

Réseaux de chaleur bois

Domaine de pertinence

JANVIER 2017



sommaire

Réseaux de chaleur bois

Domaine de pertinence

5 – Contexte et objectifs de l'étude

Les réseaux de chaleur ont vocation à se développer fortement : il est donc crucial d'interroger leur rentabilité aux modes de chauffage conventionnels

11 – Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Il s'agit de décomposer et d'estimer les différents coûts « acteurs » et « socio-économiques » des différents modes de chauffage

27 – Optimisation d'un réseau de chaleur bois

Les coûts des réseaux de chaleur présentent des économies d'échelle essentiellement à travers l'augmentation de la puissance des chaudières

41 – Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

Augmenter la puissance et la densité thermique d'un réseau de chaleur permet d'augmenter sa rentabilité

55 – Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

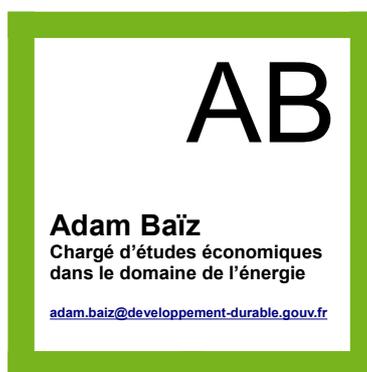
Créés ou étendus, le coût d'un réseau de chaleur dépend du niveau de consommation

67 – Annexes : autres tests de sensibilité sur les différents modes de chauffage

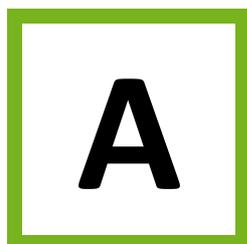
Le taux d'actualisation et les prix d'énergie sont d'autres paramètres clés

Document édité par :
Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

contributeurs



avant-propos



lors que la loi de transition énergétique pour la croissance verte prévoit un fort développement des réseaux de chaleur *via* les énergies renouvelables, plusieurs questions se posent : les réseaux de chaleur peuvent-ils

concurrencer un gaz peu onéreux ? Des réseaux de chaleur de forte puissance permettent-ils de dégager d'importantes économies d'échelle ? Quel est l'impact de la baisse de la consommation énergétique dans un quartier rénové sur la rentabilité d'un réseau de chaleur ?

À travers un modèle de coûts « acteurs » et « socio-économiques », l'étude compare la rentabilité des réseaux de chaleur approvisionnés en bois à celle de moyens de chauffage traditionnels et ce, afin de mieux cerner le domaine de pertinence des réseaux de chaleur, créés ou étendus.

Laurence Monnoyer-Smith

COMMISSAIRE GÉNÉRALE AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Partie 1

Contexte et objectifs

Les réseaux de chaleur sont des systèmes centralisés de distribution de chaleur qui desservent près de 2,3 millions de logements « équivalents 70 m² ». Alors que la loi de transition énergétique pour la croissance verte prévoit un fort développement des réseaux de chaleur via les énergies renouvelables, l'étude compare la rentabilité des réseaux de chaleur approvisionnés en bois à différents modes de chauffage conventionnels.



PRÉSENTATION D'UN RÉSEAU DE CHALEUR

Un réseau de chaleur est un système de distribution de chaleur produite de façon centralisée qui dessert plusieurs usagers. Un réseau de chaleur est constitué (voir schéma) :

- d'une ou de plusieurs **unités de production de chaleur** : elles comportent le plus souvent une unité principale fonctionnant en continu et des unités d'appoint et de secours appelées en renfort en cas de pointes de consommation ou de pannes. Ces unités de production sont par exemple une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM), une chaudière alimentée par un combustible (fioul, gaz, bois...), une centrale de géothermie profonde, etc. ;
- d'un **réseau de distribution primaire** : il s'agit de canalisations dans lesquelles la chaleur est transportée par un fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude) ;
- d'une ou de plusieurs **sous-stations d'échange** : situées en pied d'immeuble, elles permettent le transfert de chaleur par le biais d'un échangeur entre le réseau de distribution primaire et le réseau de distribution secondaire qui dessert un immeuble ou un petit groupe d'immeubles, de bureaux, etc.

Graphique 1 : Schéma d'un réseau de chaleur



Source : Site de l'Ademe

La littérature¹ prête aux réseaux de chaleur plusieurs **avantages comparatifs** :

- ils permettent de mobiliser massivement des gisements de certaines énergies renouvelables (biomasse, géothermie, etc.) et de récupération (issue de sites industriels

¹ Ademe, Cérema, MEEM, Amorce, etc.

Partie 1 : Contexte et objectifs de l'étude

ou de l'incinération d'ordures ménagères), et peuvent le cas échéant fonctionner en cogénération ;

- ils offrent des prix plus stables², en raison d'une part plus importante du coût fixe d'investissement initial ;
- ils ont un impact relativement moindre sur la qualité de l'air du fait de la centralisation des systèmes de traitement ;
- ils constituent une solution évolutive dans la mesure où il est relativement plus aisé de changer de sources d'énergie à moyen ou long terme en intervenant simplement au niveau de la chaudière centrale ;
- ils contribuent davantage à l'économie locale, et en particulier à la création d'emplois, lorsque les sources d'énergie sont renouvelables et lorsqu'elles proviennent du territoire ou de ses environs.

LES RÉSEAUX DE CHALEUR EN FRANCE

Le Syndicat National du Chauffage Urbain (SNCU) recense **501 réseaux de chaleur et 17 réseaux de froid** (enquête annuelle de 2013), répartis sur 350 villes et s'étendant sur 3 900 km. Plus de 120 réseaux de chaleur et 30 % des usagers du chauffage urbain se trouvent en Île-en-France. À partir de gaz surtout (45 %)³, mais aussi d'énergies renouvelables et de récupération (38 %), les réseaux de chaleur distribuent de **5 à 6 % de la chaleur consommée dans le résidentiel et le tertiaire**, loin derrière le Danemark (60 %), l'Islande (95 %) ou encore la Suède, la Pologne et la Norvège (50 %).

