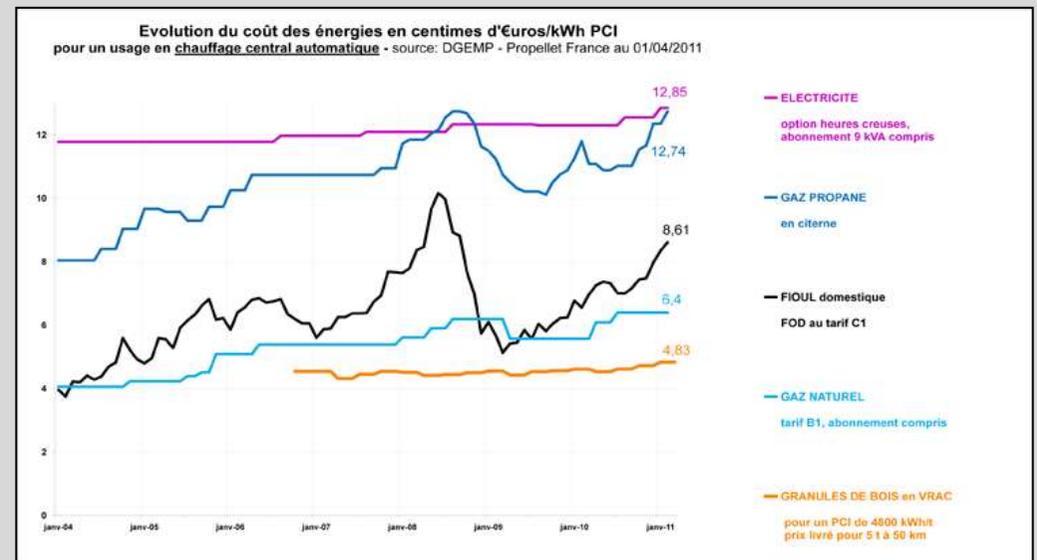
Encart 1 : Le mot du SNPGB

L'offre de granulé de bois de qualité certifiée couvre désormais tout le territoire français et continue de se développer. Ce combustible présente de nombreux atouts d'ordre techniques (densité énergétique, fluidité, homogénéité...). Le marché français actuel du granulé de bois est dominé par les usages dans les poêles ou les chaudières du particulier. En chauffage collectif, le granulé reste encore peu connu en France tant des financeurs, que des décideurs et des bureaux d'études.

Pourtant du fait de la compétitivité du granulé sur des projets dans des villes qui ne sont pas desservies par le GN, il convient donc d'encourager les maîtres d'ouvrage à étudier systématiquement la solution du chauffage collectif aux granulés de bois par rapport à une solution fioul ou propane en présentant l'économie en coût global et ainsi les cas suivants où la solution granulés est la plus cohérente :

- en alternative aux plaquettes en solution 100% granulés d'un point de vue économique (chaufferies dédiées sur des bâtiments scolaire ou tertiaires de petite taille) ;
- d'un point de vue logistique sur des sites où on ne peut pas mettre de plaquettes (problèmes de livraisons par exemple) ;
- en appoint d'une installation plaquette en base (avec ou sans secours énergie fossile) en moyenne puissance (réseaux de chaleur, créations de ZAC) ;
- utilisation de chaufferies existantes suffisamment spacieuses, où il serait possible de mettre en place des chaufferies granulés mais pas des chaufferies plaquettes, réduisant d'autant le coût du génie civil.

Pour information, on présente ci-dessous l'évolution du coût des énergies en centimes d'€ TTC / kWh PCI pour un usage domestique.



PARTIE 2 : RESULTATS DE L'ETUDE

1. Le contexte de l'étude

La production de granulés de bois existe en France depuis les années 1980 mais ce n'est que depuis récemment que la filière s'est réellement structurée et connaît **un essor rapide**. Une quarantaine d'unités industrielles, réparties sur tout le territoire, fabriquent et commercialisent aujourd'hui des granulés dont la majorité des volumes est désormais certifiée pour un référentiel de qualité. Pour assurer les fortes croissances des productions (208 000 tonnes en 2008, 345 000 tonnes en 2009, près de 500 000 tonnes en 2010), les industriels du secteur diversifient leurs sources de matières premières (sciures, plaquettes de scieries, rondins écorcés), ce qui diminue la concurrence d'usage qui pouvait exister avec d'autres secteurs d'activité utilisateurs de sciures.

Jusqu'à présent, la filière française de granulés de bois s'est essentiellement développée pour servir **le marché des particuliers** qui l'utilisent pour le chauffage d'appoint (poêles) ou principal (chaudières) de leur domicile. Le très grand confort d'usage de ce combustible renouvelable justifie son succès.

En revanche, les chaufferies collectives (ou industrielles) utilisant le granulé de bois sont encore en petit nombre et sont le résultat d'initiatives isolées, tant de la part des maîtres d'ouvrage que de leurs maîtres d'œuvre. **Le granulé reste en France encore mal connu des décideurs et des prescripteurs de ces segments du marché.**

1.1 Les atouts des granulés de bois

1.1.1 Les aspects techniques

Les granulés de bois proviennent du compactage de co-produits de l'industrie du bois (essentiellement sciures issues de la première transformation du bois et des menuiseries). Leur fabrication nécessite généralement un séchage, puis une compression mécanique des sciures ou autres broyats de bois au sein d'unités de granulation, sans adjonction de colle ou d'agglomérant chimique. Ils se présentent sous la forme de cylindres de 6 à 8 mm de diamètre et de 15 à 20 mm de longueur.

Par rapport aux autres combustibles biomasse (plaquettes de scierie, plaquettes fibreuses issue du broyage de bois d'emballage, plaquettes forestières et bocagères), **que l'on dénommera « plaquettes » dans la suite du document par soucis de simplicité**, les granulés présentent les atouts suivants :

- une **densité et un pouvoir calorifique élevés**, qui permettent de réduire fortement l'emprise au sol des installations de combustion et des silos de stockage à puissance thermique installée et autonomie de fonctionnement équivalentes. Ainsi, 1 m³ de granulés contient trois à six fois plus d'énergie qu'1 m³ de plaquettes ;
- une **grande fluidité**, qui autorise la mise en œuvre de systèmes d'alimentation automatique plus simples et une plus grande flexibilité d'usage (régulation, taux de charge) ;
- une plus **grande homogénéité** de la qualité du combustible au sein de la même livraison, mais également d'une livraison à l'autre.

Tableau 1 : Granulés et plaquettes, des caractéristiques techniques différentes

	Taux d'humidité (%)	Pouvoir calorifique (MWh PCI/tonne)	Densité volumique (kg/m ³)	Densité énergétique (MWh PCI/m ³)
Plaquettes	30 à 50 %	2,0 à 3,5	250 à 300	0,5 à 1,1
Granulés	8 à 10 %	5,0	650 à 700	3,3 à 3,6

1.1.2 Les aspects environnementaux

Le CO₂ émis lors de la combustion des granulés, au même titre que celui émis par la combustion de tous les combustibles biomasse, correspond quantitativement à celui que la plante a capté pendant sa croissance. En conséquence, **la combustion des granulés est neutre vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre.**

Du fait de la densité énergétique du produit, l'alimentation d'une chaufferie aux granulés nécessite **moins de livraisons** ou autorise des livraisons par plus petits porteurs que celle d'une chaufferie aux plaquettes à quantité énergétique consommée et à éloignement de la plate-forme d'approvisionnement identiques.

La plus grande flexibilité d'usage des chaudières aux granulés et la réduction du risque de pannes permettent **d'augmenter le taux de couverture des besoins par la biomasse** et de substituer ainsi plus d'énergie fossile.

On notera par ailleurs que la combustion des granulés produit généralement **moins de cendres** que la combustion des plaquettes.

Enfin, certains constructeurs semblent indiquer que la combustion des granulés génère **moins de poussières dans les fumées**, ce qui permettrait de s'affranchir d'une filtration de type électrofiltre ou filtre à manche pour atteindre les performances environnementales exigées dans le cadre du Fonds Chaleur renouvelable (50 mg/Nm³ maximum dès que la production d'énergie renouvelable dépasse les 100 tep/an). Ce point n'ayant pas pu être vérifié de façon formelle par des mesures sur des sites en fonctionnement, on considèrera, dans les simulations présentées plus loin, l'installation systématique d'une filtration complémentaire sur les chaudières aux granulés pour les projets produisant plus de 100 tep/an d'énergie bois, comme sur les chaudières aux plaquettes.

Il convient par contre de préciser que **la quantité d'énergie nécessaire à la production des granulés est supérieure à celle nécessaire à la production de plaquettes** (séchage, granulation). On estime ainsi que lorsque les sciures sont séchées au bois, il a été nécessaire de mobiliser 6 % du contenu énergétique du produit final en énergie non renouvelable, contre 2 à 3 % seulement pour les plaquettes.¹

1.1.3 Les aspects économiques

Les **investissements à engager pour la construction d'une chaufferie aux granulés sont généralement inférieurs** à ceux à engager pour une chaufferie aux plaquettes, à puissance installée équivalente.

Cette différence, parfois notable, est due :

¹ Cahier du bois énergie n°42 – juin 2009 – Efficacité énergétique du chauffage au bois – Le Bois International.

CIBE

- à l'emprise globale de la chaufferie et silo, plus faible pour les installations aux granulés ;
- à la plus grande simplicité des équipements de production d'énergie, de désilage et de transfert.

De même, la simplicité des installations et l'homogénéité du combustible conduisent à :

- **réduire les coûts d'exploitation** des chaufferies ;
- limiter le nombre de pannes, ce qui permet d'augmenter le taux de couverture des besoins par la biomasse et de **limiter le recours à une énergie fossile d'appoint souvent plus coûteuse**.

Par contre, le granulé étant un combustible plus manufacturé que le bois déchiqueté, **son coût ramené à l'unité énergétique est sensiblement plus élevé que celui des plaquettes**.

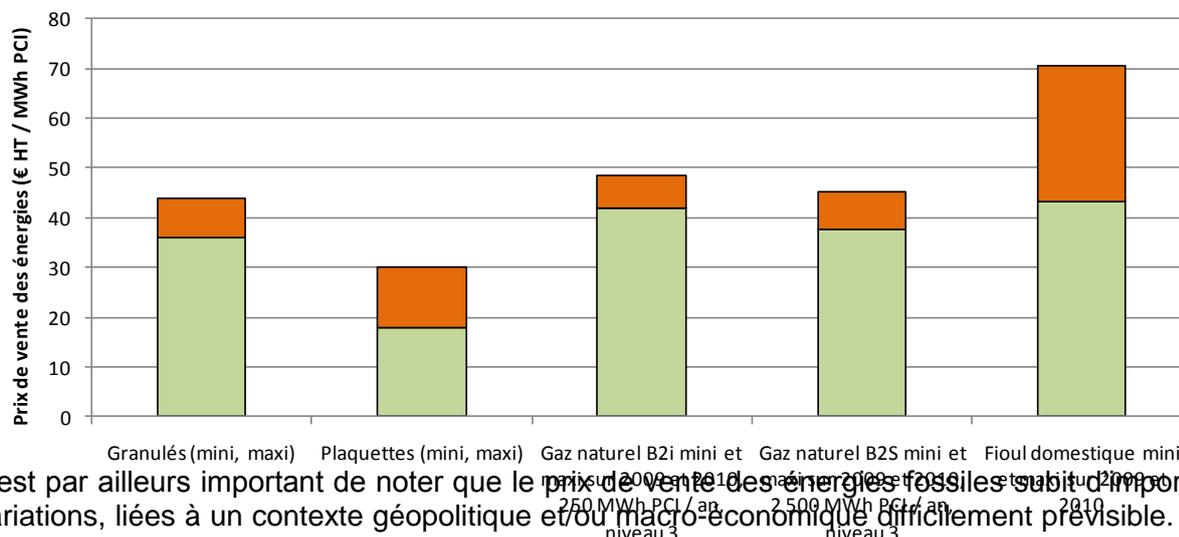
On présente ci-dessous un ordre de grandeur du coût de différentes sources d'énergies, ramené à la même unité énergétique entrée chaudière (€ HT/MWh PCI).

On notera que deux fiscalités différentes peuvent être appliquées aux combustibles bois (plaquettes et granulés) : une TVA à 5,5 % si le combustible est facturé à l'utilisateur final de la chaleur (**cas de figure considéré dans l'ensemble des simulations conduites dans le cadre de la présente étude**) et une TVA à 19,6 % dans le cas contraire (prestation globale d'exploitation conduisant à une vente de chaleur). Les combustibles fossiles sont soumis à un taux de TVA de 19,6 %, à l'exception de l'abonnement au gaz naturel, qui bénéficie d'un taux réduit à 5,5 %.

Tableau 2 : Les coûts unitaires des combustibles pris en compte pour l'étude (€HT / MWh PCI, dont abonnement)

Granulés (180 à 220 € HT/tonne)		36 à 44
Plaquettes		18 à 30
Gaz naturel de niveau 3, moyenne 2009-2010	Consommation de 250 MWh PCI/an (tarif B2i)	44,7
	Consommation de 2 500 MWh PCI/an (tarif B2S) avec 75 % des consommations en hiver tarifaire	40,7
	TICGN pour les clients non résidentiels	1,32
Fioul domestique, moyenne 2009-2010		56

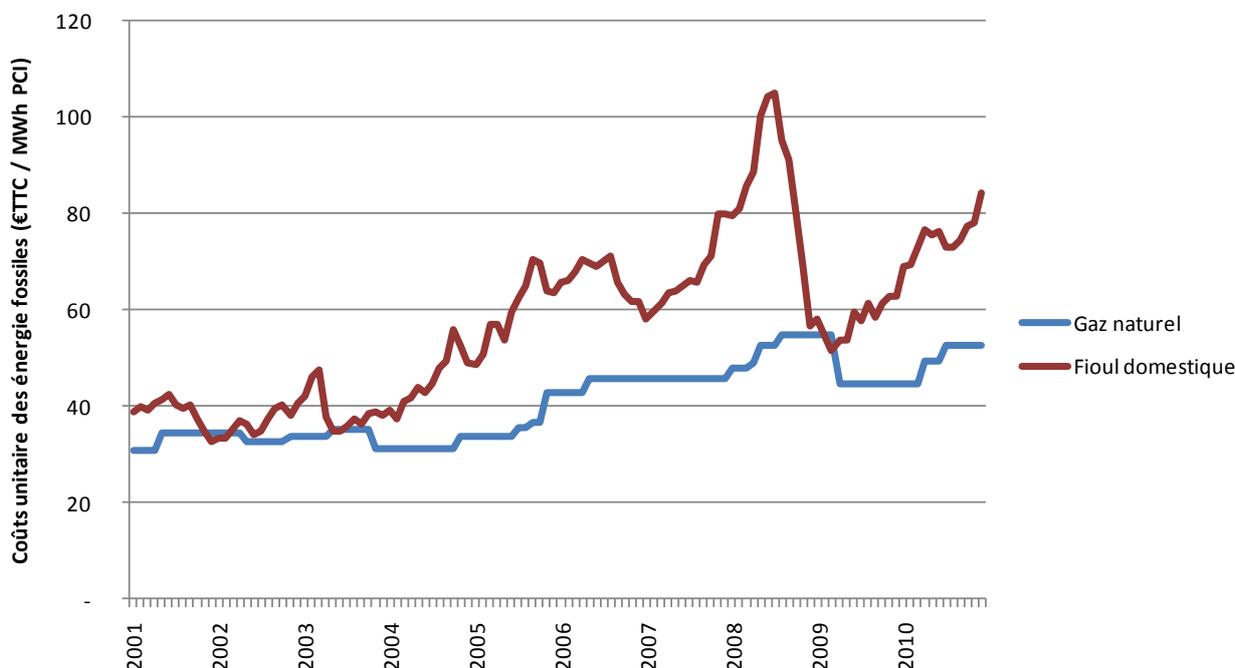
Figure 1 : Les coûts unitaires des combustibles pris en compte pour l'étude € HT / MWh PCI



Il est par ailleurs important de noter que le prix de vente des énergies fossiles subit d'importantes variations, liées à un contexte géopolitique et/ou macro-économique difficilement prévisible. Aussi,

s'il évolue manifestement à la hausse sur le long terme, il peut être amené à chuter brusquement comme le montrent les baisses observées début 2009 pour le gaz et fin 2008 pour le fioul domestique.

Figure 2 : L'évolution du prix des énergies fossiles depuis 10 ans



Moins coûteux en moyenne que le fioul domestique, les granulés peuvent, selon le taux de TVA appliqué, les coûts unitaires à la tonne pratiqués (180 à 220 € HT / tonne dans le cadre de cette étude) et la période considérée, être livrés chez l'utilisateur final à **un coût proche de celui du gaz naturel**.

Le granulé est un combustible raffiné et présente naturellement un coût plus élevé que celui de la bûche ou du bois déchiqueté. **Ses usages ne peuvent donc être exactement similaires et le granulé doit être positionné dans les situations où ses qualités propres justifient son prix.**

*On notera qu'il existe également des **granulés de qualité industrielle** (diamètre plus important, taux de cendre plus élevé...) destinés à la co-combustion avec du charbon dans des centrales de production électrique de certains pays européens. De telles applications n'existent pas aujourd'hui en France. **Leur utilisation n'entre pas dans le cadre de la présente étude.***

1.2 Les objectifs de l'étude

A la lumière des éléments précédents, un maître d'ouvrage pourra faire le choix d'une chaufferie collective aux granulés :

- dans un **objectif environnemental** face aux énergies fossiles concurrentes ;
- du fait d'une **configuration technique de l'existant** n'autorisant pas la mise en œuvre d'une chaufferie aux plaquettes (foncier disponible réduit, nécessité d'intégrer les éléments à une chaufferie existante...);
- afin de privilégier une technologie exigeant **moins de main-d'œuvre** que les plaquettes pour l'exploitation quotidienne des installations ;
- afin de **limiter les rotations** et/ou la taille des camions de livraison de combustibles.

Dans la plupart des cas, cependant, trois solutions techniques pourront être envisagées : une chaufferie aux énergies fossiles, une chaufferie aux granulés et une chaufferie aux plaquettes. C'est alors souvent le **critère économique** qui orientera le maître d'ouvrage dans ses choix.

Le développement du chauffage collectif aux granulés dépend de la pertinence de solutions techniques performantes, et surtout de **la compétitivité de la chaleur produite**. Pour justifier cette compétitivité, il est nécessaire que tous les acteurs de la filière, depuis les fabricants du produit jusqu'aux exploitants des futures chaufferies, connaissent dans le détail les propriétés spécifiques et les avantages comparatifs des solutions utilisant le granulé de bois et dans quelles situations celui-ci doit être utilisé, comme combustible principal ou d'appoint.

L'objectif de cette étude est de clarifier les conditions économiques de montage des projets de chauffage collectif aux granulés, afin notamment :

- de **définir des cibles potentielles adaptées** au développement du chauffage collectif aux granulés, en répondant aux interrogations suivantes : comment se positionnent les granulés au plan économique face aux plaquettes et aux énergies fossiles et dans quelles configurations le chauffage collectif aux granulés est-il particulièrement adapté ?
- d'analyser le **point de vue de l'organisme financeur**, attributaire des aides publiques à l'investissement ;
- de **permettre aux producteurs de granulés de promouvoir leur produit**.

■ *Le cahier des charges de l'étude figure en annexe du rapport.*

1.3 La méthodologie et les outils développés

La méthodologie utilisée pour cette étude est celle développée par le CIBE dans certains des précédents travaux de la Commission Montage de Projets (analyse de l'influence de paramètres techniques et économiques sur la rentabilité des projets). Elle consiste à établir un ou plusieurs « cas-types », représentatifs de cas réels recensés appelés, « cas référents ». Selon la consistance de l'échantillon des cas référents et sa taille, le cas-type établi, par moyenne des données techniques et économiques des cas référents, est consolidé, puis validé par les membres de la Commission. C'est sur ces cas-types consolidés que sont ensuite conduites les simulations économiques.

1.3.1 La constitution des cas-types

Les hypothèses retenues pour établir le coût global de l'énergie dans chaque cas de figure sont détaillées en Annexe 1.

- **Le chauffage aux énergies fossiles**

La définition des paramètres économiques intervenant dans le coût global de la chaleur « Energie fossile » se fonde sur le travail réalisé par la Commission Montage de Projets du CIBE fin 2010 concernant la définition d'une **situation de référence normative**².

Afin de lisser les évolutions importantes et rapides du cours des énergies fossiles, il a été choisi de considérer la **valeur moyenne du prix du gaz naturel (niveau 3) et du fioul domestique sur les années 2009 et 2010**.