Les réseaux de chaleur desservent actuellement environ **2,3 millions d'équivalents-logements** (soit 6 % des besoins nationaux de chauffage)⁴, majoritairement dans des zones urbaines denses. D'après le rapport « Réseaux de Chaleur en France » (2012) de la DTerOuest⁵ [1], le résidentiel consomme 57 % de la chaleur livrée, tandis que le tertiaire en consomme 36 %.

En France, les **principaux acteurs** de la mise en place et de l'évaluation des réseaux de chaleurs sont l'association « Amorce » (qui regroupe des collectivités délégantes pour la gestion des déchets, de l'énergie et des réseaux de chaleur), l'association « Via Sèva » (qui est davantage tournée vers la promotion des réseaux de chaleur), la SNCU (Syndicat National du Chauffage Urbain), la FEDENE (Fédération des Services Energies Environnement), la DGEC (Direction Générale de l'Énergie et du Climat), la DTerOuest (un service du CEREMA), la FNCCR (Fédération nationale des collectivités concédantes et régies) et l'Ademe.

² La stabilité des prix, le niveau relativement faible des prix ainsi que la nature des sources d'énergies pourraient contribuer à lutter contre la précarité énergétique et consolider la balance commerciale et la sécurité énergétique françaises.

³ D'après l'enquête SNCU de 2013.

⁴ Site de l'Ademe.

⁵ Anciennement appelé CETE Ouest.

LES ENJEUX AUTOUR DE LA PERTINENCE DES RÉSEAUX DE CHALEUR

La LTECV⁶ [2] prévoit de porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020⁷ et à 32 % en 2030. Pour parvenir à cet objectif, les énergies renouvelables devront en particulier représenter 38 % de la consommation finale de chaleur. La LTECV prévoit également de multiplier par 5 la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid à l'horizon 2030 (soit près de 4 millions de tonnes équivalent pétrole -Mtep- annuellement⁸). En outre, pour pouvoir raccorder 8 millions de logements équivalents en 2030, il est donc nécessaire de promouvoir au plus vite l'extension, la modernisation et la densification des réseaux existants ainsi que la création de nouveaux réseaux.

Néanmoins, le développement rapide et important des réseaux de chaleur pose des questions de faisabilité technique mais aussi de rentabilité des réseaux de chaleur par rapport à d'autres modes de chauffage. La question des coûts est d'autant plus cruciale qu'elle concerne le fournisseur, le consommateur mais aussi les **collectivités publiques** puisque plusieurs dispositifs de soutien financier aux projets ont été mis en place, notamment le Fonds Chaleur (Ademe) que la LTECV a prévu de doubler pour un montant total de 400 millions d'euros en 2017. Qui plus est, et à la différence des systèmes de chauffage individuels, un réseau de chaleur représente **un investissement initial très important**, ce qui demande d'avoir une vision à court et long terme du projet de création ou d'extension d'un réseau de chaleur sur un territoire donné (taux de raccordement au réseau, évolution des besoins des bâtiments, évolution de l'urbanisation, etc.). Plusieurs études sur les coûts économique et écologique des réseaux de chaleur ont déjà été réalisées, en particulier les deux suivantes :

- **Amorce** [3] a développé un modèle de comparaison des réseaux de chaleur à six autres modes de chauffage (électricité « individuel », gaz « individuel », pompe à chaleur « individuel », gaz « collectif », fioul et bois). Ce modèle sert à calculer, pour un logement donné, le coût global annuel du chauffage suivant différents modes de chauffage, en incluant la facture énergétique (abonnement et coût proportionnel aux consommations, soit P1 ou R1 et R2 pour les réseaux de chaleur), l'électricité annexe nécessaire au fonctionnement des installations de production et de distribution (P'1), la conduite et le petit entretien des installations (P2), le gros entretien et le renouvellement à l'identique du matériel (P3), les amortissements des installations (P4) et enfin les éventuelles subventions obtenues pour le financement du matériel. En calculant ces différents coûts à partir de moyennes statistiques tirées de l'enquête annuelle de la SNCU auprès des réseaux de chaleur, le modèle indique que le réseau de chaleur serait le mode de chauffage le plus compétitif pour l'utilisateur⁹ ;

⁶ Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte, Article L. 100-4, 22 juillet 2015.

⁷ Ce qui revient à augmenter de 20 Mtep la production annuelle d'énergie à partir de sources renouvelables.

⁸ Estimation obtenue en convertissant en Mtep $5 * 0,38 * 25$ TWh (où 25 TWh est la production actuelle, 38 % la part des énergies renouvelables et de récupération et 5 l'objectif de multiplication par 5). Par ailleurs, la PPE prévoit deux points de passage (1,35 Mtep en 2018 et 1,9 à 2,3 Mtep en 2023).

⁹ Afin de maintenir cette compétitivité, Amorce appelle toutefois les maîtres d'ouvrage à investir dans des réseaux modernisés faisant appel aux énergies renouvelables et de récupération.

- La **DterOuest** a développé en interne un modèle, plus détaillé, pour simuler les effets de la densité urbaine, de la mixité d'usage, du niveau de consommation énergétique ou encore de la part des énergies renouvelables sur la rentabilité d'un réseau de chaleur relativement à des solutions décentralisées de source fossile ou électrique. Le modèle calcule en particulier les consommations des quartiers en fonction de leur typologie caractérisée par des paramètres (surface des bâtiments, types des bâtiments, linéaire de voirie) et des systèmes énergétiques choisis. Le modèle tient compte des besoins thermiques pour des bâtiments anciens et des bâtiments BBC, du rendement des systèmes, des pertes thermiques dans les canalisations et les sous-stations d'échange ou encore de la consommation électrique des auxiliaires du réseau. Le modèle aboutit à plusieurs conclusions et notamment les suivantes : les systèmes décentralisés sont plus performants sur le plan énergétique (énergie finale consommée ou rendement global) que la solution réseau de chaleur ; le réseau de chaleur bois est une solution nettement plus vertueuse en émission de CO₂ que ne le sont les systèmes décentralisés couramment installés dans les bâtiments neufs ; quel que soit le type de configuration du quartier, un réseau de chaleur bois reste, avec le bois industriel, la solution la plus vertueuse en termes de GES.