- **Le chauffage aux plaquettes**

La définition des paramètres économiques intervenant dans le coût global de la chaleur « Bois-énergie plaquettes » s'appuie sur les études et travaux suivants, dont les approches correspondent à des gammes de puissance proches de la gamme analysée dans le cadre de la présente étude (80 à 500 kW) :

- l'étude ADEME réalisée par PERDURANCE sur les **coûts d'investissement des chaufferies au bois déchiqueté** pour la définition des coûts d'investissement des chaufferies aux plaquettes³ ;
- les **travaux de la Commission Montage de Projets du CIBE relatifs à l'analyse de l'influence de paramètres techniques et économiques sur la rentabilité des projets bois** pour la définition des coûts d'exploitation des chaufferies aux plaquettes⁴.

Les hypothèses retenues ont été extrapolées à l'ensemble de la gamme de puissance étudiée dans le cadre de la présente étude, et consolidées par les membres réguliers de la Commission Montage de Projets du CIBE.

² Situation de référence normative pour l'étude des projets bois-énergie – CIBE, Commission MOP – Décembre 2010

³ Evolution des coûts d'investissement relatifs aux installations collectives bois-énergie (2000 – 2006) – ADEME, PERDURANCE – avril 2009

⁴ Chaufferies collectives et réseaux de chaleur au bois : Sensibilité de la rentabilité d'un projet aux paramètres technico-économiques – mars 2009

• Le chauffage aux granulés

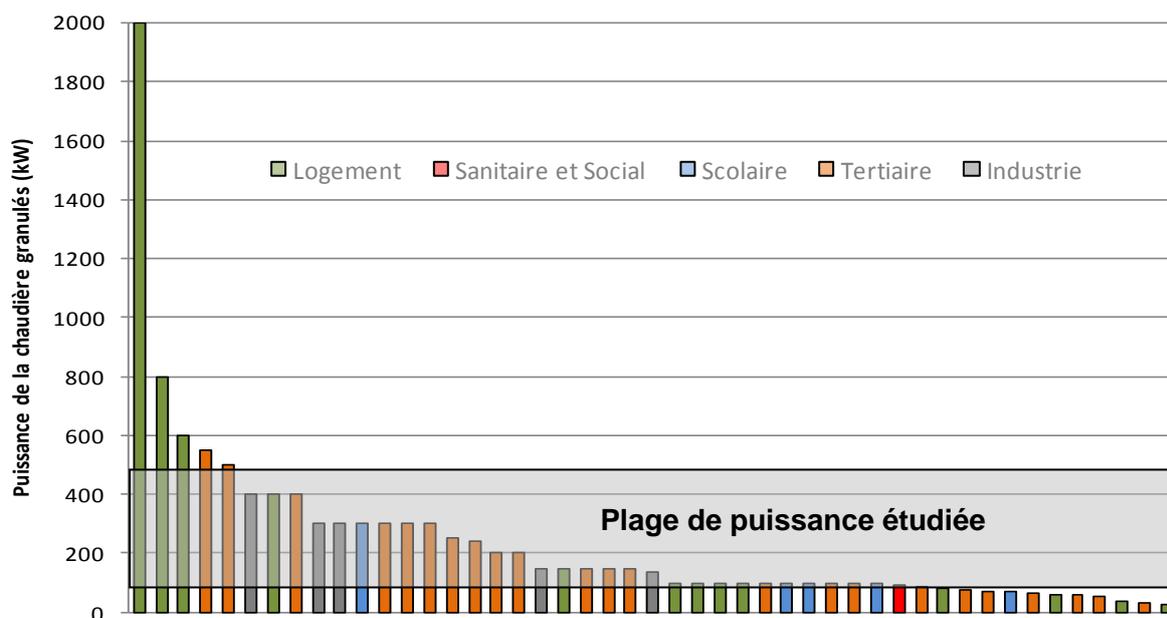
La définition des paramètres économiques intervenant dans le coût global de la chaleur « Bois-énergie granulés » s'appuie sur le recensement de cas référents de chaufferies aux granulés en fonctionnement. Ce recensement, initié dès l'été 2010, a dû être étendu à des opérations en fonctionnement à l'étranger (Allemagne essentiellement, mais également Autriche, Suisse...) afin d'élargir le panel représentatif.

Au total, **89 chaufferies en fonctionnement ont pu être recensées** (dont 43 chaufferies en France et 25 en Allemagne). Parmi ces 89 réalisations, seules **47 présentaient des informations suffisamment fiables et exhaustives pour être exploitées**.

70 % des 47 cas exploitables correspondent à la gamme de puissance analysée dans le cadre de la présente étude (80 à 500 kW). 10 cas (21 %) correspondent à une puissance inférieure et 4 cas (9 %) correspondent à une puissance supérieure.

Les chaufferies aux granulés recensées sont **essentiellement installées sur des bâtiments tertiaires (23) et sur des logements (13)**. On notera qu'un unique cas est recensé dans le secteur sanitaire et social.

Figure 3 : Le chauffage collectif aux granulés : les cas référents recensés



L'évaluation des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation des chaufferies granulés est issue du traitement des 47 cas référents exploitables, sur la base de la méthodologie suivante :

- **analyse des données économiques** ramenées à la puissance de l'installation, suppression des valeurs extrêmes, définition de valeurs moyennes par gamme de puissance ;
- **modélisation de l'évolution des coûts** d'investissement et d'exploitation en fonction de la puissance de l'installation ;
- **consolidation des données** par échanges avec des constructeurs de chaudières aux granulés et concertation de la Commission Montage de Projets du CIBE.

1.3.2 Les outils de simulation et les cas de figure étudiés

Trois outils de simulation ont été conçus pour réaliser la présente étude. Ils concernent :

- **une chaufferie dédiée** à un ou plusieurs ensembles de logements collectifs, à des bâtiments des secteurs sanitaire et social, scolaire, ou tertiaire et à des sites industriels, alimentée soit par une énergie fossile, soit par des plaquettes (avec énergie fossile en appoint-secours), soit par des granulés (avec énergie fossile en appoint-secours) ;
- **un réseau de chaleur** alimentant plusieurs bâtiments de chacun des secteurs évoqués ci-dessus (hors industrie) à partir d'une chaufferie centrale aux plaquettes (avec énergie fossile en appoint-secours), aux granulés (avec énergie fossile en appoint-secours) ou alimentée en tri-énergie par des plaquettes, des granulés et une énergie fossile en appoint-secours ;
- **la création étalée dans le temps d'une ZAC de logements** alimentés, soit par une chaufferie centrale aux plaquettes dimensionnée en fonction des besoins de la ZAC en fin de programme de construction, soit par des chaudières dédiées aux granulés à chaque tranche de logements construite.

Chacun de ces trois outils permet, par l'analyse de la puissance horaire appelée en fonction des températures de consigne des bâtiments, de la température extérieure et des éventuels besoins en eau chaude sanitaire, de calculer :

- la **puissance optimisée des chaudières** (bois-énergie et énergie fossile) ;
- le **taux de couverture des besoins par le bois** et les quantités de combustibles consommées annuellement ;
- les différents **postes de la facture énergétique en coût global**.

Les outils permettent d'intégrer la **variation de nombreux paramètres** :

- **techniques** : rigueur climatique (DJU), taille de l'établissement (nombre de logements, nombre de lits...) et besoins thermiques (E en MWhutiles/an), nombre d'heures de fonctionnement équivalent pleine puissance et intermittence d'usage des bâtiments (ratio E/Pbois, en heures), linéaire de réseau à créer en mètres ;
- **économiques** : Prix des énergies fossiles, Prix des plaquettes, Prix des granulés, Niveau d'investissement, Coûts d'exploitation, Niveau et Taux d'aide publique.

A partir des trois outils de simulation, les cas de figure suivants ont pu être analysés :

- une **chaufferie dédiée** de moyenne puissance pour assurer les besoins de chauffage et éventuellement d'eau chaude sanitaire d'un ou plusieurs bâtiments de **logements**, du **secteur sanitaire et social, scolaire** ou **tertiaire** ;
- un **réseau de chaleur** alimenté par des plaquettes, des granulés et une énergie fossile en appoint-secours ;
- la création échelonnée dans le temps d'une **ZAC de logements** ;
- le choix entre la mise en œuvre d'une **chaufferie dédiée aux granulés pour un bâtiment isolé ou son raccordement à un réseau de chaleur existant** alimenté par une chaufferie centrale aux plaquettes ;
- un **cas industriel**.

1.4 Avertissements et précisions

• Les outils mis en œuvre ne sont pas des outils de dimensionnement

Les outils de simulations ne sont **pas des outils de dimensionnement**. Ils ont été conçus non pas pour définir un coût de la chaleur en valeur absolue, mais pour **analyser l'influence relative de différents paramètres techniques et économiques dans la rentabilité des projets**. Ils ne peuvent donc en aucun cas se substituer à une étude de faisabilité technico-économique qui intègre l'ensemble des spécificités propres à chaque projet.

• Les limites de l'exercice

La méthodologie développée pour la définition du cas-type « chaufferie dédiée aux granulés » se fonde sur le recensement de cas réels en fonctionnement ou en phase finale de travaux (cas référents). Une part importante du temps de travail a été consacrée à l'identification de chaufferies en fonctionnement et à la récupération d'informations techniques et économiques relatives à ces cas référents. Devant le peu de réalisations en fonctionnement, le groupement s'est heurté aux difficultés suivantes :

- nécessité d'étendre le périmètre de recherche à des chaufferies collectives aux granulés en fonctionnement à l'étranger (Allemagne et Autriche notamment) ;
- faible retour sur les données techniques et surtout économiques ;
- données recueillies généralement partielles ;
- dispersion importante dans les données techniques et économiques recueillies, dues à la diversité des cas référents identifiés ;
- nécessité de consolider certaines données grâce à de nombreux échanges entre les membres du groupement et les membres de la Commission MOP du CIBE.

En conséquence, la pertinence du traitement statistique des données recueillies doit s'appréhender à la lumière de ces difficultés. **Les cas-types résultant de ce traitement ne peuvent donc en aucun cas être considérés comme des références absolues représentatives de l'ensemble des chaufferies existantes ou des projets qui pourraient voir le jour à l'avenir.**

De même, les résultats attendus de l'étude visent à **tirer de grands enseignements sur les tendances technico-économiques et à identifier les cibles de développement les plus pertinentes pour le chauffage aux granulés**. Ce travail n'interdira évidemment pas le développement de projets en dehors de ces cibles, de même que d'autres modes de chauffage pourront être privilégiés face aux granulés pour des bâtiments et équipements entrant dans le cœur de cible.

• Le choix d'une énergie fossile en appoint/secours

Sur les installations collectives de moyenne et forte puissance, qu'elles soient alimentées par de la biomasse ou une énergie fossile, il est fréquent de faire appel à plusieurs chaudières installées en cascade. Il convient dans ce cas de différencier :

- **l'usage en base et l'usage en appoint** : l'une des chaudières est dimensionnée pour assurer la base des besoins thermiques, la seconde assurant les besoins par période de grand froid. La chaudière d'appoint, qui présente généralement une puissance thermique assez similaire, fonctionne donc l'équivalent d'un nombre d'heures nettement plus faible que la première ;

CIBE

- **l'usage en secours total** : s'il s'avère nécessaire (choix du maître d'ouvrage, disposition réglementaires ou contractuelles) de disposer d'un secours total de l'installation, la chaudière de secours est dimensionnée à hauteur de l'appel de puissance par période de grand froid. Elle est amenée à fonctionner un nombre d'heure très faible dans l'année.

Lorsque l'on dimensionne une chaufferie au bois (plaquettes ou granulés), il convient de considérer que la chaudière bois (plaquettes ou granulés) fonctionnera en base des besoins (80 à 90 % de besoins annuels couverts). L'appoint et le secours éventuels dépendront des éléments suivants :

- **l'appoint** peut être assuré par une seconde chaudière bois installée en cascade de la première (tandem). Dans ce cas, l'investissement dans la seconde chaudière bois (plus élevé que l'investissement dans une chaudière fossile équivalente), devra être compensé par un nombre d'heures de fonctionnement plus faible que celui de la chaudière fonctionnant en base. Cette solution permet cependant de s'affranchir des énergies fossiles ;
- **si le secours total de l'installation est jugé nécessaire**, il peut être assuré :
 - o par une nouvelle chaudière bois (plaquettes ou granulés) de puissance égale à l'appel de puissance par période de grand froid.
 - o par une chaudière à énergie fossile, moins coûteuse en investissement.

Dans ces deux cas de figure, la chaudière de secours fonctionnera l'équivalent d'un nombre d'heures très faible dans l'année. L'équilibre économique de l'opération tend, aux conditions économiques actuelles, à privilégier pour le secours l'installation d'une chaudière à énergie fossile. Dans ce cas de figure, la chaudière au fioul ou au gaz peut alors également être utilisée pour assurer l'appoint de la chaudière bois.

Dans l'ensemble des simulations conduites ci-après, **le choix a été fait de considérer un secours total des installations de production d'énergie** dans les cas de figure suivants :

- chauffage aux énergies fossiles : installation de 1,5 fois la puissance appelée environ ;
- chauffage aux granulés : installation d'environ 0,5 fois la puissance appelée aux granulés (80 à 90 % des besoins thermiques) et 1 fois la puissance appelée au gaz ou au fioul. La chaudière au fioul ou au gaz assure l'appoint et le secours total.
- chauffage aux plaquettes : installation d'environ 0,5 fois la puissance appelée aux plaquettes (80 à 90 % des besoins thermiques) et 1 fois la puissance appelée au gaz ou au fioul. La chaudière au fioul ou au gaz assure l'appoint et le secours total.

Pour la conception d'une chaufferie dédiée, ce parti-pris peut être discuté. On observe en effet tous les cas de figure sur les chaufferies en fonctionnement : granulés avec ou sans appoint/secours fossile, plaquettes avec ou sans appoint/secours fossile, plaquette avec appoint aux granulés, avec ou sans secours fossile. Par ailleurs, la plus grande autonomie des chaufferies granulés à volume stocké identique, leur maintenance plus aisée et l'homogénéité du combustible pourraient plaider pour une suppression de l'appoint/secours fossile pour les chaufferies granulés et un maintien de l'appoint/secours fossile pour les chaufferies plaquettes.

CIBE

La décision du groupement résulte cependant des deux arguments suivants :

- le choix de disposer ou non d'un secours total de l'installation répond parfois à des exigences réglementaires (secteur sanitaire et social par exemple) et appartient au seul maître d'ouvrage du projet et non aux prestataires de l'étude ;
- supprimer le secours sur les chaufferies granulés et le maintenir sur les chaufferies plaquettes aurait conduit à comparer deux services rendus différents : risque (même faible) de rupture de service dans le premier cas et maintien systématique du service dans le second.

Il ne s'agit donc pas dans cette approche théorique de remettre en cause la fiabilité du chauffage au bois (plaquettes ou granulés), mais bien de comparer des cas de figure sur la base des mêmes hypothèses. Par ailleurs, le choix technique adopté dans le cadre de cette approche théorique ne préjuge pas d'une position de principe.

Pour la conception des outils de production d'un réseau de chaleur en service public de distribution d'énergie calorifique, par contre, l'absolue nécessité de continuité du service vis-à-vis des abonnés plaide, quelle que soit la solution technique choisie pour assurer la base des besoins, pour l'installation d'un secours total de l'installation. Pour les raisons évoquées plus haut (surcoût d'investissement au regard du nombre d'heures de fonctionnement), ce secours total est généralement assuré par une énergie fossile, sans préjuger de la solution technique retenue pour assurer l'appoint.

2. Une chaufferie dédiée de moyenne puissance (80 à 500 kW)

On appelle chaufferie dédiée une chaufferie collective alimentant **un ou plusieurs bâtiments appartenant au même maître d'ouvrage**. On considère en outre dans le cadre de cette approche que si plusieurs bâtiments sont raccordés à la chaufferie dédiée, ils présentent tous **le même profil de consommation**.

2.1 Un raisonnement en coût global

• Le coût global de l'énergie

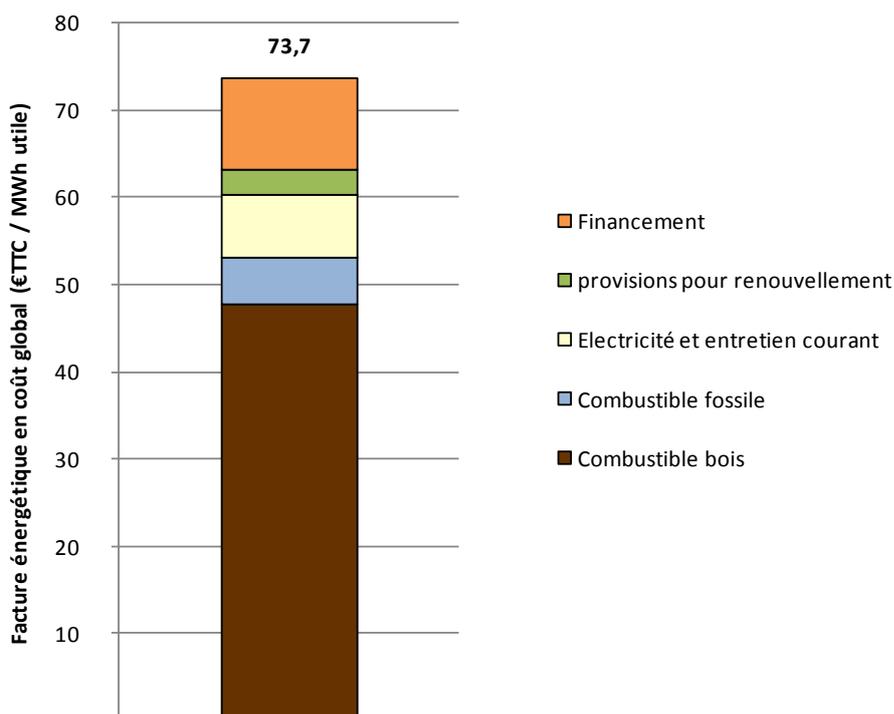
L'analyse de l'intérêt économique d'un projet s'effectue généralement par la comparaison des factures énergétiques en coût global des différentes solutions étudiées (énergie fossile, plaquettes, granulés).

La facture énergétique en coût global correspond à la somme de l'ensemble des postes de charge liés à la production d'énergie, ramenée à l'unité de chaleur distribuée en pied d'immeuble. Pour une chaufferie dédiée, elle intègre donc :

- l'achat d'énergie (énergie fossile, plaquettes, granulés) ;
- les charges d'électricité et d'entretien courant ;
- les provisions pour grosse réparation ;
- les annuités d'amortissement des investissements.

Elle est exprimée en **€ TTC/MWhutile**.