Pour estimer précisément le domaine de pertinence des réseaux de chaleur, il faudrait idéalement tenir compte d'un nombre important de paramètres structurants : la **consommation énergétique par bâtiment** ; la **densité urbaine**¹⁰ ; la **forme urbaine** (habitat intermédiaire, maisons, immeubles, etc.) ; l'**ingénierie des réseaux de chaleur** (réseaux basse température, canalisations souples pré-isolées, etc.) ; la **densité thermique**¹¹ ; la **mixité d'usage** (zoning ou effet de foisonnement) ; le taux de raccordement ; la **durée d'utilisation équivalente à pleine puissance**¹² ; la **durée de vie du réseau de chaleur** ; les **mécanismes d'aide financière** (TVA réduite, Fonds Chaleur, etc.) ; l'**évolution des prix des énergies** et la sensibilité aux prix de la consommation énergétique ; la part des **énergies renouvelables** ; mais aussi de **critères plus qualitatifs** tels que le niveau de maîtrise des acteurs publics, l'impact architectural et paysager ou encore l'acceptabilité sociale.

À travers un modèle technico-économique, nous proposons de nous concentrer sur un nombre intermédiaire de paramètres structurants dans l'analyse de pertinence des réseaux de chaleur. Ce modèle n'a pas pour vocation de prévoir précisément les investissements des différents modes de chauffage ni le prix exact de la chaleur, mais plutôt de dégager des tendances générales sur la rentabilité relative des réseaux de chaleur bois.

¹⁰ Qui contrairement à l'intuition n'est pas synonyme de rentabilité accrue d'après la DterOuest.

¹¹ La densité thermique est le nombre de MWh de chaleur vendue par mètre linéaire de réseau sur une année ; ce nombre dépend de la surface chauffée, de la performance thermique des bâtiments, du comportement des usagers (bureaux/domicile, économes/peu économe, nombre de personnes, etc.).

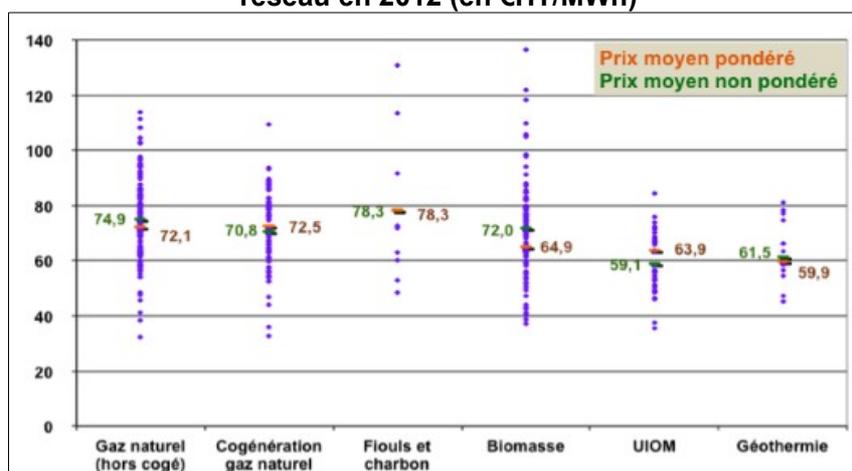
¹² Cette durée est également appelée « durée de fonctionnement » ; elle correspond au rapport entre l'énergie utile livrée sur un an et la puissance installée du système.

CHOIX DES RÉSEAUX DE CHALEUR BOIS POUR L'ÉTUDE

Dans la présente étude, nous faisons le choix de ne considérer que **les réseaux de chaleur approvisionné – en majorité ou en totalité – par du bois** et ce, pour deux raisons au moins :

- un *choix politique* : la LTECV¹³ [4] prévoit le quintuplement de la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid à l'horizon 2030. Or d'après le rapport de l'enquête SNCU (publié en juillet 2014), seulement 9 % (resp. 11 %) des réseaux de chaleur utilisent de 30 % à 80 % (resp. plus de 80 %) de biomasse dans leur bouquet énergétique : l'ensemble de ces réseaux de chaleur représente 17 % de la chaleur totale délivrée (resp. 2 %) ;
- un *choix statistique* : le manque de données précises et exhaustives sur les coûts des différents types de réseaux de chaleur n'a pu être surmonté que pour les réseaux de chaleur bois, et notamment grâce à divers travaux de l'Ademe et du Cerema que nous citerons par la suite. Pour autant, comme illustré par le graphique ci-dessous [5] , et en dépit d'une **très grande hétérogénéité des prix de vente de chaleur** via les réseaux de chaleurs **les réseaux de chaleur bois semblent pouvoir donner un ordre de grandeur du prix moyen ainsi que** des coûts de production et de distribution associées **des réseaux de chaleur de toute autre source d'énergie.**

Graphique 2 : Prix de vente de la chaleur en fonction de l'énergie majoritaire utilisée sur le réseau en 2012 (en €/HT/MWh)



Source : « Les prix de vente de la chaleur en 2012 », Amorce

¹³ Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte, Article 1.

Partie 2

Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Le modèle compare le coût actualisé des réseaux de chaleur au bois à six modes de chauffage conventionnels : l'électricité individuelle, le gaz individuel ou collectif, la pompe à chaleur, le fioul individuel et le bois individuel. Pour chacun d'eux, sont distingués les coûts fixes d'investissement, les coûts variables de consommation énergétique et d'exploitation, mais aussi le coût des externalités environnementales.



MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Le modèle utilisé dans l'étude compare le **coût actualisé** de six modes de chauffage aux réseaux de chaleur « bois ». Ces six modes de chauffage sont l'électricité « individuelle » (*Elec*), le gaz « individuel » (*Gaz Ind*), la pompe à chaleur « individuelle » (*PAC*), le gaz « collectif » (*Gaz Coll*), le fioul « individuel » (*Fioul*) et le bois « individuel » (*Bois*).