Figure 4 : Exemple : facture énergétique en coût global d'un groupe de logements chauffés par une chaufferie dédiée aux granulés de 250 kW avec appoint-secours au gaz naturel

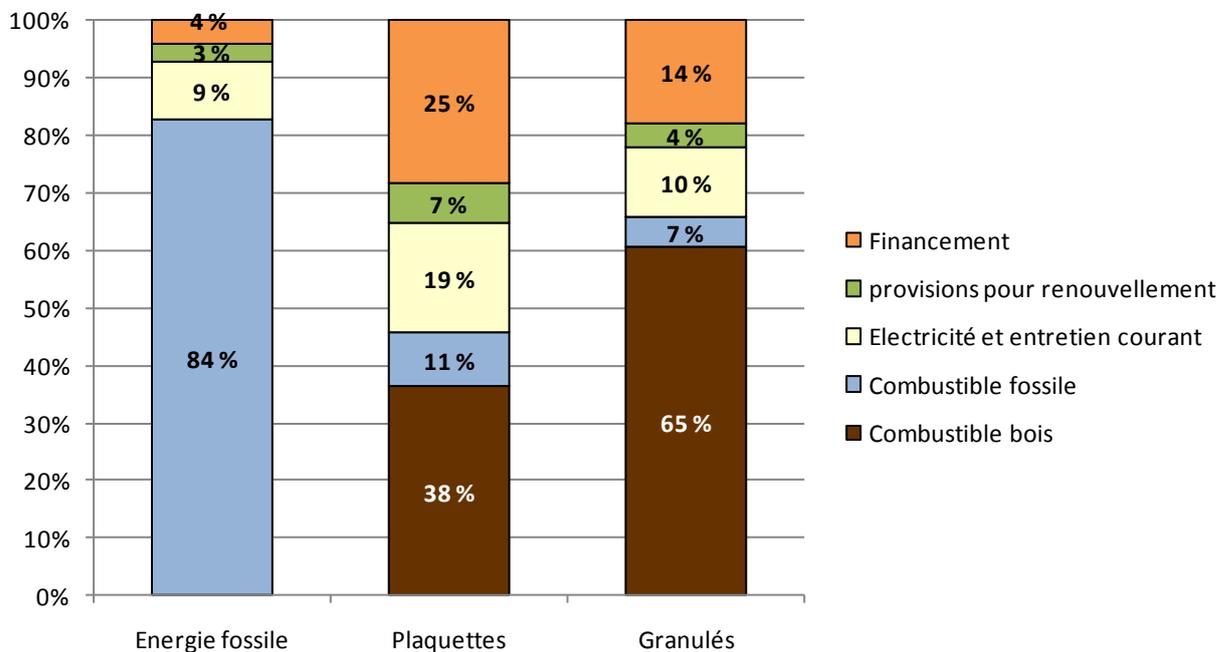


• **La structure de la facture énergétique en coût global**

Selon l'énergie privilégiée pour assurer le chauffage et éventuellement la production d'eau chaude sanitaire d'un bâtiment, la structure de la facture énergétique en coût global d'une chaufferie dédiée de moyenne puissance est très différente :

- si le bâtiment est chauffé par une énergie fossile, l'achat d'énergie est le poste de charge de très loin le plus important, puisqu'il représente 80 à 85 % du coût global de l'énergie. Les autres postes de charge sont de ce fait très minoritaires (coûts d'exploitation : 12 % et financement des investissements : 4 %) ;
- si le bâtiment est chauffé par une chaufferie aux plaquettes, le coût global de l'énergie est réparti en deux principaux postes de charge : l'achat d'énergie représente environ 50 % du coût global (40 % pour l'achat de plaquettes et 10 % pour l'achat d'énergie fossile d'appoint-secours), les 50 % restants se partageant à parts égales entre les coûts d'exploitation et le financement des investissements ;
- si le bâtiment est chauffé par une chaufferie aux granulés, la structure de la facture énergétique est intermédiaire entre les deux cas de figure précédents : l'achat d'énergie est majoritaire, puisqu'il représente plus de 70 % du coût global (65 % pour les granulés et 7 % pour l'énergie fossile d'appoint-secours), les 30 % restants se partageant à parts égales entre les coûts d'exploitation et le financement des investissements.

Figure 5 : La structure des factures énergétiques en coût global (%)
Exemple d'un groupe de logements chauffés par une chaufferie de 250 kW
(Energie fossile, plaquettes avec appoint/secours aux énergies fossiles et granulés avec appoint/secours aux énergies fossiles).



2.2 L'influence de la variation de paramètres techniques et économiques sur le coût global de la chaleur

Le coût global de l'énergie d'une chaufferie dédiée évolue en fonction de plusieurs paramètres techniques et économiques, dont l'influence n'est pas équivalente. On propose ci-dessous d'analyser l'influence de la variation de ces paramètres sur l'évolution du coût global de la chaleur.

• Le chauffage aux énergies fossiles

Du fait de la structure de la facture énergétique, **le seul paramètre influant sur le coût global de l'énergie fossile est l'achat de combustible**. Les autres paramètres techniques et économiques ont une influence négligeable sur le coût global de la chaleur.

• Le chauffage aux plaquettes

L'analyse de l'influence des paramètres techniques et économiques sur le coût global de l'énergie plaquettes a été conduite en faisant varier un à un les paramètres suivants (tout autre paramètre étant fixé), dans une plage de - 20 % à + 20 % autour de leur valeur moyenne pour une chaufferie dédiée de 250 kW :

- taille de l'établissement ou rigueur climatique (Besoins thermiques E) : valeur moyenne = 1 000 MWh utiles/an ;
- intermittence de fonctionnement (Nombre d'heures de fonctionnement équivalent pleine puissance E/Pbois) : valeur moyenne = 4 000 heures, correspondant à un dimensionnement optimisé pour un ensemble de logements. La valeur inférieure de 3 200 heures correspond à l'usage plus intermittent d'un établissement scolaire ou tertiaire ; la valeur supérieure de 4 800 heures correspond à l'usage d'un établissement du secteur sanitaire et social (chauffage et eau chaude sanitaire) ;
- prix des plaquettes : valeur moyenne = 22 € HT/MWh PCI (pour une plage de variation allant de 18 à 30 € HT/MWh PCI) ;
- prix de l'énergie fossile utilisée en appoint/secours : valeur moyenne = 42 € HT/MWh PCI ;
- coûts d'exploitation (électricité, entretien courant et provisions pour grosses réparations) : valeur moyenne = 15 800 € HT/an ;
- investissement : valeur moyenne = 300 000 € HT environ ;
- aide publique : valeur moyenne = 140 000 € environ.

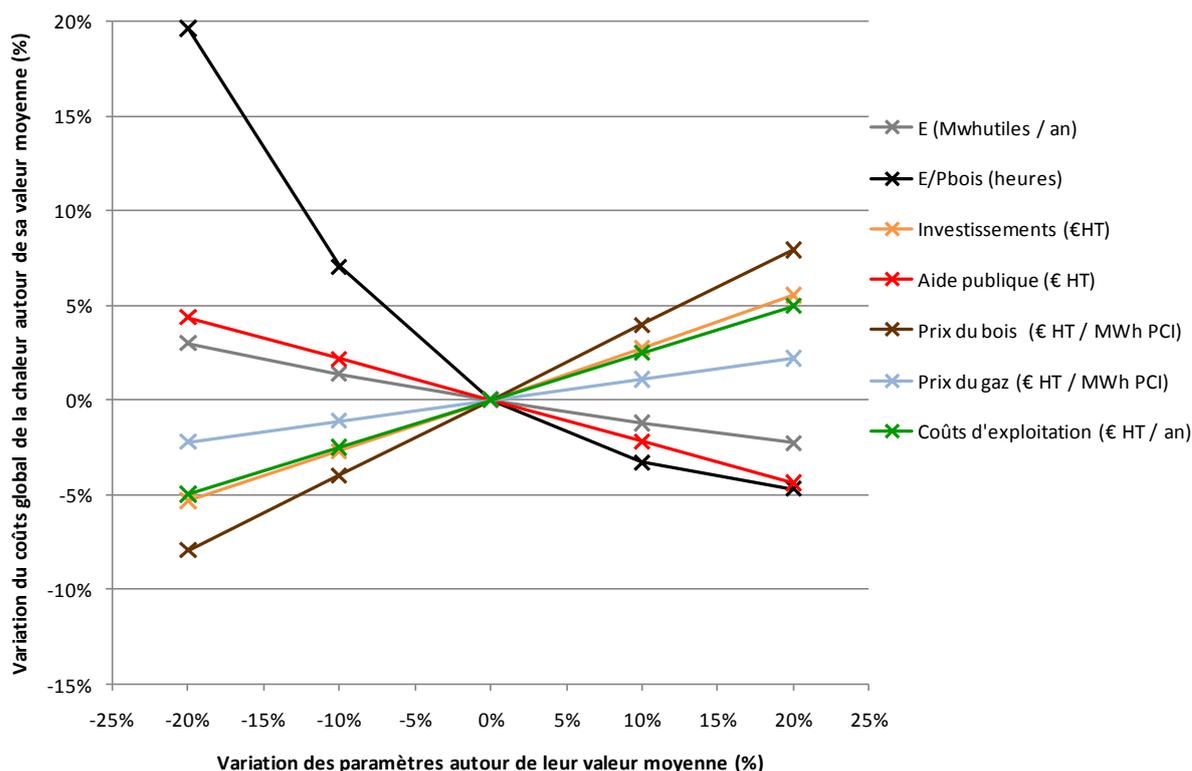
L'impact de la variation de ces paramètres est représenté ci-dessous en **pourcentage d'évolution du coût global de l'énergie autour de sa valeur moyenne**. Sur ce graphique, **la pente de chaque courbe indique l'importance de l'influence du paramètre étudié** : plus la pente est forte (en valeur absolue), plus l'influence du paramètre sur le coût global est importante.

Il apparaît que les paramètres les plus influents dans le coût global de l'énergie aux plaquettes sont, par ordre décroissant d'importance :

- **l'intermittence d'usage des bâtiments** (ratio E/Pbois), largement devant tous les autres paramètres ;
- **le prix du bois** ;
- **les investissements, les coûts d'exploitation et le niveau d'aide publique** ;
- dans une moindre mesure, la taille de l'établissement ou la rigueur climatique (E) et le prix de l'énergie fossile utilisée en appoint/secours.

On notera que le paramètre E est peu influent en pourcentage, mais il est amené à varier dans une plage bien plus importante que les autres paramètres (entre 250 et 2 400 MWh utiles/an dans le cadre de la présente étude). Son influence est donc non négligeable sur l'ensemble de sa plage de variation.

Figure 6 : Influence relative de la variation de paramètres techniques et économiques sur le coût global de l'énergie plaquettes



• Le chauffage aux granulés

La même démarche, faisant intervenir les mêmes paramètres variables (à l'exception du prix des plaquettes, remplacé par le prix des granulés) est conduite pour les chaufferies collectives aux granulés. Les paramètres variables analysés sont :

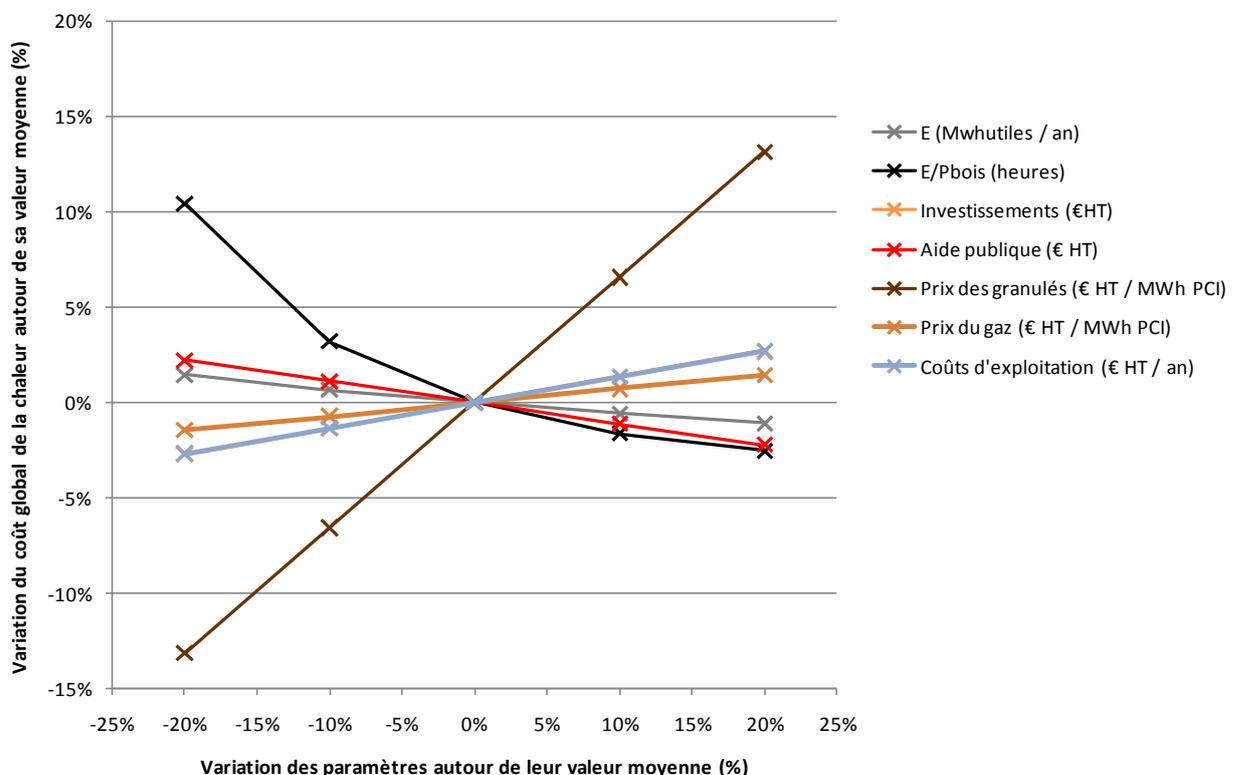
- taille de l'établissement ou rigueur climatique (Besoins thermiques E) : valeur moyenne = 1 000 MWh utiles/an ;
- intermittence de fonctionnement (Nombre d'heures de fonctionnement équivalent pleine puissance E/Pbois) : valeur moyenne = 4 000 heures ;
- prix des granulés : valeur moyenne dans le cadre de l'étude = 200 € HT/tonne (40 € HT/MWh PCI) ;
- prix de l'énergie fossile en appoint / secours : valeur moyenne = 42,0 € HT/MWh PCI ;
- coûts d'exploitation (électricité, entretien courant et provisions pour grosses réparations) : valeur moyenne = 9 100 € HT/an ;
- investissement : valeur moyenne = 170 000 € HT environ ;
- aide publique : valeur moyenne = 77 000 € environ.

Il apparaît que les paramètres les plus influents dans le coût global de l'énergie granulés sont, par ordre décroissant d'importance :

- **le prix des granulés**, largement devant tous les autres paramètres ;
- **l'intermittence d'usage** des bâtiments (ratio E/Pbois) ;
- dans une moindre mesure, la taille de l'établissement ou la rigueur climatique (E), le niveau d'investissement et d'aide publique, les coûts d'exploitation et le prix de l'énergie fossile utilisée en appoint/secours.

Comme dans le cadre de la simulation précédente, le paramètre E est peu influent en pourcentage, mais il est amené à varier dans une plage bien plus importante que les autres paramètres. Son influence est donc non négligeable sur l'ensemble de sa plage de variation.

Figure 7 : Influence relative de la variation de paramètres techniques et économiques sur le coût global de l'énergie granulés



Cette analyse met en évidence **le rôle majeur des producteurs et distributeurs de granulés dans le coût global de l'énergie**. S'il convient systématiquement d'agir, au stade de la conception des installations comme de l'appel d'offres, pour minimiser les coûts d'investissement et d'exploitation, **c'est bien le prix des granulés qui est le paramètre variable le plus influent sur le coût global de l'énergie**.

Les simulations conduites par la suite ne feront intervenir que les trois paramètres les plus influents : le prix des granulés, l'intermittence d'usage des bâtiments (E/Pbois) et la taille de l'établissement ou la rigueur climatique (E), qui présente un fort impact du fait de sa très large plage de variation.

2.3 Le point de vue du maître d'ouvrage : la solution la moins coûteuse à taux d'aide publique fixé

On conduit ci-dessous les simulations suivantes :

Pour chaque type d'usage des bâtiments raccordés à la chaufferie dédiée (Logement : E/Pbois = 4 000 heures, Sanitaire et Social, E/Pbois = 4 800 heures, Scolaire et Tertiaire : E/Pbois = 3 200 heures), et pour **une gamme de puissance variant entre 80 et 500 kW** (ce qui correspond à une plage de variation de la quantité d'énergie délivrée différente pour chaque secteur, allant respectivement de 300 à 2 000 MWh utiles/an pour le logement, 400 à 2 400 MWh utiles/an pour le secteur sanitaire et social et 250 à 1 600 MWh utiles/an pour les secteurs scolaire et tertiaire), on calcule la facture énergétique en coût global des trois solutions suivantes :

- chaufferie à énergie fossile ;
- chaufferie aux plaquettes ;
- chaufferie aux granulés.

L'objectif recherché est ici de faire ressortir **la solution technique la plus avantageuse en coût global du point de vue de l'utilisateur final de la chaleur, pour un taux d'aide publique fixé à 50 % du montant éligible des investissements** (hors investissement dans l'appoint/secours fossile, taux théorique, à ne pas considérer comme systématique) et pour un prix des granulés variant entre 180 et 220 € HT/tonne.

Ces simulations sont conduites :

- en considérant un prix des énergies fossiles bas (prix moyen du gaz naturel de niveau 3 sur les années 2009 et 2010, soit 42 € HT/MWh PCI) ;
- en considérant un prix des énergies fossiles haut (prix moyen du fioul domestique sur les années 2009 et 2010, soit 56 € HT/MWh PCI).

Les résultats de ces simulations sont synthétisés sur les deux graphiques de la figure 8 suivante, tous deux décomposés en quatre quarts qui peuvent se lire indépendamment :

- quart haut-droit, le **logement collectif** (E/Pbois = 4 000 heures) :
 - o Face à un cours des énergies fossiles bas, les granulés ne sont économiquement compétitifs que pour un prix maîtrisé (180 € HT/tonne) et un projet de taille modeste (besoins inférieurs à 1 200 MWh utiles/an environ). Au-delà de 1 000 à 1 200 MWh utiles/an, le chauffage aux plaquettes devient plus compétitif face aux énergies fossiles et aux granulés,
 - o Face à un cours des énergies fossiles haut, les granulés ne sont en concurrence que face aux plaquettes. Ils sont économiquement compétitifs pour des établissements de taille modeste (moins de 1 400 MWh utiles/an), avec une plus grande latitude sur le prix des granulés.
- quart bas-droit, le **secteur sanitaire et social** (E/Pbois = 4 800 heures) : des conclusions identiques peuvent être tirées, les seuils de pertinence des granulés glissant plus vers les établissements de petite taille et les prix des granulés bas. On notera par ailleurs sur cette partie du graphique que le seuil du Fonds Chaleur (100 tep/an d'énergie bois produite), qui s'accompagne de la nécessité d'une filtration complémentaire, renchérit suffisamment le coût global des énergies bois (granulés et plaquettes) pour redonner une plage de pertinence aux énergies fossiles (cours bas uniquement). Le renchérissement de l'énergie bois dû à la filtration est réel pour chacun des secteurs. Cependant, le pas d'évolution choisi pour les variables ne permet pas systématiquement de l'observer sur les graphiques.

CIBE

- Quart bas-gauche, les **établissements scolaires** (E/Pbois = 3 200 heures) : la forte intermittence d'occupation des établissements scolaires permet d'élargir sensiblement la zone de pertinence économique des granulés face aux plaquettes. Par ailleurs, ces bâtiments sont généralement soumis à un cours du gaz naturel plus élevé (application de la TICGN pour les clients non résidentiels notamment). La zone de pertinence des granulés face aux énergies fossile s'élargit donc également ;
- Quart haut-gauche, les **établissements tertiaires** (E/Pbois = 3 200 heures) : des conclusions identiques peuvent être tirées pour ce type d'établissement. Seules les modalités d'application de la TVA sur les investissements font évoluer les comparaisons par rapport au cas précédent.

Il apparaît que, à taux d'aide publique constant :

- face à un cours des énergies fossiles bas (gaz naturel, graphique du haut), les granulés, comme les plaquettes, ne peuvent concurrencer les énergies fossiles au plan économique que pour des coûts de combustibles très bas. Face à un cours des énergies fossiles élevé (fioul, graphique du bas), les zones de pertinence des granulés et des plaquettes sont plus étendues. **L'intérêt économique des granulés est donc, au même titre que celui des plaquettes, très dépendant du cours des énergies fossiles ;**
- la zone de pertinence du chauffage aux granulés se concentre sur des **établissements de taille modeste** (centre des graphiques) présentant de **fortes intermittences d'occupation** (secteurs scolaire et tertiaire).