Dans l'ensemble de l'étude seront distinguées deux approches que le modèle permet de tester :

- **une approche « acteurs »** : une TVA uniforme¹⁴ est appliquée à l'ensemble des coûts de production et d'exploitation ; les prix des énergies comportent toutes les taxes y compris une composante carbone comme prévu par la LTECV ;
- **une approche « socio-économique »** : la TVA est exclue ainsi que certaines taxes (celles qui couvrent spécifiquement les coûts inhérents à la filière énergétique) ; en revanche sont systématiquement pris en compte le coût des externalités négatives et une composante carbone¹⁵.

Pour chaque mode de chauffage est déterminé un « coût actualisé ». À cette fin, nous écrivons la VAN (Valeur Actualisée Nette = recettes – coûts en valeurs actualisées) pour le producteur, et nous cherchons le prix p – à l'achat pour le consommateur- qui annule la VAN. **Ce prix, « acteurs » ou « socio-économique », est le coût actualisé. Il est exprimé en euros par MWh d'énergie finale de chaleur.** Il permet, compte tenu du taux d'actualisation choisi qui peut varier selon que l'on se place du point de vue de la collectivité ou d'un acteur privé, de comparer le coût de chaque filière.

Alors que les recettes du producteur d'énergie s'écrivent simplement comme le produit du prix p avec l'énergie finale consommée, les coûts ont été ventilés en leurs différentes composantes :

- **le coût fixe initial d'investissement** correspond au coût du capital (supposé entièrement emprunté et remboursé selon une annuité constante) en tenant compte d'un taux d'actualisation socio-économique, d'une durée d'exploitation, d'une durée d'emprunt et éventuellement d'un taux de subvention ;
- **les coûts annuels d'exploitation** tiennent compte du coût de l'électricité annexe et du petit entretien (coût variable) et du coût du gros entretien et du renouvellement des installations (coût fixe).

¹⁴ Pour fixer un premier ordre de grandeur, nous choisissons une TVA de 20 % pour l'ensemble des coûts de production et d'investissement. En effet, même s'il est possible de le faire dans le modèle, l'étude ne tient pas compte ici de l'éventuelle fiscalité associée à chaque mode de chauffage (TVA réduite, Fonds Chaleur, etc.) ; l'objectif est de donner un ordre de grandeur du coût des modes de chauffage sans tenir compte des politiques fiscales qui chercheraient à en favoriser un par rapport aux autres.

¹⁵ L'idée est de « couvrir tous les coûts », qu'ils soient déjà reflétés dans la « facture » (vision « acteurs ») ou non.

- **les coûts variables de l'énergie** dépendent de la quantité d'énergie consommée, des prix des énergies et leur taux de croissance annuel moyen, du rendement global par mode de chauffage et d'un coefficient de perte¹⁶ ;
- **les coûts variables des externalités environnementales** tiennent compte de la quantité d'énergie consommée, du contenu CO₂, des émissions NO_x et particules (PM) par type d'énergie et de la valeur tutélaire associé (par tonne émise)¹⁷ Nous ne tenons pas compte ici des externalités positives difficilement monétarisables des filières renouvelables (en termes d'emplois locaux, de la sécurité d'approvisionnement ou encore de la sécurité énergétique) : les prendre en compte amènerait probablement à revoir à la baisse le coût socioéconomique de la chaleur des réseaux de chaleur bois.

Nous précisons par la suite le paramétrage et les modalités de calcul de ces différents coûts pour chaque mode de chauffage.

LES HYPOTHÈSES RETENUES

Nous présentons ici les principales hypothèses quantitatives retenues dans cette étude, mais qu'il est possible de modifier dans le modèle.

Hypothèses communes à l'ensemble des modes de chauffage

Ces hypothèses sont communes à l'ensemble des modes de chauffage :

- Taux d'actualisation = 4,5 %¹⁸
- Durée d'exploitation = 20 ans¹⁹
- Durée d'emprunt = 20 ans²⁰
- Taux de subvention = 0 %

Nota bene : *Pour les réseaux de chaleur comme pour les autres modes de chauffage, nous ne tenons pas compte des différentes mesures fiscales incitatives (et en particulier pour les réseaux de chaleur : subvention du Fonds chaleur à l'investissement, crédit d'impôt CITE sur les travaux de raccordement et TVA à taux réduite sur la livraison de chaleur majoritairement renouvelable ou récupérée) afin d'estimer le coût « réel » de chaque mode de chauffage que supporte in fine le consommateur à travers sa facture énergétique et sa contribution au financement des dépenses publiques associées.*

¹⁶ Pour les réseaux de chaleur

¹⁷ Ce coût est automatiquement inclus dans le prix socio-économique.

¹⁸ Il s'agit du taux d'actualisation public, préconisé par le rapport Quinet [6].

¹⁹ Nous prenons 20 ans de durée de vie pour l'ensemble des chaudières des différents modes de chauffage (cf. enquête OPEN 2013).

²⁰ Ordre de grandeur identifié dans la littérature.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Hypothèses de coût pour les six modes de chauffage conventionnels

À partir de plusieurs sites commerciaux²¹, nous associons à chaque mode de chauffage une technologie spécifique, un ordre de grandeur du coût TTC moyen de matériel, d'installation et d'entretien pour un logement de 70 m² en parc moyen²² ainsi qu'un rendement global (ECS et chauffage) :

Tableau 1 : Technologie et coûts du matériel des différents modes de chauffage

Mode de chauffage <i>Technologie</i>	Matériel	Coût du matériel et de l'installation (en €2016)	Coûts d'entretien annuel (en €2016)	Rendement (chauffage + ECS)
Gaz individuel <i>Chaudière mixte à gaz basse température</i>	chaudière, tuyaux, radiateurs, thermostats	7 500	100	85 %
PAC <i>PAC air-eau à air pulsé</i>	soufflerie par bouche au plafond, radiateurs, ballon, tuyaux et thermostat	12 000	100	200 %
Gaz collectif <i>Chaudière à condensation collective</i>	chaudière, circuits de chauffage, réseau de distribution d'ECS, radiateurs	5 000	30	90 %
Électricité <i>Radiateurs électriques</i>	radiateurs, raccordement électrique	4 000	15	100 %
Bois <i>Bois à granulés</i>	chaudière à granulés, récupérateur de chaleur, ballon, radiateurs, système d'air pulsé	15 000	120	80 %
Fioul <i>Cuve à fioul</i>	fosse, cuve, chaudière, radiateur, tuyaux, ballon	10 000	120	80 %

Source : Sites commerciaux

²¹ <http://testproduitsecolobio.free.fr> ; <http://www.quelleenergie.fr> ; <http://chauffage.comprendrechoisir.com> ; etc.

²² Afin d'estimer l'impact d'une augmentation de la surface d'un logement, nous rapportons l'ensemble de ces coûts à un coût moyen au m² pour avoir un ordre de grandeur pour une surface donnée.

Hypothèses de coût pour les réseaux de chaleur bois

Les coûts d'investissements initiaux – qui concernent la production et la distribution de chaleur sont désagrégés en ses différentes composantes, **toutes exprimées ici hors TVA** :

- **coût des chaudières principales²³** : ce coût tient compte de la puissance de la chaudière et d'un coût de production par kW. La formule retenue est :
Coût = Puissance* Coût/kW, avec les coûts unitaires fournis dans le tableau 2.

Tableau 2 : Coût des chaudières principales (en €2016/kW)

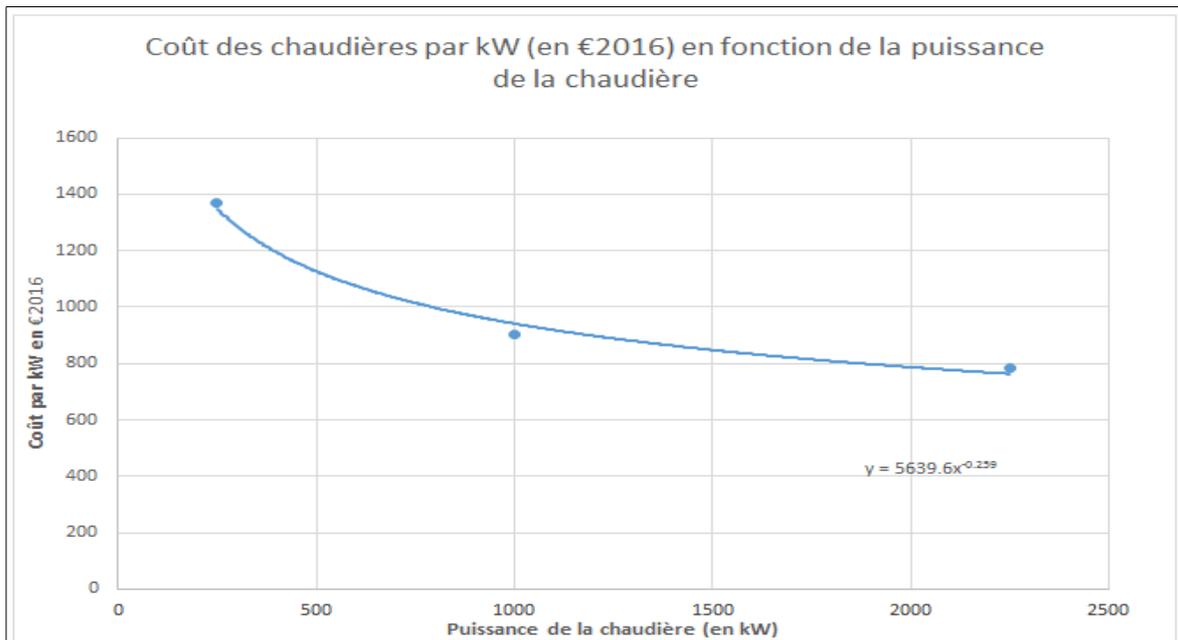
Puissance bois (kW)	Coût €2016/kW
0 < 500	1 370
500 < 1 500	902
1 500 < 3 000	784
3 000 < 10 000	636

Source : adapté du rapport Ademe-Cibe "Les réseaux de chaleur au bois" (2009) [7]

Pour ne pas créer de discontinuités dues aux valeurs « seuil », mais à la fois rendre compte des effets d'économie d'échelle, nous proposons une extrapolation puissance en graphique 3.

²³ Une chaufferie peut contenir plusieurs chaudières, mais nous supposerons que chaque chaufferie ne comportera qu'une seule chaudière, afin de mesurer les économies d'échelle permises par cette dernière.

Graphique 3 : Extrapolation du coût des chaufferies principales (en €2016/kW)



Source : Calculs CGDD

- **coût des chaudières d'appoint et de secours** : les chaudières d'appoint servent aux périodes de pointe alors que les chaudières de secours doivent avoir la capacité de produire l'énergie nécessaire à l'ensemble du réseau en cas de dysfonctionnement des autres installations de production. Nous supposons que chaudières d'appoint doivent avoir la même puissance que les chaudières principales ; de même pour les chaudières de secours²⁴. Nous retenons systématiquement des chaudières au gaz pour les chaudières d'appoint et de secours, du fait que ces dernières correspondent à l'investissement le plus faible.

En l'absence de données précises sur le coût au MW des chaudières d'appoint et de secours au gaz, nous avons estimé un ratio Coût au MW (gaz) / Coût au MW (bois) de 37 % à partir de différentes sources (AMORCE, CEREMA, sites commerciaux) : autrement dit, une chaudière à gaz nécessite un coût fixe d'investissement égal à 37 % de celui d'une chaudière principale à

²⁴ Par exemple, 2 chaudières bois de 5 MW, 1 chaudière d'appoint gaz de 8 MW, 1 chaudière de secours gaz/fioul de 10 MW. Autre exemple : 42 MW de puissance installée dont 12 MW de puissance fournie par deux chaudières biomasse, 15 MW de puissance en appoint secours au gaz naturel et 14 MW avec une chaudière supplémentaire au gaz naturel en ultime secours en cas de défaillance des deux chaudières biomasse.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

bois. Qui plus est, en supposant qu'il faut une chaudière d'appoint et une chaudière de secours de même puissance que la chaudière principale, nous obtenons au total :

$$\begin{aligned}\text{Coût des chaudières d'appoint et de secours} &= 37 \% * 2 * \text{Coût des chaudières principales} \\ &= 74 \% * \text{Coût des chaudières principales}\end{aligned}$$