Encart 2 : L'impact de la filtration pour les chaufferies granulés produisant plus de 100 tep/an d'énergie renouvelable

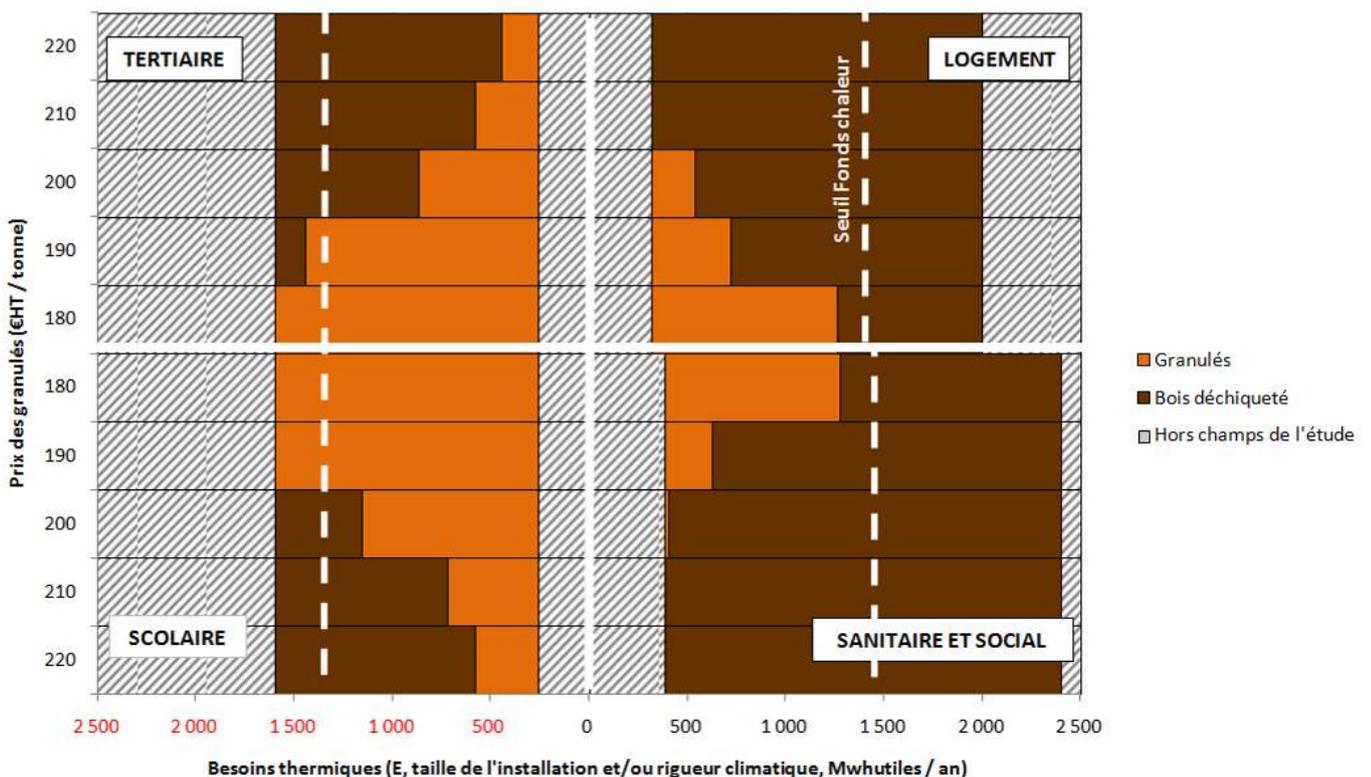
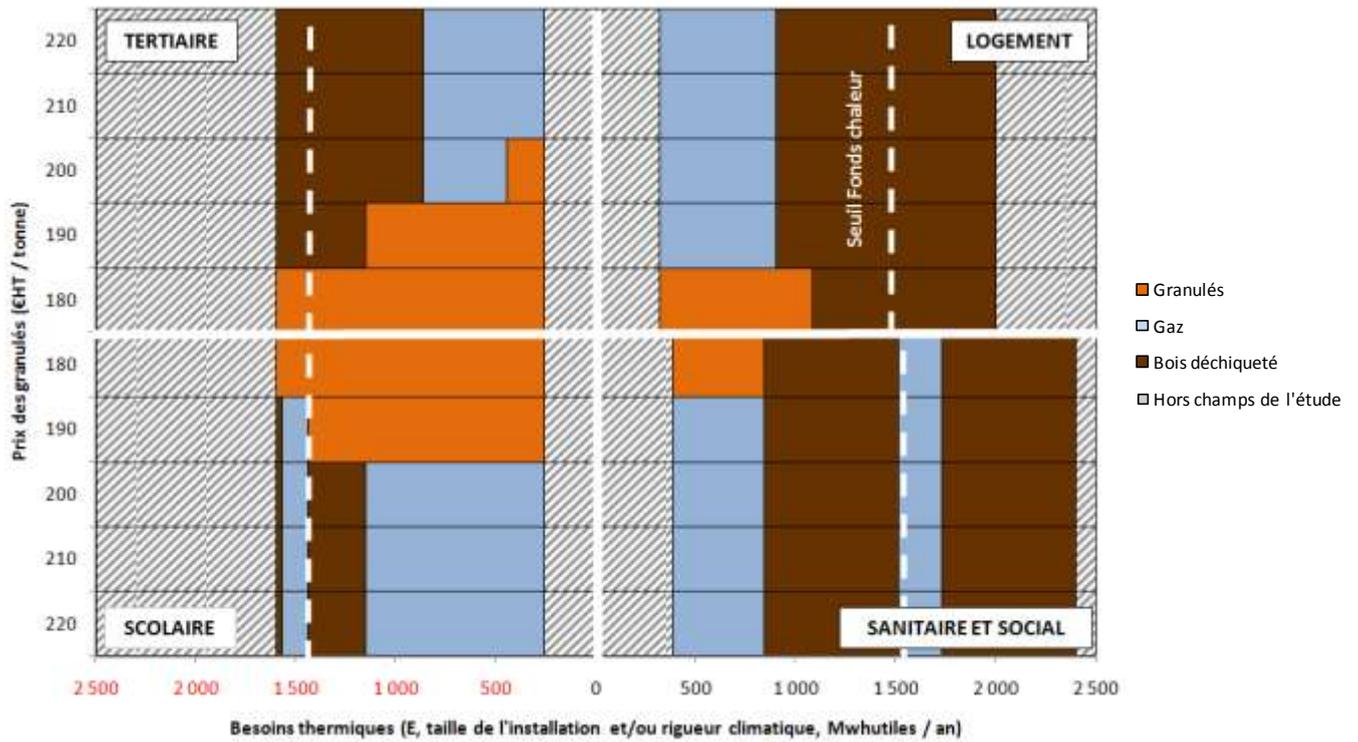
On observe que l'exigence de filtration complémentaire pour les plus petits projets entrant dans le cadre du Fonds Chaleur renouvelable présente un impact non négligeable sur la rentabilité des projets, matérialisé pour certains secteurs par le retour du gaz naturel comme solution technique concurrentielle pour des projets produisant 100 à 150 tep/an. Comme précisé précédemment, il a été choisi de considérer l'installation d'un filtre complémentaire pour les chaufferies aux granulés et aux plaquettes dès lors que la production dépasse 100 tep/an (cadre du Fonds Chaleur renouvelable).

L'impact de la filtration complémentaire pour les chaudières aux granulés a été simulé sur deux cas de chaufferies dédiées produisant 100 tep/an d'énergie biomasse pour alimenter des logements, d'une part et un établissement scolaire, d'autre part.

L'abandon du système de filtration complémentaire conduirait à réduire le coût de la chaleur granulés de 3 à 3,5 %. Dans le premier cas de figure (logements), ce gain ne suffit pas à proposer un prix de la chaleur inférieur à celui des plaquettes. Dans le second cas, plus favorable au chauffage aux granulés du fait de l'intermittence d'occupation des locaux, la solution granulés devient plus intéressante en coût global que la solution plaquettes.

L'exigence de filtration peut donc avoir un impact non négligeable sur l'équilibre économique des plus petits projets entrant dans le champ d'application du Fonds Chaleur. Il conviendrait d'analyser en laboratoire et sur site les émissions de poussières de plusieurs chaudières aux granulés dans la gamme de puissance considérée (à partir de 400 kW) pour vérifier la nécessité d'imposer ou non une filtration complémentaire pour ce type de matériel.

Figure 8 : Solution technique la plus avantageuse en coût global pour l'utilisateur final de la chaleur en fonction de la quantité d'énergie délivrée (E), de l'intermittence d'occupation des bâtiments (Logement, Sanitaire et social, Scolaire, Tertiaire), du prix des granulés et pour un taux d'aide publique fixé à 50 %. Face au gaz naturel (haut) et au fioul domestique (bas)



2.4 Le point de vue de l'organisme financeur : le niveau d'aide nécessaire pour atteindre 5 % d'économie en coût global face à une énergie de référence fossile

Les simulations conduites précédemment considèrent d'un taux d'aide public identique (fixé à 50 % de l'assiette éligible d'investissement) pour les solutions granulés et plaquettes.

Cette hypothèse implique une comparaison moins favorable aux granulés qu'aux plaquettes. En effet, à puissance équivalente, les montants d'investissement dans une installation aux granulés sont généralement inférieurs à ceux d'une installation aux plaquettes. **Un taux de 50 % d'aide publique correspond donc en valeur absolue à un recours à l'aide publique moindre pour une chaufferie aux granulés.**

On propose d'illustrer ce point dans les simulations suivantes (cf figure 9), où l'on analyse **l'efficacité de l'aide publique (€ d'aide publique/tep produites sur 20 ans⁵) nécessaire pour atteindre un niveau d'économie de 5 % en coût global par rapport à une situation de référence aux énergies fossiles** (cours intermédiaire considéré à 46 € HT/MWh PCI) dans les deux cas de figure suivants :

- une chaufferie aux granulés ou aux plaquettes pour un bâtiment du secteur tertiaire ;
- une chaufferie aux granulés ou aux plaquettes pour un ensemble de logements collectifs.

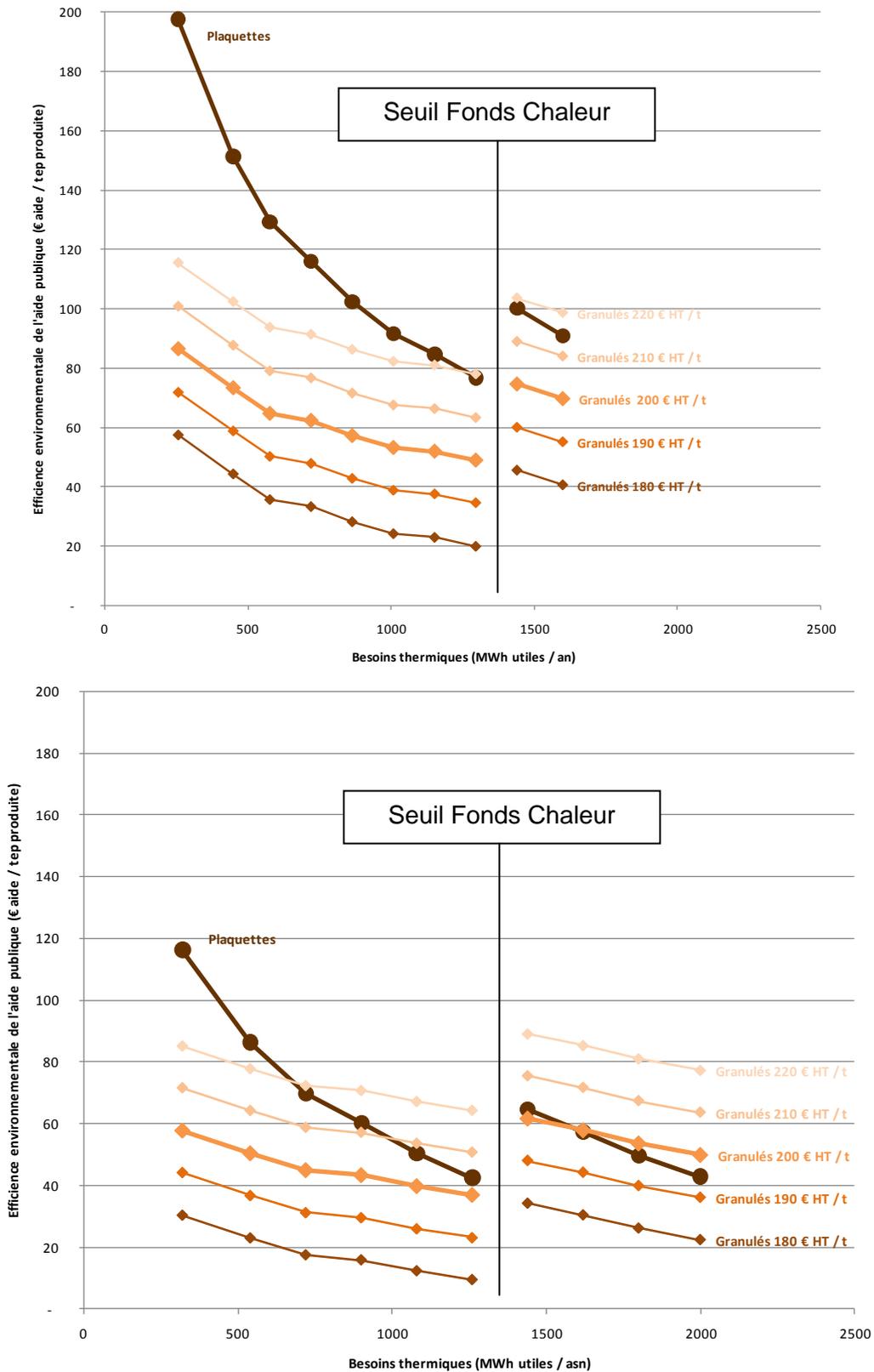
On peut conclure de ces simulations les éléments suivants :

- pour un établissement tertiaire, **l'efficacité environnementale de l'aide publique d'un projet granulés est meilleure que celle d'un projet plaquettes**, et ce quel que soit le prix des granulés. Cependant, l'effet d'échelle propre aux chaufferies plaquettes apparaît nettement : pour des projets entrant dans le cadre du Fonds Chaleur (production de chaleur biomasse supérieure à 100 tep/an), les efficacités environnementales des deux solutions techniques deviennent comparables ;
- pour un groupe de logements collectifs, **l'aide publique est nettement plus efficace** : quelle que soit la solution technique privilégiée, elle varie entre 200 et 2 500 € aides/tep produite, contre une plage bien plus large de 400 à 4 000 € aides/tep produite dans le cadre d'un établissement tertiaire. Par ailleurs, l'intermittence d'occupation des logements collectifs est plus favorable à l'usage des plaquettes ; **à partir d'une quantité d'énergie consommée de l'ordre de 1 000 à 1 300 MWh utiles/an, l'efficacité environnementale de l'aide publique est comparable pour les deux solutions techniques.**

On notera enfin que dans les deux cas étudiés, le taux d'aide publique mobilisé (en %) est quasi systématiquement supérieur pour la technologie granulés, même si l'efficacité environnementale de l'aide est meilleure. Il convient donc pour l'organisme financeur de **ne pas s'arrêter à la seule analyse du taux d'aide publique** (qui pourrait conduire au rejet du financement de certains projets présentant un taux d'aide supérieur 60 % par exemple), mais de **prendre en compte l'aide attribuée en valeur absolue ou ramenée à la quantité d'énergie produite.**

⁵ L'efficacité environnementale de l'aide publique (€ aide / tep produites) peut se calculer sur une année de production ou sur la durée de vie de l'équipement. Il a été choisi de la calculer sur 20 ans pour les chaufferies dédiées comme pour les réseaux de chaleur afin de conserver une cohérence dans la démarche, de façon indépendante de la durée d'amortissement des installations.

Figure 9 : Efficience environnementale de l'aide publique (€ aide/tep produites sur 20 ans) permettant d'atteindre un niveau d'économie en coût global de 5 % par rapport à une référence fossile (cours intermédiaire) pour un bâtiment du secteur tertiaire (haut) et pour un groupe de logements collectifs (bas) en fonction de la taille de l'établissement et du prix des granulés.



2.5 Synthèse

Cette première partie de l'étude a permis de mettre en évidence les points suivants :

- **la rentabilité des projets bois (granulés et plaquettes) est très dépendante du cours des énergies fossiles.** Aussi, les conclusions de cette analyse, qui se fondent sur les cours actuels des énergies fossiles (moyennes sur 2009 et 2010), peuvent être amenées à évoluer dans les années à venir en cas de renchérissement important du prix du gaz naturel et du fioul domestique ;
- le coût global de l'énergie fossile dépend quasi-uniquement du prix de l'énergie fossile. Celui de l'énergie plaquettes dépend quant à lui de plusieurs paramètres, parmi lesquels le plus influent est l'intermittence d'occupation des bâtiments chauffés. **L'évolution du coût global de l'énergie issue d'une chaufferie dédiée aux granulés (80 à 500 kW) est intermédiaire entre l'évolution observée pour les chaufferies gaz et fioul, d'une part et les chaufferies aux plaquettes, d'autre part.** Si son influence est moindre que celle du gaz ou du fioul pour les chaufferies aux énergies fossiles, le prix des granulés est cependant le paramètre le plus influent dans l'évolution du coût global de l'énergie granulés, devant notamment l'intermittence d'occupation des bâtiments chauffés ;
- l'intermittence d'occupation des locaux chauffés et, dans une moindre mesure, leur taille ou la rigueur climatique, jouent un rôle important dans le coût global de la chaleur bois. **Ce sont les bâtiments fortement intermittents** (établissements scolaires, bâtiments tertiaires) **et de taille modeste** (production d'énergie renouvelable inférieure à 100 à 150 tep / an) qui constituent **la cible de développement principale du chauffage collectif aux granulés ;**
- à quantité d'énergies renouvelables produites équivalente, **une chaufferie aux granulés nécessite en valeur absolue un recours moindre à l'aide publique qu'une chaufferie aux plaquettes,** notamment pour les établissements qui constituent la cible de développement principale du chauffage collectif aux granulés tels que définis ci-dessus. Il convient donc, à l'occasion de l'étude des dossiers de demande de financement, de s'attacher plus au niveau d'aide en valeur absolue (ou ramené à la tep produite) qu'au taux de l'aide publique, qui peut, notamment si le prix des granulés est élevé, atteindre des niveaux supérieurs à 60 %.

3. Les autres cas de figure étudiés

3.1 Une chaufferie aux granulés sur un réseau de chaleur

On parle de réseau de chaleur lorsque qu'une chaufferie centrale alimente, par l'intermédiaire de canalisations enterrées et de points de livraison avec comptage, **plusieurs bâtiments appartenant à des maîtres d'ouvrage différents**. Dans le cadre de cette approche, le réseau de chaleur délivre de l'énergie à plusieurs bâtiments présentant éventuellement des profils de consommation différents (logements, sanitaire et social, scolaire et tertiaire).

Si elle s'exprime différemment, la facture énergétique en coût global de la chaleur délivrée par le réseau comporte des postes de charge similaires à ceux d'une chaufferie dédiée. Cependant, l'abonné au réseau de chaleur, au même titre que l'abonné au réseau de gaz naturel ou d'électricité, achète une énergie à l'autorité organisatrice du service public ou à son concessionnaire en deux termes :

- **un terme proportionnel aux quantités d'énergie consommées** (R1, en €/MWh utile livré en sous-station), qui reflète les charges d'achat de combustible ;
- **un abonnement généralement mis en relation avec la puissance souscrite** de l'abonné (R2, en €/kW), qui reflète les charges fixes liées à la production et à la distribution de l'énergie calorifique (électricité force motrice, entretien courant des installations, provisions pour grosses réparations et financement des investissements).

Contrairement aux autres services publics de distribution d'énergie, les autorités organisatrices des réseaux de chaleur proposent généralement aux abonnés une grande transparence dans la décomposition des coûts nécessaires à la production et à la distribution de chaleur en pied d'immeuble.

Les simulations conduites ci-dessous correspondent à deux cas particuliers. Elles ne peuvent pas se substituer à des études de faisabilité spécifiques, nécessaire pour tenir compte de l'extrême diversité des cas de figure rencontrés.

3.1.1 L'usage des granulés pour un réseau de chaleur de moyenne puissance

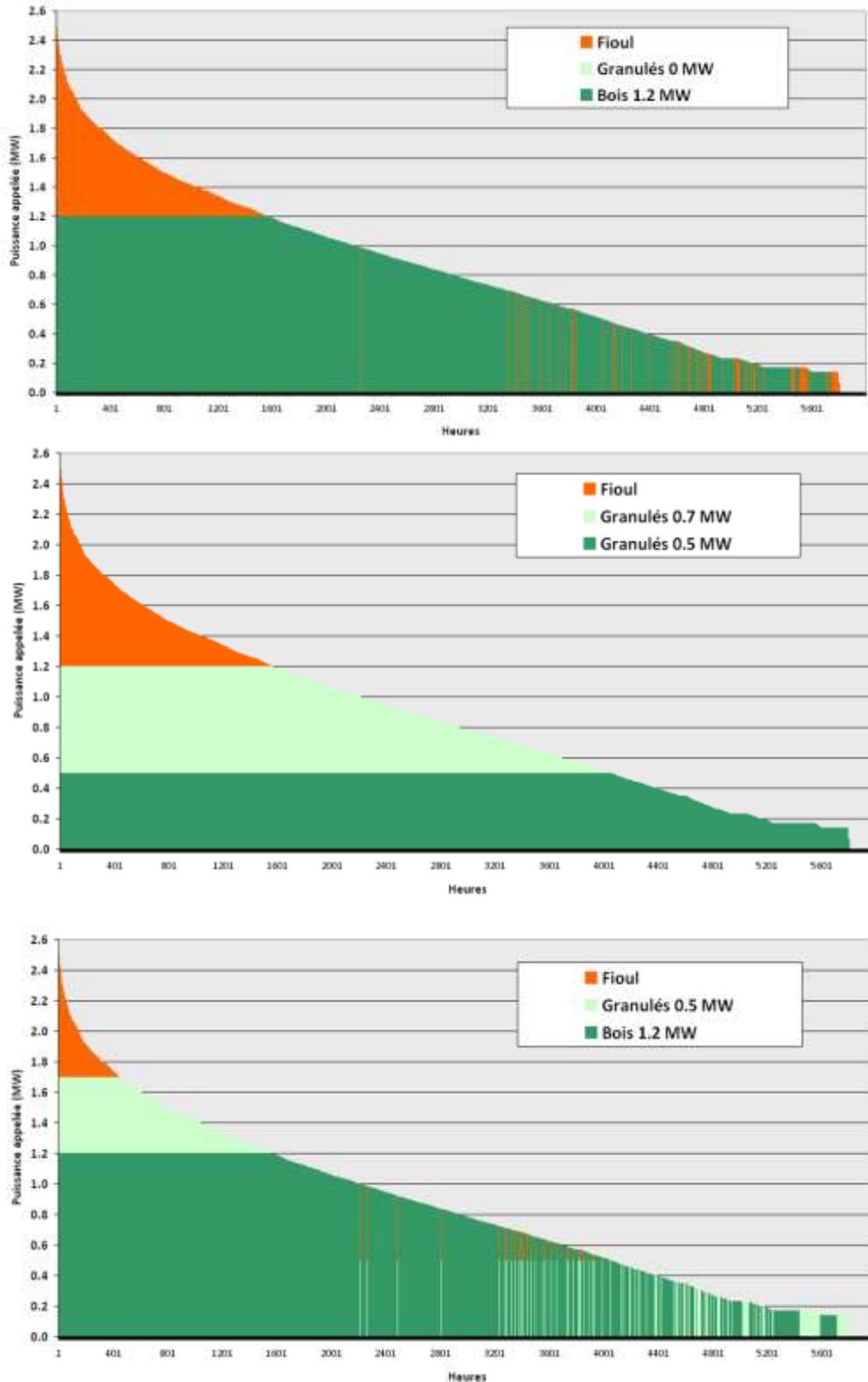
On considère ci-dessous la création d'un réseau de chaleur alimenté par une chaufferie centrale biomasse/énergie fossile et délivrant 4 600 MWh utiles/an (chauffage et eau chaude sanitaire) à trois groupes de logements collectifs, deux maisons de retraite, une piscine, un complexe sportif, une école maternelle et une crèche. Le linéaire de réseau à créer est de 1 500 ml.

On propose d'évaluer le coût global moyen de la chaleur vendue aux abonnés dans les trois configurations suivantes :

- chaufferie centrale bi-énergie plaquettes (1,2 MW)/énergie fossile (2,5 MW), qui correspond à la situation couramment étudiée sur des réseaux de chaleur en création ;
- chaufferie centrale bi-énergie granulés (0,5 + 0,7 MW)/énergie fossile (2,5 MW) ;
- chaufferie centrale tri-énergie plaquettes (1,2 MW)/granulés (0,5 MW)/énergie fossile (2,5 MW), la chaudière aux granulés fonctionnant :
 - o en période estivale : pour la production d'eau chaude sanitaire et le maintien en température des bassins de la piscine,
 - o en période hivernale : en demi-base de la chaudière aux plaquettes.

Dans les trois cas de figure, l'énergie fossile permet d'assurer l'appoint en période de très grand froid et le secours total de l'installation.

Figure 10 : Courbe des appels de puissance sur le réseau dans les trois cas de figure étudiés : plaquettes/énergie fossile (haut), granulés/énergie fossile (milieu) et plaquettes/granulés/énergie fossile (bas)



Les caractéristiques des trois solutions étudiées sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Caractéristiques techniques des trois solutions étudiées

		Plaquettes/EF (1)	Granulés/EF (2)	Plaquettes/granulés /EF (3)
Energie distribuée en sous-station (MWh utiles/an)		4 600	4 600	4 600
Longueur de réseau (ml)		1 500	1 500	1 500
Puissance chaudières (MW)	Plaquettes	1,2	0	1,2
	Granulés	0	0,7 + 0,5	0,5
	Energie fossile	2,5	2,5	2,5
Taux de couverture (%)	Plaquettes	80 %	0 %	79 %
	Granulés	0 %	86 %	13 %
	Energie fossile	20 %	14 %	8 %
Production énergie biomasse (tep/an)	Plaquettes	346	0	339
	Granulés	0	368	56
	Total	346	368	395

En intégrant un système de filtration permettant de limiter les rejets atmosphériques de poussières à moins de 50 mg/Nm³ dans chacun des trois cas de figure et en limitant le taux de subvention mobilisable à 60 % (limite de l'encadrement communautaire dans le cas général), on définit les investissements et les aides publiques (Fonds Chaleur renouvelable) comme suit :

Tableau 4 : Investissements et aides publiques des trois solutions étudiées

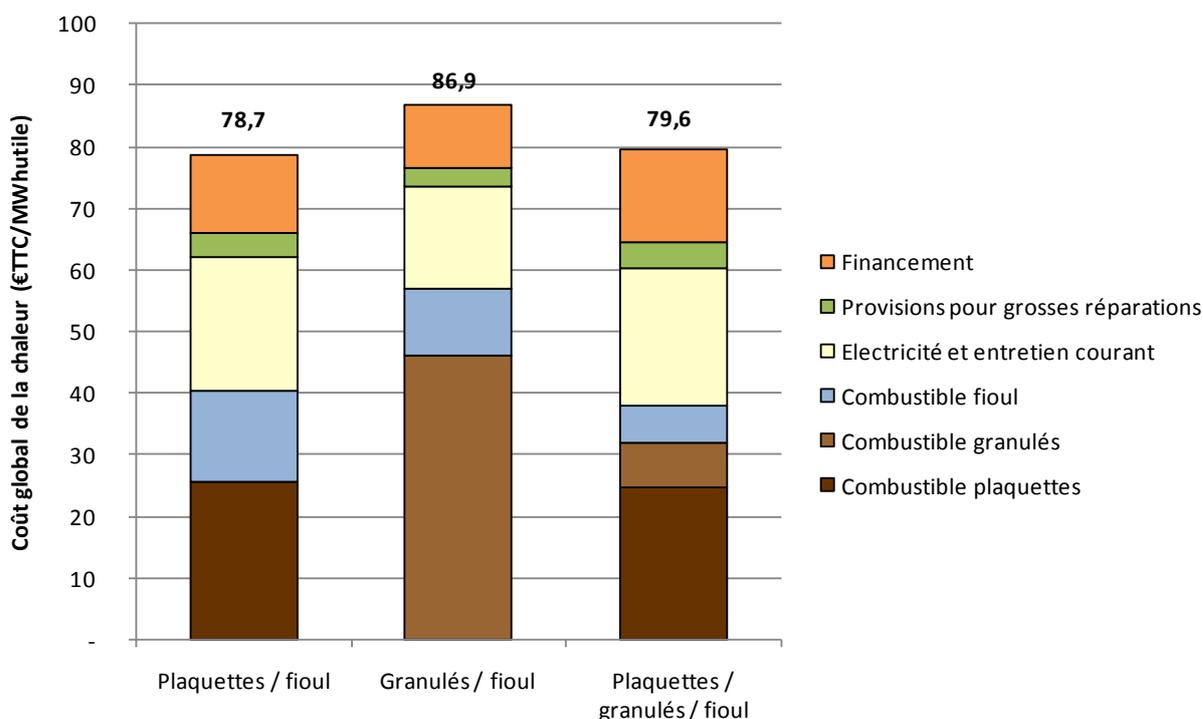
		Plaquettes/EF (1)	Granulés/EF (2)	Plaquettes/granulés /EF (3)
Investissements (€ HT)	Chaudières bois et filtration	360 000	300 000	480 000
	Equipements chaufferie (hors hydraulique)	100 000	100 000	105 000
	Réseau et sous-stations (dont hydraulique chaufferie)	770 000	765 000	775 000
	Génie civil	350 000	180 000	395 000
	Ingénierie, études, divers	190 000	160 000	210 000
	Total	1 770 000	1 505 000	1 965 000
Montant aides Fonds Chaleur calculé (€)		1 019 500	1 044 000	1 083 750
Taux aide Fonds Chaleur calculé (%)		58 %	69 %	55 %
Taux aide retenu (%)		58 %	60 %	55 %
Montant aides retenu (€)		1 019 500	903 000	1 083 750
Efficience environnementale de l'aide (€ aide / tep produite sur 20 ans)		147	123	137

On notera que bien que le taux d'aide public soit supérieur dans le cas d'une chaufferie aux granulés, le montant en valeur absolu reste inférieur à celui des deux autres solutions. C'est pourquoi en termes d'efficacité environnementale de l'aide publique, la solution granulés présente un ratio d'aide publique par tep produite (sur la durée de vie du réseau) plus pertinent que ses concurrentes.

L'analyse du coût global de la chaleur dans chacun des trois cas de figure permet de mettre en évidence les points suivants :

- La solution 2 (granulés / énergie fossile) présente, du fait du coût unitaire moyen des granulés considéré (200 € HT / tonne), le coût global de la chaleur le plus élevé. Elle est équivalente à la solution 1 (plaquettes / énergie fossile) pour un coût des granulés de l'ordre de 160 € HT / tonne (coût inférieur à la fourchette basse considérée dans cette approche), les plaquettes restant considérées à 22 € HT / MWh PCI.
- La solution 3 (plaquettes / granulés / énergie fossile), bien qu'elle soit encore assez peu étudiée par la profession, présente **un coût global quasiment identique** (surcoût de 1 %) **à celui de la solution 1** (plaquettes / énergie fossile), généralement privilégiée au stade des études. L'usage des granulés en appoint d'une chaudière aux plaquettes présente donc, par rapport à une solution conventionnelle privilégiant les plaquettes en base et l'énergie fossile en appoint / secours :
 - o un intérêt environnemental supérieur, puisqu'il permet de substituer plus d'énergie fossile (taux de couverture des besoins par la biomasse supérieur à 90 %) ;
 - o un intérêt économique identique pour les usagers du réseau ;
 - o une efficacité environnementale de l'aide publique plus pertinente.

Figure 11 : La décomposition du coût global de l'énergie dans les trois cas de figure étudiés.



3.1.2 L'usage des granulés dans le cadre de la montée en puissance des besoins d'un réseau de chaleur : l'exemple d'une ZAC de logements neufs

La création d'un réseau de chaleur doit s'accompagner d'une réflexion sur le long terme. Les installations mises en place doivent ainsi permettre d'anticiper les évolutions prévisionnelles des besoins du réseau :

- à la baisse (travaux d'isolation sur les bâtiments raccordés, déraccordement ou déconstructions) ;
- à la hausse (nouveaux raccordements, programme d'aménagement s'étendant sur plusieurs années).

On choisit d'illustrer ce point par l'analyse de la création d'une ZAC de logements, livrés en trois tranches de 150 unités. Le réseau de chaleur alimentera donc :

- 150 logements en années 1 à 3 (besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire de 750 MWh utiles / an) ;
- 300 logements en années 4 à 6 (besoins = 1 500 MWh utiles / an) ;
- 450 logements en années 7 à 25 (besoins = 2 250 MWh utiles / an).

Il peut être envisagé la mise en œuvre des trois solutions suivantes :

- Solution 1 : Création d'une **chaufferie centrale bi-énergie plaquettes / énergie fossile** optimisée pour un fonctionnement en régime établi (à partir de l'année 7). Le taux de couverture des besoins par le bois est très dégradé lors des premières années (50 % pour les années 1 à 3, 60 % pour les années 4 à 6 et 80 % à partir de l'année 7), du fait du surdimensionnement initial de la chaudière. Pendant cette période, la chaudière bois fonctionne à un taux de charge moyen faible (arrêts en demi-saison notamment), ce qui peut sur le long terme dégrader le matériel.
- Solution 2 : Création de **trois chaufferies bi-énergie granulés / énergie fossile** dédiées à chacune des trois tranches de logements et dimensionnées pour les besoins de chaque tranche. Cette solution présente l'avantage d'un dimensionnement optimisé en fonction de l'existant, évitant ainsi tout risque de surdimensionnement sur le long terme en cas de retard de livraison des tranches 2 et 3. Par contre, l'analyse économique tient pour acquis que le maître d'ouvrage pourra bénéficier des mêmes aides publiques en années 4 et 7 que celles obtenues en année 1.
- Solution 3 : Création d'une **chaufferie centrale tri-énergie plaquettes / granulés / énergie fossile** dimensionnée pour tenir compte de la montée en puissance du réseau. Lors des premières années de fonctionnement, la chaudière aux granulés fonctionne en base du réseau et la chaudière aux plaquettes ne fonctionne que les jours les plus froids de l'année. En régime permanent, la chaudière aux plaquettes fonctionne en base du réseau et la chaudière aux granulés fonctionne en appoint.

Tableau 5 : Caractéristiques techniques des trois solutions étudiées (régime établi)

		Plaquettes / EF (1)	3 chaufferies Granulés / EF (2)	Plaquettes / granulés / EF (3)
Energie distribuée en sous-station à partir de l'année 7 (MWh utiles / an)		2 250	2 250	2 250
Longueur de réseau (ml)		850	450	850
Puissance chaudières (MW)	Plaquettes	0,7	0	0,7
	Granulés	0	3 x (0,4 + 0,1)	0,4
	Energie fossile	1,5	3 x 0,5	1,5
Taux de couverture (%)	Plaquettes	80 %	0 %	78 %
	Granulés	0 %	98 %	19 %
	Fioul	20 %	2 %	3 %
Production d'énergie biomasse (tep / an)	Plaquettes	170	0	170
	Granulés	0	3 x 67	41
	Total	170	3 x 67	211

En intégrant un système de filtration permettant de limiter les rejets atmosphériques de poussières à moins de 50 mg / Nm³ dans les cas 1 et 3 (le cas 2 correspond à 3 projets n'entrant pas dans le cadre du Fonds chaleur renouvelable ; à ce titre, une filtration complémentaire n'est pas exigée) et en considérant un taux d'aide mobilisable de 48 % (application du Fonds chaleur pour les cas 1 et 3 et taux moyen résultant des dispositifs d'aides régionaux pour le cas 2 évalué à 50 % de l'assiette éligible – hors chaudière d'appoint-secours), les investissements à engager et les aides publiques mobilisables sont estimées comme suit :

Tableau 6 : Investissements et aides publiques des trois solutions étudiées

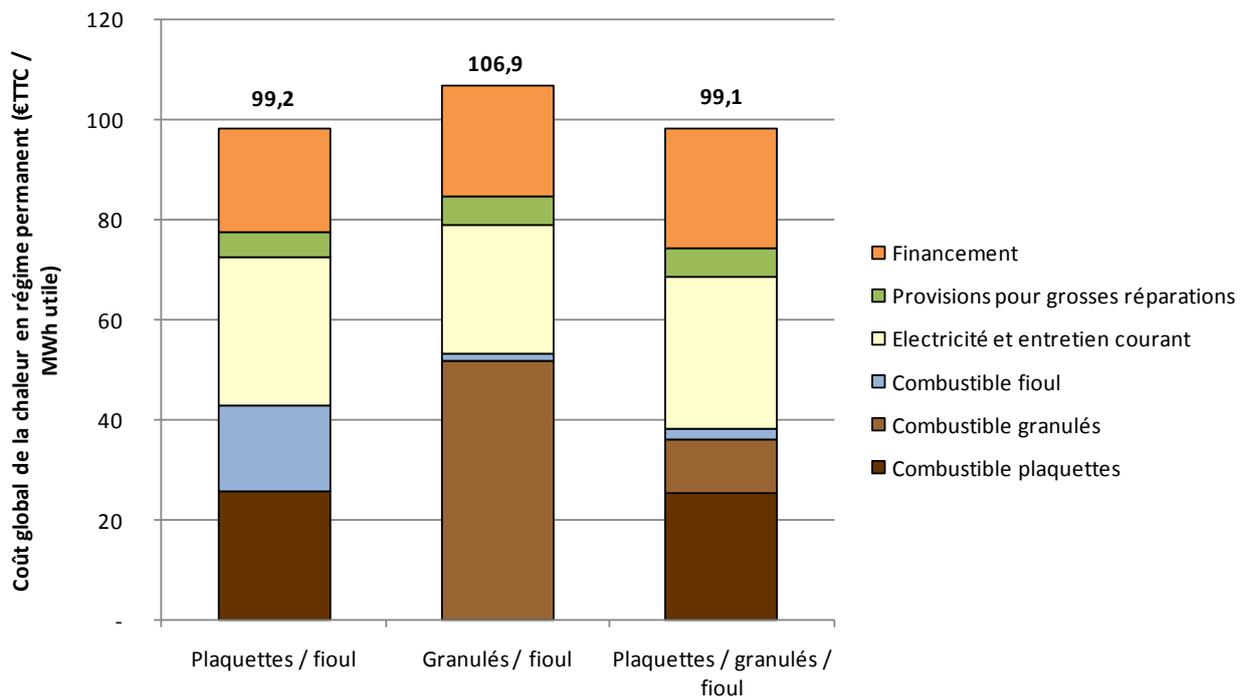
		Plaquettes / EF (1)	Granulés / EF (2)	Plaquettes / granulés / EF (3)
Investissements (€ HT)	Chaudières, filtration	270 000	330 000	380 000
	Equipements chaufferie (hors hydraulique)	60 000	105 000	65 000
	Réseau, sous-stations (dont hydraulique chaufferie)	415 000	280 000	420 000
	Génie civil	275 000	375 000	295 000
	Ingénierie, études, divers	120 000	130 000	140 000
	Total	1 140 000	1 220 000	1 300 000
Montant aides Fonds chaleur calculé (€)		546 500	-	621 250
Taux aide Fonds chaleur calculé (%)		48 %	-	48 %
Taux aide retenu (%)		48 %	48 %	48 %
Montant aides retenu (€)		546 500	587 500	621 250
Efficience environnementale de l'aide (€ aide / tep produite sur 20 ans)		161	146	147

• **Le coût global de la chaleur en régime établi (années 7 à 25)**

En régime établi, les conclusions de la partie précédente sont à nouveau observées :

- La solution 2 (granulés / énergie fossile) présente le coût global le plus élevé (106,9 € TTC / MWh utile).
- Les solutions 1 (plaquettes / énergie fossile) et 3 (plaquettes / granulés / énergie fossile) présentent un coût global de l'énergie plus faible et comparable.