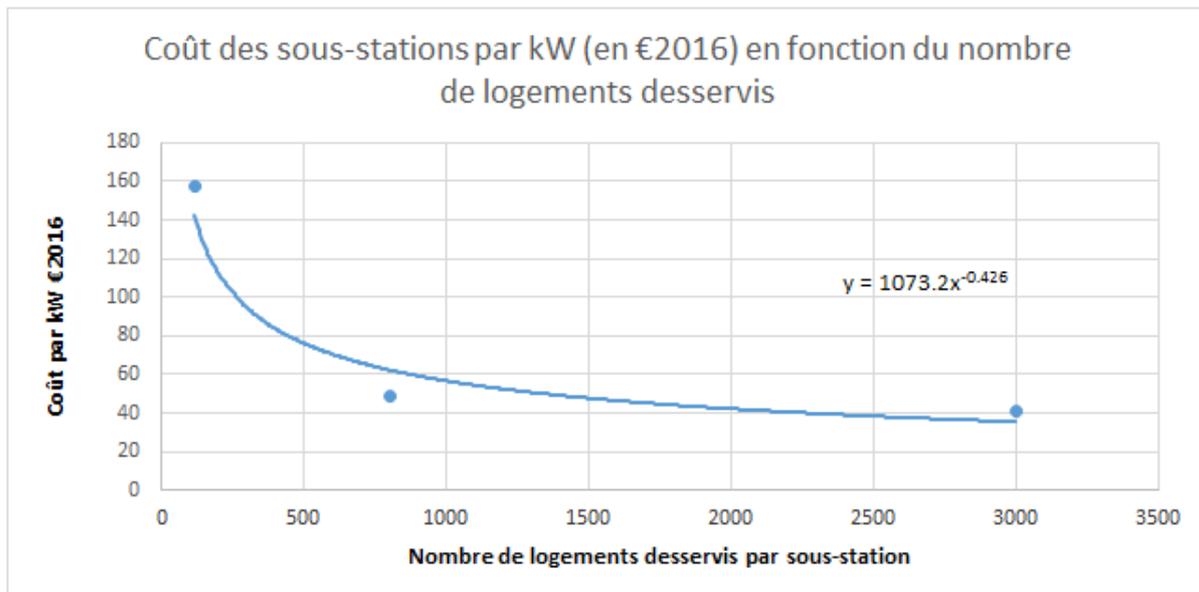
C'est ce coefficient de 0,74 que nous appliquons directement dans le modèle pour apprécier un ordre de grandeur du coût des chaudières d'appoint et de secours, et qu'il sera aussi possible de modifier, selon les besoins de l'exercice.

- **coût des sous-stations** : ce coût est proportionnel à la puissance des sous-stations selon des facteurs de proportionnalité qui révèlent également des effets d'économie d'échelle (figures 4).

Tableau et graphique 4 : Coût des sous-stations (en €2016/kW) et extrapolation du coût

Puissance de la sous-station (kW)	supérieur à 3 000	800	Inférieur à 115
Nombre de logements desservis	400	110	16
Coût de la sous-station (€2016/kW)	41	49	157

Source : Rapport "Les réseaux de chaleur" (Henri Prévot, Conseil général des mines, 2006) [8]



Source : Calculs CGDD

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

- **coût du réseau primaire** : ce coût est proportionnel à la longueur totale du réseau multipliée par un coût par mètre linéaire, ce coût unitaire dépendant de la puissance des chaudières principales et de la densité urbaine (tableau 5).

Tableau 5 : Coût en €2016 par mètre linéaire de réseau, selon la densité de population

Puissance des chaudières principales (en kW)	Densité urbaine		
	Faible	Moyenne et forte	Très forte
0 < 200	308	462	770
200 < 750	321	482	803
750 < 10 000	494	741	1 234

Source : Rapport « Comparaison des coûts de production de chaleur centralisée / décentralisée » (CETE Nord Picardie, décembre 2013) [9]

Il apparaît que le coût par mètre linéaire augmente avec la puissance des chaudières et avec la densité urbaine notamment du fait des coûts de génie civil et des caractéristiques techniques plus coûteuses des canalisations associées.

Par ailleurs, en s'appuyant sur le rapport "Les réseaux de chaleur" (Henri Prévot, Conseil général des Mines, 2006), le rapport du CETE Nord Picardie détermine une relation entre la densité urbaine et le nombre moyen de logements par sous-station (et donc indirectement la puissance de chaque sous-station, pour un volume d'énergie délivré constant) : tableau 6.

Tableau 6 : Correspondance entre la densité urbaine et le nombre moyen de logements par sous-station

Densité urbaine	Nombre moyen de logements par sous-station
Faible	5
Moyenne	16
Forte	140
Très forte	400

Source : Rapport « Comparaison des coûts de production de chaleur centralisée / décentralisée » (CETE Nord Picardie, décembre 2013) [9]

Par conséquent, nous considérerons par la suite une corrélation positive entre la densité urbaine et la puissance des sous-stations, et donc également une corrélation négative entre la densité urbaine et le nombre de sous-stations.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

- **Coût de raccordement** : en nous inspirant des coûts observés sur plusieurs réseaux de chaleur existants²⁵, nous estimons un coût de raccordement à **200 € le coût par kW souscrit**²⁶.

Les coûts annuels d'exploitation d'un réseau de chaleur, estimés à partir de l'ébauche de modèle de la DTerOuest – Cérema, sont la somme :

- d'un **coût de l'électricité annexe et du petit entretien** : ce coût dépend de la puissance de la chaudière principale et l'énergie finale distribuée (soit la chaleur en sortie des chaudières) (tableau 7).