Figure 12 : Coût global de l'énergie en régime établi (années 7 à 25) pour les trois cas de figure étudiés



• **Le coût global de la chaleur moyenné sur 25 ans**

Le mode de fonctionnement des trois cas étudiés sera très différent sur la période d'aménagement de la ZAC (années 1 à 6) :

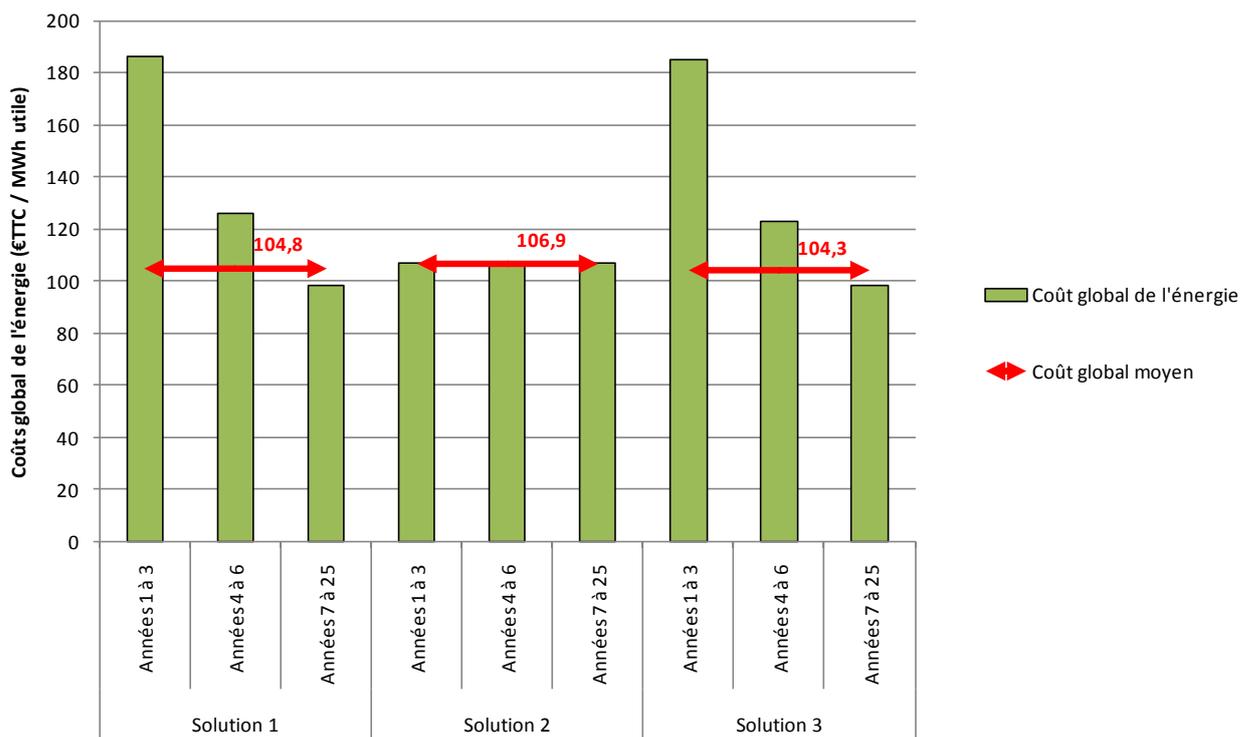
- **Solution 1** (chaufferie plaquettes / énergie fossile) : la fourniture d'énergie se répartit quasiment de façon identique entre la chaudière aux plaquettes et la chaudière au fioul tant que l'ensemble des logements ne sera pas livré. Lors des premières années, la consommation importante de fioul domestique renchérit sensiblement la facture énergétique en coût global.
- **Solution 2** (3 chaufferies aux granulés) : les chaufferies aux granulés présentent un fonctionnement identique sur l'ensemble de la période. La facture énergétique en coût global est donc stable sur l'ensemble de la période.
- **Solution 3** (chaufferie plaquettes / granulés / énergie fossile) : lors des premières années, la chaudière aux granulés fonctionnera quasiment autant que la chaudière aux plaquettes, l'énergie fossile n'assurant que le secours sur l'ensemble de la période. Le fonctionnement de la chaudière aux plaquettes reste donc optimisé même lors des premières phases de montée en puissance. Cependant, malgré un taux de couverture des besoins par le bois (plaquettes + granulés) important sur l'ensemble de la période, le surcoût d'investissement

renchérit fortement la facture énergétique en coût global lors des premières années de fonctionnement.

Lissé sur 25 années, **le coût global de la chaleur des trois solutions techniques étudiées est du même ordre de grandeur**. Afin de s'affranchir des risques techniques liés à un fonctionnement en sous-charge de la chaudière aux plaquettes lors des premières années (période pouvant en outre être allongée en cas de retard dans la livraison des tranches 2 et 3 de logements), on pourra privilégier l'une des deux solutions techniques valorisant des granulés. La solution 3 (plaquettes, granulés, énergie fossile) permet en outre de limiter le risque financier lié à une éventuelle évolution du contexte relatif à l'attribution des aides publiques en années 4 et 7.

On notera cependant que les modalités d'attribution des aides publiques dans le cadre du Fonds chaleur renouvelable s'accompagnent d'un contrôle des quantités d'énergie renouvelables produites sur les trois premières années de fonctionnement de l'installation. La montée en puissance du réseau sur plus de trois années nécessitera donc de convenir de dérogations aux modalités de contrôle pour permettre une mobilisation des aides calculées sur le régime établi de fonctionnement (année 7 à 25).

Figure 13 : Evolution du coût global de l'énergie pour chaque tranche de livraison et coût global lissé sur 25 ans pour les trois solutions étudiées



Il convient enfin de préciser que la facture énergétique moyenne sur 25 ans de la solution 1 est plus dépendante du cours des énergies fossile que celle des deux autres solutions. Son intérêt économique ira donc décroissant au fur et à mesure du renchérissement du gaz naturel et du fioul domestique.

3.1.3 Synthèse

Les granulés restent aujourd'hui très peu utilisés en France dans la conception des réseaux de chaleur de moyenne et forte puissance. Les acteurs de la filière privilégient en effet quasi-systématiquement un fonctionnement en bi-énergie plaquettes / énergie fossile. Les simulations conduites précédemment mettent en évidence les points suivants :

- L'usage des granulés en base d'un réseau de chaleur de moyenne puissance (chaufferie centrale bi-énergie granulés / énergie fossile) ne présente effectivement pas de pertinence économique marquée (avec les prix des combustibles considérés dans cette étude).
- Par contre, **l'usage des granulés en demi-base d'un réseau de chaleur (chaufferie centrale tri-énergie plaquettes / granulés / énergie fossile) présente de nombreux atouts :**
 - o un **coût global de la chaleur identique** à une solution bi-énergie plaquettes / énergie fossile ;
 - o un **intérêt environnemental plus marqué**, grâce à un taux de couverture global des besoins par la biomasse important ;
 - o une **efficacité environnementale de l'aide publique plus pertinente** ;
 - o une **solution satisfaisante** aux plans technique, économique et environnemental **dans le cas de la création d'un réseau de chaleur avec une évolution à la hausse programmée des besoins** (création d'une ZAC de logements), permettant notamment de limiter le risque technique dû à un fonctionnement de la chaudière plaquettes en sous-régime lors des premières années de fonctionnement.

3.2 Le choix entre une chaufferie dédiée aux granulés ou le raccordement à un réseau de chaleur aux plaquettes existant

Le dispositif Fonds chaleur renouvelable intègre un mécanisme d'aide spécifique relatif aux extensions de réseaux de chaleur alimentés par une énergie renouvelable. Il prévoit d'attribuer une aide s'élevant à 60 % du montant des investissements (linéaire de réseau à créer et distribution de l'énergie dans les nouveaux bâtiments raccordés) sous plusieurs réserves :

- Le nouveau bâtiment alimenté par le réseau doit consommer au minimum 25 tep d'énergie renouvelable tous les ans (soit des besoins totaux d'environ 300 MWh utiles / an).
- Le linéaire de réseau à créer doit être supérieur à 200 ml.
- La densité thermique linéaire de la nouvelle branche de réseau doit être supérieure à 1,5 MWh utiles / ml.

Les modalités a priori avantageuses du Fonds chaleur peuvent parfois conduire les maîtres d'ouvrage à privilégier un raccordement systématique au réseau sans analyser de solution alternative. On propose de présenter ci-dessous la comparaison de l'intérêt économique du raccordement à un réseau de chaleur aux plaquettes d'un bâtiment de logements collectifs et d'un établissement scolaire, en comparaison à la création d'une chaufferie dédiée aux granulés des points de vue :

- de **l'utilisateur final de la chaleur** (solution la plus avantageuse en coût global) ;
- de **l'organisme financeur** (efficacité environnementale de l'aide publique en € / tep produite, sur la base des grilles du Fonds chaleur).

3.2.1 Le point de vue du maître d'ouvrage

On représente ci-dessous **la solution technique la plus avantageuse en coût global** ramené à l'unité de chaleur produite (€ TTC / MWh utile) pour un groupe de logements collectifs (graphique du haut) et un bâtiment scolaire (graphique du bas) en fonction :

- de la distance du bâtiment à la chaufferie centrale du réseau à étendre (création d'une branche de réseau spécifique) ;
- de la taille du groupe de logements ou de l'établissement scolaire (en MWh utiles / an).

Le prix des granulés est fixé à 200 € HT / tonne.

Les besoins thermiques délivrés par le réseau sont considérés à 12 000 MWh utiles / an pour une puissance souscrite de 6 600 kW. Le coût moyen de la chaleur délivrée par le réseau est évalué à 70,2 € TTC / MWh utile, avec une décomposition en deux termes :

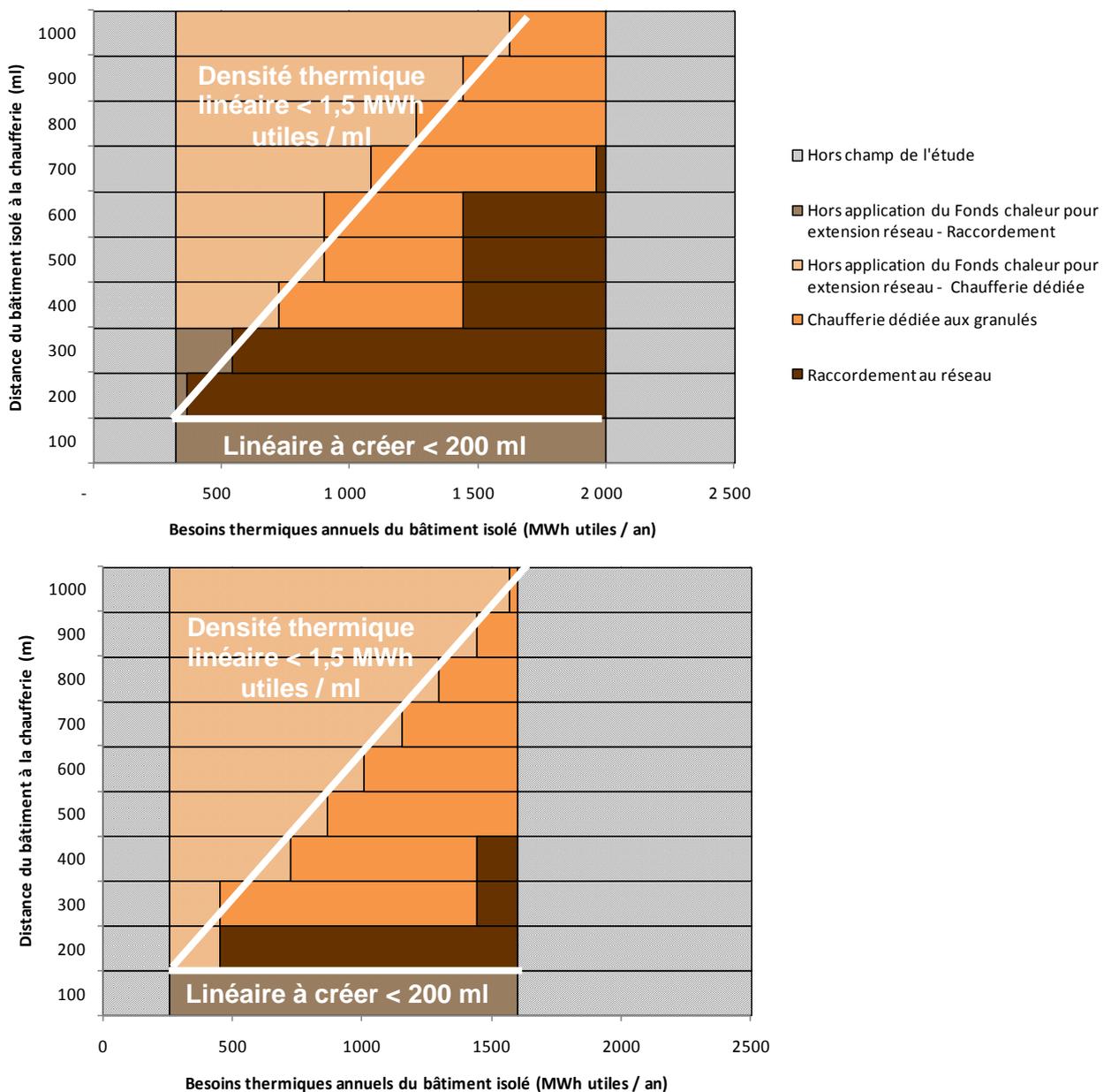
- R1 (combustible) = 35,0 € TTC / MWh utiles.
- R2 (abonnement, part fixe) = 64,0 € TTC / kW.

Les coûts de raccordement d'un nouveau bâtiment à un réseau de chaleur existant font l'objet d'un financement spécifique qui peut, selon les cas de figure, être totalement pris en charge dans le cadre du service public de distribution de chaleur, ou laissés totalement ou partiellement à la charge du maître d'ouvrage demandeur. Aucune généralité ne peut être avancée sur ce point, qui fait l'objet de négociations entre le maître d'ouvrage, l'autorité organisatrice du service public et son éventuel délégataire.

Les taux de TVA appliqués sont de 5,5 % sur l'ensemble de la facture dans le cas du raccordement au réseau de chaleur. Ils restent compris entre 5,5 % et 19,6 % sur les différents postes de la facture selon les maîtres d'ouvrages pour la chaufferie dédiée.

L'analyse suivante, qui se fonde sur une prise en charge complète des coûts de raccordement par le maître d'ouvrage demandeur ne pourra donc pas être considérée comme une étude de faisabilité générale, mais vise à présenter les influences relatives de différents paramètres (linéaire de réseau à créer, taille, de l'établissement, intermittence d'usage) sur la rentabilité des différentes solutions techniques.

Figure 14 : Solution technique la plus avantageuse en coût global pour l'utilisateur final de la chaleur en fonction de la quantité d'énergie délivrée (E), de l'intermittence d'occupation des bâtiments (groupe de logements en haut et établissement scolaire en bas) et de la distance du bâtiment à la chaufferie centrale du réseau.



Cette simulation fait apparaître les points suivants :

- Le raccordement au réseau de chaleur au bois existant présente un intérêt économique pour le maître d'ouvrage lorsque **le bâtiment est localisé à proximité de la chaufferie centrale**.
- Dans le cas contraire, **la densité thermique linéaire de la branche de réseau à créer est un facteur déterminant dans la rentabilité économique de l'opération** : plus l'éloignement du bâtiment à la chaufferie centrale est important, plus il devra être consommateur de chaleur pour rentabiliser son raccordement.
- De même, **l'intermittence d'occupation des locaux doit être prise en considération** : la facturation de la chaleur aux bâtiments raccordés au réseau est fonction :
 - o De la quantité d'énergie consommée dans l'année (part proportionnelle)
 - o De la puissance souscrite sur le réseau (part fixe).

La facture énergétique en coût global d'un bâtiment raccordé au réseau sera d'autant moins élevée que le rapport entre les besoins thermiques annuels et la puissance souscrite sera important. Les bâtiments fortement intermittents (établissements scolaires par exemple) se voient donc généralement facturer un coût de la chaleur plus élevé que les bâtiments d'occupation plus continue (groupe de logements collectifs par exemple). On observe donc logiquement que le raccordement au réseau de logements collectifs présente une plage d'intérêt économique plus large que celui d'un établissement scolaire.

3.2.2 Le point de vue de l'organisme financeur

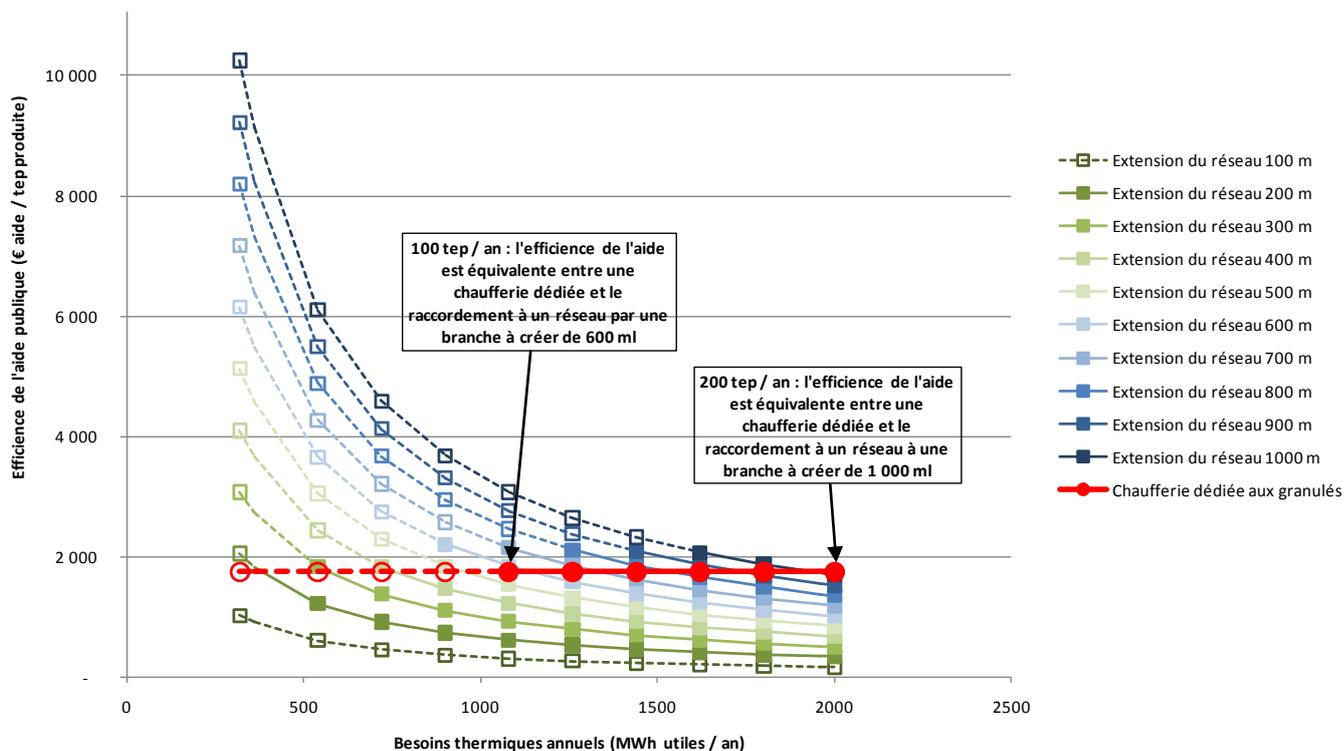
On considère ci-dessous l'aide publique attribuée aux maîtres d'ouvrage dans le cadre du Fonds chaleur renouvelable :

- Pour la création d'une chaufferie dédiée (1 750 € / tep produite dans la gamme de puissance étudiée).
- Pour le raccordement d'un bâtiment isolé à un réseau de chaleur au bois existant (60 % du montant des investissements dans le réseau et la distribution de chaleur).

Les résultats de cette simulation sont assez similaires d'un type d'établissement à l'autre. On ne présente donc ci-dessous que les résultats concernant un groupe de logements collectifs. Les principales conclusions de ces simulations sont les suivantes :

- Au sein de la plage d'application du Fonds chaleur renouvelable pour le raccordement au réseau (densité thermique linéaire supérieure à 1,5 MWh utile / ml), l'aide publique attribuée pour le raccordement au réseau existant est le plus souvent inférieure à celle attribuée pour la création d'une chaufferie dédiée.
- En dehors de la plage d'application du Fonds chaleur, l'aide publique est plus efficiente si elle est attribuée à la création d'une chaufferie dédiée.
- Pour les bâtiments produisant entre 25 et 100 tep / an (besoins thermiques compris entre environ 300 et 1 200 MWh utiles / an), et qui n'entre de ce fait pas dans le champ d'application du Fonds chaleur pour l'aide à la création de chaufferies dédiées, le raccordement à un réseau existant peut nécessiter un recours à l'aide publique important si le bâtiment est éloigné de la chaufferie centrale, mais permet d'alimenter un nouveau bâtiment en énergie biomasse dans des conditions environnementales optimales (pas de nécessité de nouvelles livraisons, filtration déjà opérationnelle sur la chaufferie centrale du réseau, mutualisation de l'entretien...).

Figure 15 : L'efficacité environnementale comparée de l'aide publique pour la création d'une chaufferie dédiée aux granulés et le raccordement à un réseau de chaleur existant. En pointillé : plages de variation en dehors du champ d'application du Fonds chaleur (chaufferie dédiée produisant moins de 100 tep / an d'énergie renouvelable, raccordement à un réseau de moins de 200 ml ou densité thermique de la branche raccordée inférieure à 1,5 MWh utile / ml)



3.2.3 Synthèse

Au sein du périmètre d'un réseau de chaleur au bois existant, le chauffage à partir de biomasse de tout nouveau bâtiment pourra s'envisager :

- Par la création d'une chaufferie dédiée (aux granulés, ou au bois déchiqueté selon les conclusions de la partie 2 du présent document) :
 - o dans les zones les plus éloignées de la chaufferie centrale,
 - o pour les bâtiments les moins consommateurs (densité thermique linéaire de la nouvelle branche de réseau faible),
 - o pour les bâtiments fortement intermittents (établissements scolaires et tertiaires).
- Par un raccordement au réseau pour les bâtiments consommateurs, peu intermittents (logements collectif, sanitaire et social) et situés à proximité de la chaufferie centrale.

Dans la plage d'application du Fonds chaleur pour l'extension de réseaux, l'efficacité de l'aide publique est plutôt meilleure dans le second cas de figure.

3.3 Un cas industriel

Certains secteurs industriels présentent d'importants besoins énergétiques, soit pour du chauffage (serres horticoles ou maraichères, élevage, séchage...), soit pour du process spécifique (maintien en température de bassins, vapeur...). Ces industriels sont donc très attentifs à l'évolution du cours des énergies fossiles, et s'intéressent à d'autres modes de chauffage alternatifs.

3.3.1 La « rentabilité » des projets en milieu industriel

Il est rare de raisonner en coût global de l'énergie au sein du milieu industriel. Un raisonnement en temps de retour brut (TRB) sur investissement est plus courant.

Ce mode de raisonnement analyse l'intérêt d'un projet par rapport à une situation de référence en rapportant son surcoût d'investissement aux gains de fonctionnement réalisés tous les ans. Il s'exprime en nombre d'années et présente les limites suivantes :

- Il ne tient pas compte de l'actualisation de la valeur de l'argent investi. Il est donc particulièrement adapté lorsque l'investissement est réalisé sur fonds propres.
- Il ne tient pas compte de la durée de vie (ou d'amortissement) des équipements.

On notera par ailleurs que le temps de retour brut :

- Favorise les solutions techniques présentant des surcoûts d'investissement faibles (granulés) aux solutions techniques coûteuses en investissement, même si ces dernières présentent un gain de fonctionnement plus important (plaquettes).
- Se calcule face à un cours des énergies fossiles élevés. En l'occurrence, une comparaison face au gaz naturel au tarif industriel (35 € HT / MWh PCI en moyenne sur les années 2009 et 2010) conduirait à des temps de retour négatifs pour la solutions granulés (le prix du gaz naturel considéré correspond à un coût des granulés de 175 € HT / tonne).

3.3.2 L'usage des granulés en milieu industriel

La simulation suivante concerne la production d'énergie d'un établissement industriel présentant :

- Des besoins de process stables sur l'année et représentant 2/3 de besoins énergétiques totaux.
- Des besoins de chauffage (bureaux par exemple) représentant 1/3 des besoins énergétiques totaux.

La simulation est effectuée sur une plage de besoins thermiques totaux allant de 560 à 3 500 MWh utiles / an, ce qui correspond à une puissance de chaudière biomasse (granulés ou plaquettes) de 80 à 500 kW (E/Pbois = 7 000 heures) et pour un prix des granulés compris entre 180 et 220 € HT / tonne.

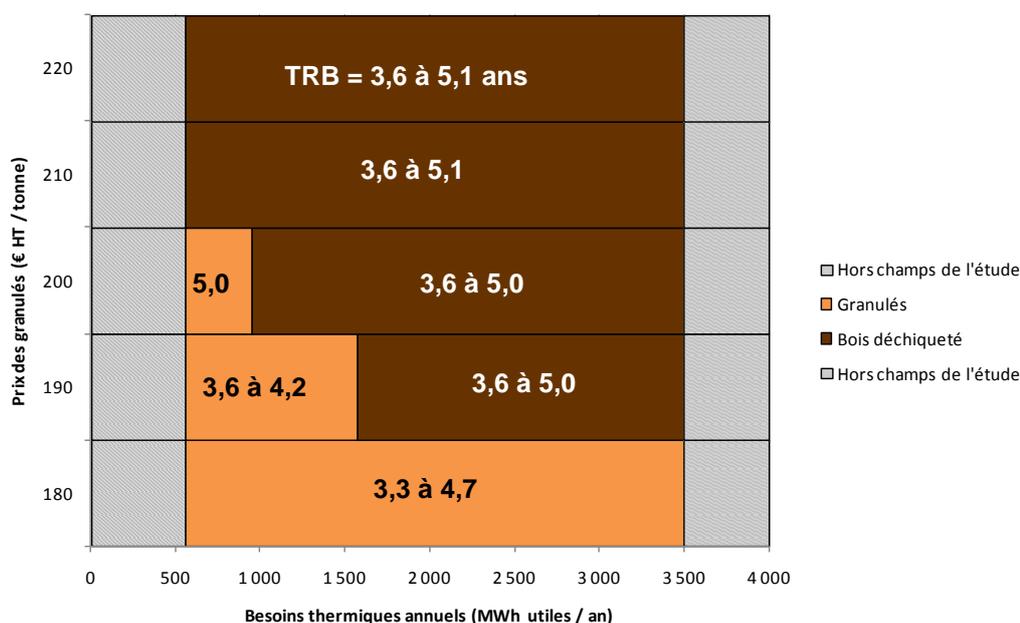
Le coût des plaquettes est fixé à 22 € HT / MWh PCI ; le coût de l'énergie fossile de référence est fixé à 52,7 € HT / MWh PCI, correspondant à la moyenne des prix du fioul domestique pour l'usage « petite industrie » sur les années 2009 et 2010 (source Energie Plus).

Les coûts d'investissement et de maintenance de chacune des solutions techniques ont été réduits de 10 % par rapport aux hypothèses considérées dans le cadre du chauffage collectif, pour tenir compte des spécificités du milieu industriel.

Le graphique ci-dessous présente la solution technique (chaufferie aux granulés ou aux plaquettes) présentant le temps de retour brut sur investissement le plus faible par rapport à une situation de référence aux énergies fossiles (fioul domestique en l'occurrence) pour un taux d'aide publique fixé à 25 % du montant de l'investissement.

Cette simulation permet de mettre en évidence que face au fioul domestique, un projet granulés présentera un meilleur temps de retour brut sur investissement qu'un projet plaquettes pour un prix des granulés maîtrisé et pour des besoins énergétiques faibles.

Figure 16 : Solution technique présentant le TRB le plus faible en comparaison à une situation de référence aux énergies fossiles



3.3.3 Synthèse

La rentabilité économique d'un projet industriel s'analyse parfois plus grâce à l'estimation du temps de retour brut sur investissement qu'à partir de l'analyse du coût global de la chaleur. Ce mode de raisonnement est favorable aux solutions présentant un niveau d'investissement limité.

La simulation conduite ci-dessus met en évidence l'intérêt économique des granulés face aux plaquettes pour des besoins thermiques modestes et un coût des granulés maîtrisé. Au-delà de 200 € HT / tonne et pour des besoins thermiques élevé, le surcoût d'investissement dans la solution plaquettes sera compensé par le gain réalisé sur l'achat de combustible.

On rappelle que le choix des granulés face aux plaquettes peut intégrer d'autres notions que la seule rentabilité économique. Les granulés peuvent en effet être plus adaptés que les plaquettes à certains secteurs d'activité industrielle, notamment du fait de leur simplicité d'usage et de moindres émissions de poussières tant au stade de la livraison, du stockage que de la combustion.

4. Conclusions

Les granulés de bois présentent, par rapport aux autres combustibles biomasse, de nombreux atouts d'ordre technique (densité énergétique permettant notamment de limiter l'emprise des installations, fluidité, homogénéité...) et l'offre de granulés de bois de qualité certifiée couvre désormais tout le territoire français. Le marché français actuel du granulé de bois est dominé par les usages domestiques dans les poêles et les chaudières des particuliers. En chauffage collectif, ce combustible est encore peu connu en France tant des financeurs que des décideurs et des bureaux d'études.

Cette étude a permis d'identifier différents modèles de projets de chauffages collectifs pour lesquels l'usage des granulés présente une pertinence technique, environnementale et économique, malgré un coût unitaire des granulés naturellement supérieur à celui d'autres combustibles biomasse. Ces modèles de projets pourraient constituer **une cible de développement prioritaire de ce combustible au-delà des usages domestiques**. Il s'agit essentiellement :

- **d'établissements non desservis par le réseau de distribution de gaz naturel ;**
- **de chaufferies dédiées de petite puissance pour des établissements fortement intermittents tels que des établissements scolaires ou des bâtiments du secteur tertiaire.** On préférera en outre la création d'une chaufferie dédiée aux granulés pour ces bâtiments à leur raccordement à un réseau de chaleur existant alimenté par une chaufferie centrale bi-énergie plaquettes/énergie fossile, à moins qu'ils ne soient situés à proximité immédiate de la chaufferie centrale ;
- **de réseaux de chaleur à créer, en appoint d'une chaudière aux plaquettes,** qui assurera la base des besoins thermiques du réseau. L'usage des granulés est d'autant plus pertinent lorsqu'une progression des besoins thermiques du réseau est programmée sur plusieurs années (ZAC par exemple) ;
- **de la petite industrie,** lorsque le maître d'ouvrage privilégie un raisonnement en temps de retour brut sur investissement.

Par ailleurs, les niveaux d'investissement dans les installations aux granulés étant, à puissance installée et autonomie de fonctionnement équivalente, généralement inférieurs à ceux des installations aux plaquettes, **le recours à l'aide publique pour assurer la pertinence économique des projets est souvent moindre lorsque le maître d'ouvrage privilégie les granulés.**

Il convient donc d'encourager les maîtres d'ouvrage à étudier la solution du chauffage collectif aux granulés de bois en alternative aux plaquettes (chaufferies dédiées sur des bâtiments scolaires ou tertiaires de petite taille) ou en complément (réseaux de chaleur, créations de ZAC).

PARTIE 3 : Annexes

1. Les cas référents

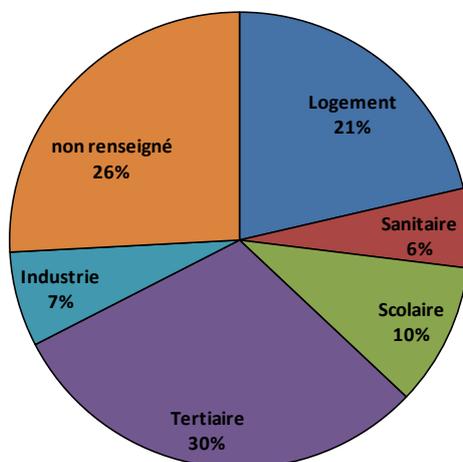
On présente ci-dessous la liste des 89 cas référents recensés.

N° projet	Pays	Secteur	Puissance kW	Besoins thermiques MWh utiles / an	Année de récolte des données économiques	Montants d'investissements € HT					Coûts d'exploitation € HT / an	
						Total	Process (bois et appoint)	Génie civil et VRD	Réseau et sous-station	Ingénierie	Entretien courant	Provisions grosses réparations
1	Allemagne	sanitaire	220									
2	Allemagne	tertiaire	70	100		31 291	25 553	2 385		3 353	456	626
3	Allemagne	logement	600	949	2008		570 000					
4	Allemagne	sanitaire	500	2 400								
5	Allemagne		85		2007							
6	Allemagne	logement	500		2009							
7	Allemagne	tertiaire	1000									
8	Allemagne	tertiaire	1250									
9	Allemagne		540									
10	Allemagne	logement	540									
11	Allemagne	scolaire	110		2006							
12	Allemagne	industrie	270		2004							
13	Allemagne		400	1 245		465 211	84 260	33 922	300 145	46 884		
14	Allemagne	logement	100	170	2002	28 000						
15	Allemagne	logement	60	55	2002	27 000						
16	Allemagne	logement	32	44	2006							
17	Allemagne		135		2009	90 000						
18	Allemagne		300									
19	Allemagne		300			100 000						
20	Allemagne	sanitaire	93				65 000	20 000			300	
21	Allemagne		150			85 000						
22	Allemagne		550									
23	Allemagne	sanitaire	224									
24	Allemagne		3800	21 000	2009	1 200 000						
25	Allemagne						1 921	371				
26	Allemagne	tertiaire	65	85	2009	55 000	5 000	30 000	15 000	5 000	800	200
27	France	logement	1000									
28	France	tertiaire	150	220		70 000	5 000	45 000	15 000	5 000	1 200	600
29	France	sanitaire	500									
30	France		100			48 656						
31	France	industrie	300	330		132 850	103 350	23 000		6 500		
32	France	scolaire	112									
33	France	tertiaire	240			140 000	99 000	41 000			32 314	
34	France	tertiaire	220									
35	France	scolaire	68			38 033	26 183	11 850				
36	France	logement	25		2004	20 000					1 846	
37	France	tertiaire	150		2004	53 500					5 675	
38	France	scolaire	95			46 000	42 000					
39	France	logement	100			80 000						
40	France	tertiaire	85			68 000						
41	France	tertiaire	73		2002	13 754						
42	France	tertiaire	200	385	2009	108 354	105 431				4 181	
43	France	tertiaire	250	1 390	2009	260 000	83 000	22 000	138 000	25 000	10 321	-
44	France	industrie	150	530		20 000						
45	France		540									
46	France											
47	France	industrie	400	350	2006	136 400	99 400	18 600	6 000	12 400	1 000	
48	France	tertiaire	300	300		108 000	80 000	18 000	-	10 000	3 344	
49	France	tertiaire	300	470		220 000	60 000	35 000	110 000	15 000	3 200	
50	France	tertiaire	55	70	2008	1 750 000					2 580	
51	France											
52	France											
53	France	logement	80			61 081	35 231	6 130	15 195	4 525		
54	France		440									
55	France	scolaire	96	74	2009	50 000	35 000	5 000	10 000		500	
56	France		96	200	2009	59 300	32 500		20 500	4 300	1 100	
57	France	tertiaire	96	204	2009	57 300	26 000	27 000		4 300	920	
58	France	industrie	300			55 920						
59	France		200			69 000	41 000	28 000				
60	France	logement	100		2009		40 000	7 000			190	
61	France	scolaire	112									
62	France	logement	220									
63	France	tertiaire										
64	France	tertiaire	30			36 089	28 163	7 926	-	-		
65	France	tertiaire	96			42 312	11 543	20 539	10 230	-		
66	France	tertiaire	60			23 210	16 470	6 740	-	-		
67	France	logement	100	270		87 962	48 531	39 431	-	-	2 370	1 846
68	France	logement	38			41 571						
69	France	logement	2000			3 132 825	1 022 369	923 285	987 981	199 190	40 200	23 300
70	Autriche	tertiaire	550	660		184 000						
71	Autriche	logement	150			52 000						
72	Autriche	logement	800			240 000						
73	Autriche											
74	Autriche		20									
75	Autriche		300									
76	Autriche		400									
77	Suisse	tertiaire	150									
78	Suisse	scolaire	58									
79	Suisse	logement	40									
80	Suisse	scolaire	240									
81	Suisse	tertiaire	240									
82	Suisse		180									
83	Finlande	tertiaire	300	500	2000	33 640						
84	Finlande	tertiaire	400	2 000	2000	33 340						
85	Finlande	tertiaire	500	2 000	2000	168 200						
86	Norvège	logement	540									
87	USA	scolaire										
88	USA	industrie	82									
89	usa	tertiaire		293		91 996	71 493			17 953	1 670	543

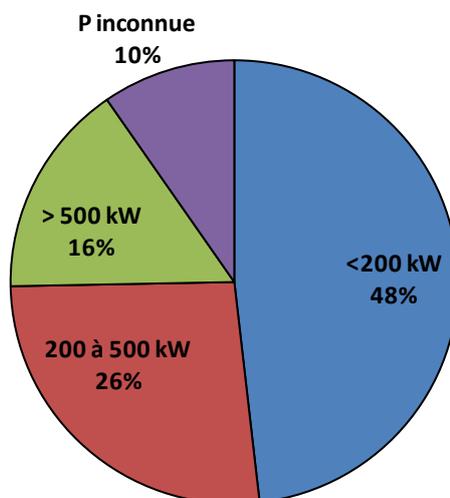
CIBE

Parmi les 89 cas référents recensés :

- 66 (74 %) sont renseignés en ce qui concerne le secteur des bâtiments chauffés ;



- 81 (91 %) sont renseignés en ce qui concerne la puissance installée. Parmi ces cas référents, 49 correspondent à une gamme de puissance comprise entre 80 et 500 kW.



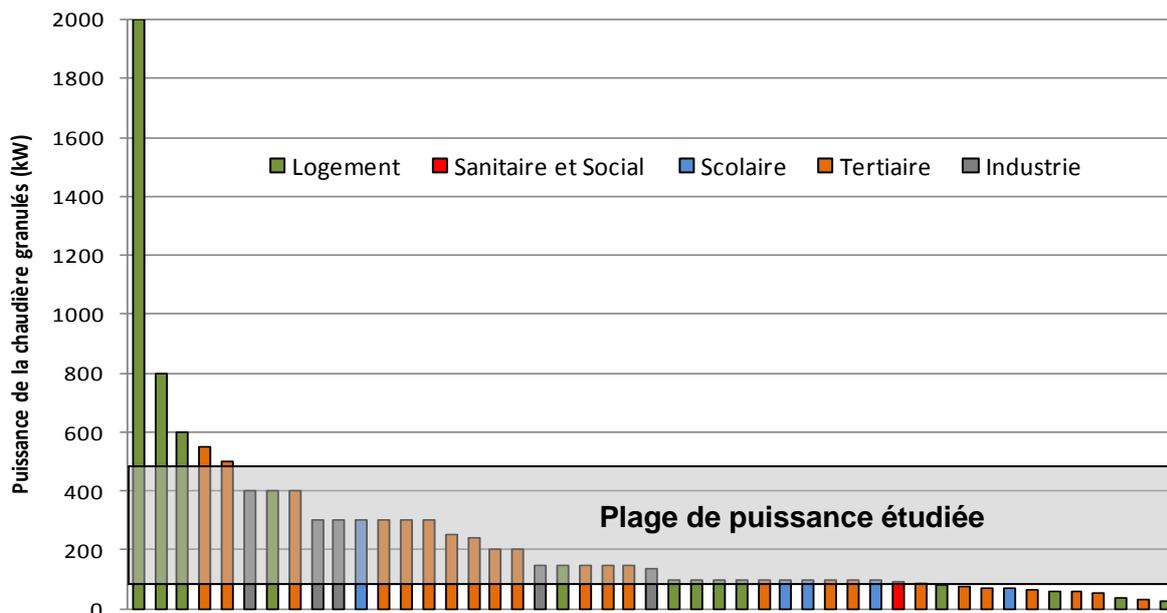
- 27 (30 %) sont renseignés en ce qui concerne les besoins thermiques annuels.
- 47 (53 %) sont renseignés en ce qui concerne les investissements engagés ;
- 20 (22 %) sont renseignés concernant les frais d'entretien courant ;
- 7 (8 %) sont renseignés concernant les provisions pour grosses réparations.

47 cas référents ont été jugés suffisamment renseignés pour être exploités.

70 % des 47 cas exploitables correspondent à la gamme de puissance analysée dans le cadre de la présente étude (80 à 500 kW). 10 cas (21 %) correspondent à une puissance inférieure et 4 cas (9 %) correspondent à une puissance supérieure.

Les chaufferies aux granulés recensées sont **essentiellement installées sur des bâtiments tertiaires (23) et sur du logement (13)**. On notera qu'un unique cas est recensé dans le secteur sanitaire et social.

Figure 17 : Le chauffage collectif aux granulés : les cas réferents recensés



2. La méthodologie et les hypothèses retenues

Le chauffage collectif au gaz naturel

Les données d'investissement et de coûts d'exploitation des chaufferies collectives au gaz naturel sont extraites du travail de la Commission « Montage de Projets » du CIBE, intitulé « Définition d'une situation de référence normative » et dont la synthèse est disponible sur le site internet du CIBE : www.cibe.fr

Une extrapolation des données a été conduite pour étendre les hypothèses à l'ensemble de la gamme de puissance étudiée sur la base d'une loi d'extrapolation puissance.

Le chauffage collectif aux plaquettes

Les données d'investissement et de coûts d'exploitation des chaufferies collectives aux plaquettes sont issues :

- De l'étude ADEME réalisée par PERDURANCE sur les **coûts d'investissement des chaufferies au bois déchiqueté** pour la définition des coûts d'investissement des chaufferies aux plaquettes,
- Des **travaux de la Commission Montage de Projets du CIBE relatifs à l'analyse de l'influence de paramètres techniques et économiques sur la rentabilité des projets bois** pour la définition des coûts d'exploitation des chaufferies aux plaquettes.

Les hypothèses retenues ont été extrapolées à l'ensemble de la gamme de puissance étudiée dans le cadre de la présente étude, et consolidées par les membres réguliers de la Commission Montage de Projets du CIBE.