Tableau 7 : Coût de l'électricité annexe et du petit entretien, selon la puissance

Puissance bois (MW)	En €2016/MWh
0 < 1	18,85
1 < 2	15,60
2 < 4,5	14,95
< 4,5	14,45

Source : Modèle DterOuest CEREMA

- d'un **coût du gros entretien et du renouvellement des installations** : ce coût est donné par la formule empirique $0.012 * (\text{investissement dans les chaudières principales} + \text{investissement dans les sous-stations} + 0.4 * \text{investissement dans le réseau})$.

Hypothèses sur le prix des énergies et des externalités

Au coût d'investissement initial et au coût d'exploitation, il reste à ajouter le coût annuel de l'énergie qui dépend du prix des énergies et de leurs évolutions respectives, d'un taux d'actualisation, de l'énergie primaire employée et de la consommation par m² en chauffage et en ECS.

Pour cela, nous avons développé un modèle de décomposition et de projection – jusqu'en 2050 des prix de l'électricité, du gaz, du fioul et du bois²⁷ qui distingue :

- un prix "acteurs" qui est celui effectivement payées par les consommateurs (TTC donc, y compris la taxe carbone, sauf pour l'électricité pour laquelle la composante carbone est prise en compte via les marchés ETS) ;

²⁵ À partir notamment du rapport de stage de Chloé Cardon (DTerOuest, 2013).

²⁶ Ce qui correspond au coût du réseau secondaire (i.e. le réseau en aval des sous-stations et en amont des bâtiments raccordés).

²⁷ Pour des raisons de coûts et de logistique, nous considérons des granulés bois pour le chauffage individuel au bois, et des plaquettes pour les réseaux de chaleur.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

- un prix "socio-économique", qui exclut la TVA ainsi que certaines taxes (celles qui couvrent spécifiquement les coûts inhérents à la filière), mais qui ajoute le coût des externalités négatives y compris du CO₂.

En particulier, nous retenons les hypothèses suivantes :

- **la fiscalité** :
 - Électricité : nous tenons compte de la TVA (18 %²⁸), la Taxe sur la consommation finale d'électricité (TCFE, 9,57 €/MWh) et la Taxe intérieure sur la consommation finale d'électricité²⁹ (TICFE, 22,5 €/MWh). Pour calculer le prix socio-économique, nous retirons du prix acteur la TCFE et la TVA, ajoutons la composante carbone et les autres externalités négatives, et tenons également compte d'une augmentation progressive de la TICFE dont une partie des recettes a vocation à soutenir les filières ENR.
 - Gaz : nous tenons compte de la TVA (18 %), la Taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel (TICGN, 4,34 €/MWh), la Contribution au Tarif Spécial de Solidarité Gaz (CTSSG, 20 ce/MWh), la Contribution au Service Public du Gaz (CSPG, 1,53c€/MWh) ainsi que la composante carbone. Pour calculer le prix socio-économique, nous retirons du prix acteur la TICGN et la TVA et ajoutons les autres externalités négatives.
 - Bois : nous tenons compte de la TVA (10 %). Pour calculer le prix socio-économique à partir du prix acteur, nous retirons la TVA et ajoutons les autres externalités négatives.
 - Fioul domestique : nous tenons compte de la TVA (20 %), la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques (TICPE, 9,68 €/MWh) et d'une composante carbone. Pour calculer le prix socio-économique, nous retirons du prix acteur la TICPE et la TVA, et ajoutons les autres externalités négatives.
- **la composante carbone** est supposée s'intégrer progressivement à la TICGN (Taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel) pour le gaz, à la TICPE (Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques) pour le fioul et à la TCFE (Taxe sur la consommation finale d'électricité) pour l'électricité³⁰. L'extrapolation est supposée géométrique entre les différents points de passage de la trajectoire Quinet (22 €/tonne CO₂ en 2016, 56 en 2020, 100 en 2030 et 239 en 2050).

Enfin, à partir du rapport OMINEA du Citepa, nous relevons et estimons des contenus CO₂ – supposés constants – par source d'énergie (tableau 8).

²⁸ Soit une moyenne pondérée de 20 % pour la partie énergie et 5,5 % pour la partie abonnement.

²⁹ Autrefois appelé Contribution au service public de l'électricité (CSPE).

³⁰ Mais uniquement pour le prix socio-économique.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Tableau 8 : Contenu CO₂ des différentes sources d'énergie

	Contenu CO ₂ (g/kWh)
Elec chauffage	148 ³¹
Gaz	201
Fioul	270
Bois (particulier et RC)	0

Source : Rapport OMINEA, Citepa [10]

En particulier, nous supposons que la production durable de bois permet une émission nulle de CO₂³².

- **les autres externalités négatives**, liées à la pollution locale causée par la production d'énergie, sont limitées aux externalités les plus coûteuses, à savoir les NOx et les particules (PM 2.5 et PM10). Nous estimons d'abord les valeurs tutélaires associées à chacune d'elles³³ en tenant compte de la densité urbaine³⁴ (tableau 9).

Tableau 9 : Coût des externalités négatives

	Coût des externalités ³⁵ €2016 / tonne
Nox	11 858
Particules PM (Urbain dense / Urbain diffus / Interurbain)	662 970 / 220 990 / 22 176

Source : Rapport « L'évaluation socio-économique en période de transition » (groupe de travail présidé par Émile Quinet (CGSP, 2014) [11])

³¹ Soit une pondération pour une consommation en parc moyen de 180 g/kWh pour le chauffage et 40 g/kWh pour l'eau chaude sanitaire ; cette valeur dépend du niveau de consommation relatif du chauffage et des ECS dans le modèle. De plus, cette valeur a vocation à diminuer à mesure que les centrales électriques à charbon fermeront.

³² Dans une approche en cycle de vie, les émissions nettes de CO₂ par le bois pourraient être considérées comme positives, et notamment à cause des émissions de la collecte et du transport du bois.

³³ Toutes les valeurs sont ici actualisées en euros 2016.

³⁴ Qui correspond à des valorisations différentes pour l'externalité « particules ».

³⁵ Nous supposons que le coût des autres externalités augmente de 1 % chaque année.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Puis, et à partir de différentes sources³⁶, nous estimons ou relevons les émissions maximales réglementaires qui seront imposées progressivement, dès le 1^{er} janvier 2016 (et au plus tard dès le 1^{er} janvier 2022) par type d'énergie (tableau 10).