Le chauffage collectif aux granulés

L'évaluation des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation des chaufferies granulés est issue du traitement des 47 cas référents exploitables, sur la base de la méthodologie suivante :

- **Analyse des données économiques** ramenées à la puissance de l'installation, suppression des valeurs extrêmes, définition de valeurs moyennes par gamme de puissance,
- **Modélisation de l'évolution des coûts** d'investissement et d'exploitation en fonction de la puissance de l'installation,
- **Consolidation des données** par échanges avec des constructeurs de chaudières aux granulés et concertation de la Commission Montage de Projets du CIBE.

Les hypothèses retenues

Les hypothèses techniques

Après contact avec quelques constructeurs de chaudières bois, les valeurs suivantes ont été retenues concernant le fonctionnement des installations :

	Taux de charge minimum	Taux de disponibilité
Bois déchiqueté	25%	94%
Granulés	18%	97%

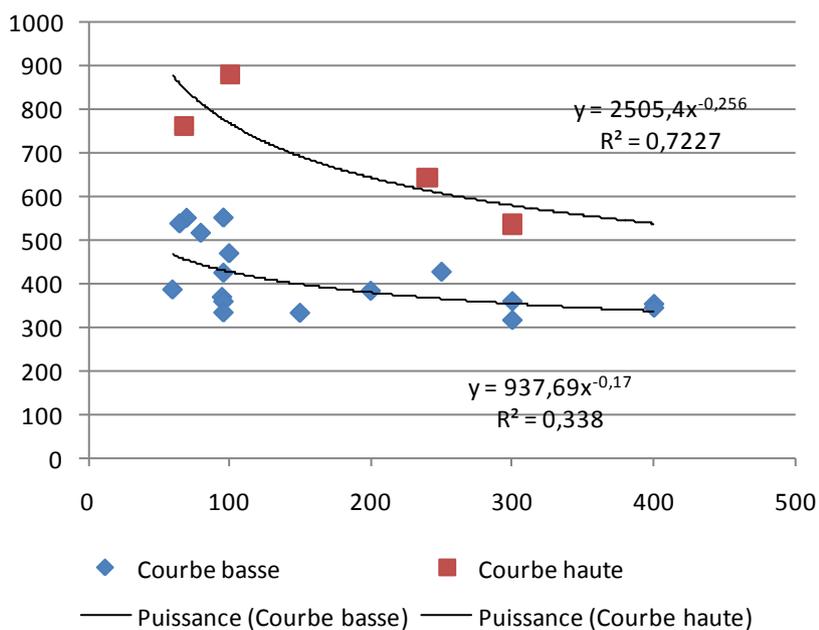
L'intermittence d'usage des bâtiments (Logements, Sanitaire et social, Scolaire, Tertiaire) a été établie sur la base des températures de consigne et durées des saisons de chauffe consignées ci-dessous.

		Logements	Sanitaire	Scolaire	Tertiaire
Type 1 (consigne commune)	Tcons jour	19	22	20	20
	Tcons nuit	17	20	17	15
	début jour (h)	6	6	7	8
	début nuit (h)	22	22	17	18
Type 2 (week-end)	Tcons jour	19	22	17	15
	Tcons nuit	17	20	17	15
	début jour (h)	22	6	7	8
	début nuit (h)	6	22	17	18
Type 3 (vacances hors we)	Tcons jour	19	22	12	20
	Tcons nuit	17	20	12	15
	début jour (h)	22	6	7	8
	début nuit (h)	6	22	17	18
Durée Type 1		244	304	134	134
Durée Type 2		0	0	70	70
Durée Type 3		0	0	40	40
Durée saison de chauffe		244	304	244	244

Les investissements des chaufferies dédiées

P kW	Investissement Process + GC € / kW				
	Bois déchiqueté	Granulés			Gaz
		Moyenne	Haute	Basse	
100	1 145	600	770	430	47
200	988	515	650	380	41
300	907	470	580	360	38
400	853	440	540	340	36
500	814	420	510	330	34
600	783	405	490	320	33
700	758	390	470	310	32
800	737	375	450	300	31
900	719	370	440	300	30
1000	703	360	430	290	30

Les investissements des chaufferies aux granulés en € HT / kW : deux courbes de tendance.



CIBE

Les coûts d'exploitation des chaufferies dédiées

P kW	P2 € / kW					P2 € / an				
	Bois décheté	Granulés			Gaz	Bois décheté	Granulés			Gaz
		Moyenne	Haute	Basse			Moyenne	Haute	Basse	
100	48,6	17,7	28,0	7,5	11,2	4 860	1 770	2 800	750	1 120
200	38,7	16,1	25,4	6,7	10,0	7 750	3 210	5 080	1 340	2 000
300	33,9	15,2	24,0	6,3	9,4	10 170	4 550	7 210	1 880	2 810
400	30,9	14,5	23,1	6,0	8,9	12 340	5 820	9 240	2 390	3 580
500	28,7	14,1	22,4	5,8	8,6	14 340	7 040	11 200	2 880	4 310
600	27,0	13,7	21,8	5,6	8,4	16 210	8 230	13 110	3 360	5 030
700	25,7	13,4	21,4	5,5	8,2	17 970	9 390	14 970	3 820	5 720
800	24,6	13,2	21,0	5,3	8,0	19 660	10 530	16 800	4 270	6 400
900	23,6	12,9	20,7	5,2	7,8	21 280	11 650	18 590	4 710	7 060
1000	22,8	12,8	20,4	5,1	7,7	22 840	12 750	20 360	5 140	7 710

P kW	P3 € / kW					P3 € / an				
	Bois décheté	Granulés			Gaz	Bois décheté	Granulés			Gaz
		Moyenne	Haute	Basse			Moyenne	Haute	Basse	
100	16,0	8,4	10,8	6,0	3,9	1 600	840	1 080	600	390
200	13,9	7,2	9,1	5,3	3,5	2 770	1 440	1 820	1 060	700
300	12,7	6,6	8,1	5,0	3,3	3 810	1 970	2 440	1 510	980
400	12,0	6,2	7,6	4,8	3,1	4 780	2 460	3 020	1 900	1 250
500	11,4	5,9	7,1	4,6	3,0	5 700	2 940	3 570	2 310	1 500
600	11,0	5,7	6,9	4,5	2,9	6 580	3 400	4 120	2 690	1 750
700	10,6	5,5	6,6	4,3	2,8	7 430	3 820	4 610	3 040	1 990
800	10,3	5,3	6,3	4,2	2,8	8 250	4 200	5 040	3 360	2 220
900	10,1	5,2	6,2	4,2	2,7	9 050	4 660	5 540	3 780	2 450
1000	9,8	5,0	6,0	4,1	2,7	9 840	5 040	6 020	4 060	2 680

3. Glossaire

La plupart des définitions consignées ci-dessous sont extraites du catalogue des « 1000 mots clés du bois-énergie » disponible en ligne sur le site internet de Biomasse Normandie www.biomasse-normandie.org

Bi-énergie :

La bi-énergie est un principe de chauffage permettant l'usage simultané de deux énergies.

Lorsque l'on veut couvrir en totalité les besoins en énergie d'un site avec le bois, le dimensionnement de la chaudière doit tenir compte des jours exceptionnellement froids. Avec un second combustible en relève (fioul ou gaz), on peut réduire la puissance du générateur bois à seulement 40 à 60 % de la puissance totale appelée, tout en conservant un taux de couverture des besoins par le bois compris entre 70 et 90 % sur l'ensemble de la saison de chauffe.

Le principe de la bi-énergie bois/fioul ou gaz associe :

- le bois, utilisé en base ;
- une seconde énergie liquide ou gazeuse assurant l'appoint pendant les périodes les plus froides et également le secours (couverture de la totalité des besoins).

Ce choix se justifie par des arguments :

- technique, par l'optimisation du fonctionnement de l'équipement qui sera sollicité plus longtemps à sa puissance nominale ;
- économique, par la diminution des investissements liés à la mise en place d'une chaudière bois moins puissante.

Ce système offre la garantie d'une fourniture d'énergie en continue, grâce au secours que procure le second combustible.

Chaufferie dédiée :

On appelle chaufferie dédiée un équipement grâce auquel le maître d'ouvrage, par l'intermédiaire d'un réseau de canalisations ou non, alimente un ou plusieurs bâtiments de son propre patrimoine. Il peut s'agir d'une chaufferie pour :

- un ou plusieurs groupes de logements sociaux gérés par le même bailleur,
- plusieurs bâtiments communaux tels qu'une école, une salle des fêtes, la Mairie...
- un site industriel.

La chaufferie dédiée s'oppose aux réseaux de chaleur dans le sens où elle ne fait l'objet d'aucune vente de chaleur à un tiers.

Courbe des appels de puissance, monotone des besoins de chauffage

La monotone des besoins de chauffage est la courbe représentant la répartition des appels de puissance sur une année moyenne pour un site donné. Elle prend en compte les éléments suivants :

CIBE

- la rigueur climatique ;
- les puissances nécessaires pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire ;
- le type d'utilisation des locaux (températures de consigne, intermittences) et le foisonnement dans le cas de réseaux de chaleur desservant de nombreux bâtiments.

Elle est généralement composée de trois zones distinctes :

- à gauche sont représentés les appels de puissance les plus élevés, qui correspondent aux jours les plus froids de l'année,
- à droite, on observe un soutirage faible est quasi-constant, qui correspond aux appels de puissance estivaux pour la production d'eau chaude sanitaire.
- au centre figurent les appels de puissance du cœur de la saison de chauffe.

La connaissance de cette courbe permet, dans le cas des installations en bi-énergie, d'estimer les taux de couverture des différents combustibles utilisés. La surface inférieure délimitée par la courbe représente les besoins énergétiques du site.

Coût global de la chaleur, facture énergétique en coût global :

Le coût global de la chaleur correspond à l'ensemble des charges inhérentes à la production de l'énergie nécessaire au(x) site(s) étudié(s) pour une solution technique donnée. Il intègre :

- les achats de combustible ;
- les frais d'électricité pour le fonctionnement des équipements (centrale hydraulique, pompes, ventilateurs...) ;
- les coûts de conduite et d'entretien/maintenance ;
- les provisions pour le renouvellement des équipements et grosses réparations ;
- l'amortissement financier des investissements intégrant les éventuelles subventions.

Dans le calcul du coût global, les limites des prestations prises en compte sont définies et limitées. Dans le cas des projets de chaufferies bois, la frontière se situe en général en amont du (ou des) réseau(x) de distribution secondaire(s) ; les charges de production d'énergie concernent alors :

- la chaufferie bois ;
- la (ou les) éventuelle(s) chaufferie(s) d'appoint ;
- les canalisations primaires de distribution ;
- les sous-stations dans le cas des réseaux de chaleur.

Le coût global de la chaleur doit être exprimé en € TTC / an ou en € TTC / MWh utile, afin d'intégrer à l'analyse les incitations fiscales au développement des énergies renouvelables.

Densité thermique linéaire :

On définit la densité thermique linéaire d'un réseau de chaleur comme étant le rapport entre l'énergie distribuée (en MWh utiles/an) et le linéaire de tranchée de réseau à créer (en mètres).

Cet indicateur peut être pertinent pour évaluer l'intérêt technico-économique d'un projet bois-énergie mais ne se substitue pas aux résultats d'une analyse technique et économique fine.

Efficiences environnementale de l'aide publique :

On définit dans le cadre de cette étude l'efficiences environnementale de l'aide publique par le rapport entre le montant en € de l'aide apportée et la quantité d'énergie renouvelable produite par l'installation aidée lors de sa durée de vie estimée. On considère dans le cadre du rapport une durée de vie de 20 ans. Ce paramètre peut être utilisé par les organismes financeurs pour comparer l'intérêt relatif de plusieurs projets. Il est exprimé en € d'aide / tep produite.

Fonds chaleur renouvelable :

Le Fonds chaleur renouvelable est le dispositif d'attribution des aides publiques mis en place par l'Etat suite aux conclusions du Grenelle de l'Environnement. Il concerne les projets biomasse de taille structurante dans les secteurs de l'habitat collectif, du tertiaire, de l'industrie et de l'agriculture, définie en fonction de la quantité d'énergie renouvelable produite par l'installation tous les ans, exprimée en tep / an. Ce ratio correspond à l'énergie thermique produite par l'installation biomasse, divisée par 11,63.

Le Fonds chaleur bénéficie d'un budget d'un milliard d'€ sur la période 2009-2011 et propose deux modes de fonctionnement pour les projets :

- dans l'industrie, l'agriculture et le tertiaire privé produisant plus de 1 000 tep d'énergie renouvelable par an ; les modalités d'attribution des aides sont encadrées par un appel à projets national appelé BCIAT (Biomasse Chaleur Industrie Agriculture Tertiaire) piloté par l'ADEME au niveau national.
- dans le résidentiel et le tertiaire public produisant plus de 100 tep d'énergie renouvelable par an et les projets dans l'industrie, l'agriculture et le tertiaire privé produisant entre 100 et 1 000 tep d'énergie renouvelable par an ; les modalités d'attribution des aides sont encadrées par les Directions régionales de l'ADEME, sur la base de grilles de calcul pré établies. Les Collectivités territoriales peuvent participer au financement des projets.

Dans tous les cas de figure, le bénéfice du Fonds chaleur s'accompagne d'un certain nombre d'exigences en termes de traitement des fumées, de plan d'approvisionnement, de suivi de l'installation et de niveau de production d'énergie renouvelable. Afin de contrôler ces aspects, le versement de l'aide s'effectue en plusieurs fois.

Pour les installations produisant moins de 100 tep / an, les modalités d'attribution des aides restent gérées sur dossier par les Directions régionales de l'ADEME (budget ADEME) et les Collectivités territoriales.

Plus d'informations sur le site de l'ADEME : www.ademe.fr/fondschaleur

Intermittence d'usage des bâtiments / nombre d'heures de fonctionnement équivalent pleine puissance :

Selon son usage, un bâtiment sera chauffé de façon plus ou moins régulière à une température plus ou moins élevée. Un établissement scolaire, par exemple, est chauffé de manière réduite une grande partie de la saison de chauffe (nuit, week-end, vacances scolaires), alors qu'un établissement du secteur sanitaire et social (hôpital, maison de retraite) est au contraire chauffé de manière continue à température fixe. Pour une puissance thermique maximum appelée identique, ces deux bâtiments, du fait de leurs intermittences d'usage spécifiques, consommeront une quantité d'énergie différente.

L'intermittence d'usage d'un bâtiment peut être évaluée par le ratio entre ses besoins thermiques annuels (E) et la puissance maximum appelée (P). A taux de couverture des besoins par le bois

identique, le ratio E/Pbois (Pbois étant la puissance de la chaudière bois) est également un indicateur de l'intermittence du bâtiment. Ce ratio, exprimé en heures / an, correspond au nombre d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance de la chaudière bois.

Pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique est la quantité d'énergie contenue dans le combustible. On distingue le pouvoir calorifique :

- supérieur (PCS), énergie libérée lors de la combustion ; il est fonction de la composition du combustible (carbone, hydrogène, oxygène...) ;
- inférieur (PCI), qui équivaut au PCS diminué de la chaleur latente de la vaporisation de l'eau contenue dans le combustible, ou formée au cours de la combustion (énergie perdue sans système de condensation des fumées).

Le PCI du bois anhydre est en moyenne de l'ordre de 5 MWh/t pour les feuillus et 5,3 MWh/t pour les résineux. Le principal facteur de variation du contenu énergétique massique du combustible bois est son taux d'humidité, l'essence n'ayant que très peu d'influence. La plage de variation pour les plaquettes utilisés dans les chaufferies collectives et industrielles va de 2 MWh PCI / tonne (bois à 55 % d'humidité) à 4 MWh PCI / tonne (bois à 20 % d'humidité).

Le pouvoir calorifique des granulés est de l'ordre de 5 MWh PCI / tonne, pour un taux d'humidité de l'ordre de 8 %.

Puissance thermique / Energie :

La puissance d'une machine se définit comme le quotient de travail (de la chaleur ou de l'énergie), par le temps qu'il a fallu pour les fournir. L'unité est le watt (W) ou, plus couramment dans le cadre de cette étude, le kilowatt (kW).

La puissance nominale d'une chaudière est la puissance thermique indiquée par le constructeur ; elle correspond à la quantité d'énergie sortie chaudière (hors pertes) produite en une seconde à pleine charge.

L'unité de mesure de l'énergie thermique est de kWh (ou, plus couramment dans le cadre de cette étude, le MWh, qui correspond à 1 000 kWh). L'énergie thermique produite par une chaudière de 100 kW de puissance nominale en une heure est de 100 kWh (0,1 MWh)

On définit plusieurs notions d'énergie :

- L'énergie entrée chaudière, qui correspond à la quantité d'énergie contenue dans le combustible. Elle s'exprime en kWh PCI (ou MWh PCI).
- L'énergie sortie chaudière, qui correspond à la quantité d'énergie produite par l'appareil de combustion. Elle s'exprime en kWh utiles (ou MWh utiles) et équivaut à l'énergie entrée chaudière diminuée du rendement de combustion.
- L'énergie utile en sous-station ou en pied d'immeuble, qui correspond à la quantité d'énergie délivrée à l'utilisateur final de la chaleur. Elle s'exprime en kWh utiles (ou MWh utiles) et équivaut à l'énergie sortie chaudière diminuée du rendement de distribution.

Réseau de chaleur :

Si une chaufferie délivre de la chaleur à plusieurs maîtres d'ouvrage différents par l'intermédiaire d'un réseau de canalisations enterrées et de point de distribution avec comptage, il y a systématiquement vente de chaleur à un tiers. On parle alors de réseau de chaleur.

Lorsque ce dernier est porté par un organisme public, le réseau de chaleur est un service public à caractère industriel et commercial (SPIC), dont l'organisation incombe à la collectivité locale. Pour organiser ce service de distribution d'énergie calorifique, la Collectivité a le choix entre plusieurs modes de gestion :

- directe en régie ; le projet est encadré par le Code des marchés publics (passation de contrats d'études, de travaux, d'exploitation), à l'exception de la fourniture de combustible,
- déléguée, de type concession ou affermage ; le projet est encadré par la loi Sapin (hors Code des marchés public).

Si le maître d'ouvrage du réseau n'est pas la Collectivité locale (Association syndicale libre, entreprise, particulier...), le réseau est qualifié de réseau privé.

Rigueur climatique :

La rigueur climatique est exprimée par les degrés jours unifiés (DJU), qui correspondent à la somme, sur la période de chauffage, des écarts journaliers entre la température intérieure de consigne du bâtiment considéré et la température extérieure (unité °Cj).

Les DJU sont déterminés à partir des données statistiques météo sur les mesures de température extérieure. Ils sont calculés pour une température de base (18°C par exemple) et pour une période donnée (saison, mois, semaine de chauffe).

Exemple : Pour une saison de chauffe du 1er octobre au 20 mai à Caen - DJU (en °Cj) :

DJU base 18°C 2008 = 2 248 °Cj ;

DJU base 18°C moyenne 1998-2008 = 2 215 °Cj ;

DJU base 18°C moyenne 1970-2000 = 2 406 °Cj.

Les DJU sont utilisés pour déterminer les besoins de chauffage d'un bâtiment, qui dépendent de la rigueur climatique de son lieu d'implantation et des intermittences de fonctionnement de son système de chauffage.

Taux de charge :

Le taux de charge instantané d'une chaudière bois correspond au ratio entre la puissance instantanée appelée et la puissance nominale de la chaudière. Il est exprimé en %.

Comme toutes les chaudières à combustible solide, les chaudières biomasse (plaquettes et granulés) présentent un taux de charge minimum de fonctionnement, généralement compris entre 15 et 30 %.

Taux de couverture des besoins par le bois :

Dans une chaufferie fonctionnant en bi-énergie, la chaudière bois assure la base de besoins de chauffage du ou des bâtiments alimentés. Une chaudière conventionnelle assure le secours total

CIBE

de l'installation (maintenance, rupture d'approvisionnement, panne) et l'écrêtement en période de grand froid.

Le taux de couverture des besoins par le bois correspond au ratio entre la quantité d'énergie sortie chaudière fournie par la chaudière bois et la quantité d'énergie totale fournie par la chaufferie bi-énergie. Il est exprimé en % et est généralement compris entre 80 % et 90 %.

Temps de retour brut sur investissement :

Le temps de retour brut sur investissement est un indicateur de rentabilité économique des projets. Il correspond au ratio entre le surcoût d'investissement du projet biomasse par rapport à une solution conventionnelle (énergie fossile) et les gains de fonctionnement annuels engendrés par le projet. Il est exprimé en années.

4. Cahier des charges de l'étude