Tableau 10 : Émissions de NOx et de particules des différentes sources d'énergies

En g/MWh	NOx	Particules (PM)
Électricité / PAC	26	1
Gaz Individuel / Collectif	63	1,3
Fioul	135	7,2
Bois granulés	19,2	1,9
Bois RC	50,4	4,8

Sources : Règlements européens

Pour la valorisation de l'externalité « PM », et en première approximation, nous supposons que les modes de chauffage « Bois particulier », « Fioul » et « Gaz » correspondent à une zone « urbain dense », que les réseaux de chaleur bois RC – généralement excentrés par rapport aux centres urbains - correspondent à une zone « urbain diffus » et que l'électricité correspond à une zone rurale³⁷ [12].

Enfin, il est à noter que les émissions maximales pour les réseaux de chaleur (ligne « Bois RC ») ont à terme vocation à être plus faibles que celles du chauffage au bois individuel (ligne « Bois granulés ») du fait de la centralisation des moyens de dépollution. Si le tableau indique un ordre inverse, c'est simplement dû au fait que nous considérons l'émission maximale la plus restrictive déjà prévue par un arrêté, un règlement ou une directive européenne : or, pour le bois granulés, l'émission maximale a déjà été fixée pour des équipements à installer à compter du 1^{er} janvier 2022 tandis que pour les réseaux de chaleur nous ne disposons que de l'émission maximale à compter du 1^{er} janvier 2016. Nous pourrions admettre qu'à un horizon temporel commun, les émissions maximales pour les réseaux de chaleur seront plus faibles que celles du bois

³⁶ Pour les émissions causées par la production d'électricité, nous nous appuyons sur les données du Citepa (<http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/oxydes-d-azote>). Nous tenons aussi compte de l'objectif de réductions appelées par la directive IED relative aux émissions industrielles à partir du 1^{er} janvier 2016 qui conduit EDF en particulier à se fixer l'objectif de réduire de 50 % les émissions de NOx et poussières de 2005 à 2020 (<http://rapport-dd-2013.edf.com/fr/les-emissions-de-so2-et-nox>).

Pour les particules produites par les sources de gaz et de fioul, nous nous appuyons sur les moyennes observées et indiquées par le Citepa (et notamment dans son rapport OMINEA).

Enfin, pour les NOx et les particules du bois, et pour les NOx du gaz et du fioul, nous nous appuyons sur l'arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 (relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910), sur le règlement mettant en œuvre la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil (établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie) et sur le règlement (UE) 2015/1185 de la commission du 24 avril 2015 (portant application de la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les exigences d'éco-conception applicables aux dispositifs de chauffage décentralisés à combustible solide).

³⁷ C'est ce qui explique le différentiel de coût entre le bois individuel et le bois RC, étant donné la valorisation très différente de l'externalité PM.

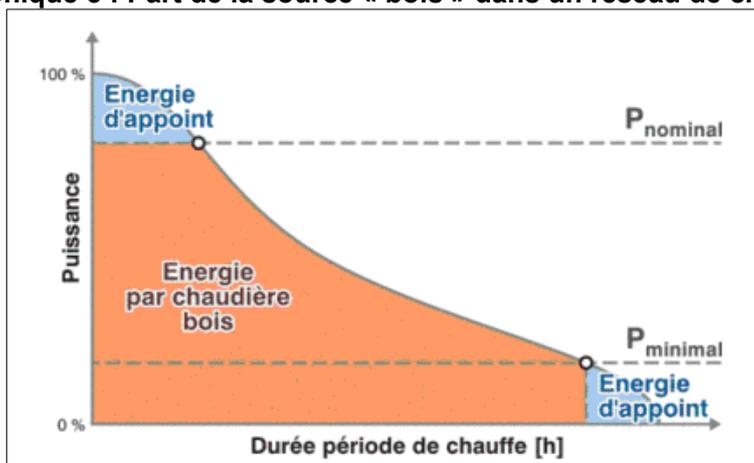
Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

individuel, mais en l'absence de données, nous nous contenterons de donner ici une majoration des externalités des réseaux de chaleur, **ce qui ne constitue pas un biais important puisque le coût des externalités s'avère relativement faible dans le coût total de la chaleur.**

Approvisionnement en énergie d'un réseau de chaleur

Pour les réseaux de chaleur, il convient de tenir compte de la production de chaleur via les chaudières principales au bois, et la production de chaleur via les chaudières d'appoint au gaz. À partir de divers sources, nous estimons à 80 % la couverture des besoins de chaleur par les chaudières principales, ce qui laisse 20 % aux chaudières d'appoint³⁸.

Graphique 5 : Part de la source « bois » dans un réseau de chaleur



Source : Site internet « EnergiePlus »

Projections des prix acteurs et socio-économiques des énergies

Nous obtenons ainsi le coût des externalités, les prix acteurs et socio-économiques ainsi que les taux de croissance annuels moyens associés (tableau 11).

³⁸ Le rendement moyen d'un réseau de chaleur sera en première approximation pondéré sur les rendements du gaz collectif et du bois (nous obtenons 81 % ce qui est un niveau acceptable) ; de plus, nous tenons compte d'un coefficient de perte de 10 % dans les canalisations (ordre de grandeur proposé dans la littérature).

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Tableau 11 : Projection des coûts des externalités négatives

	Coût des externalités en 2016 (en € 2016 / MWh)			Coût des externalités en 2036 (en € 2016 / MWh)		
	Contenu CO ₂ ³⁹	Contenu NOx	Particules	Contenu CO ₂	Contenu NOx	Particules
Électricité	2,55	0,31	0,02	15,11	0,38	0,03
PAC	1,28	0,15	0,01	7,56	0,19	0,01
Gaz	3,48	0,75	0,86	20,57	0,91	1,05
Fioul	4,68	1,60	4,77	27,63	1,95	5,82
Bois (particuliers)	0,00	0,23	1,27	0,00	0,28	1,55
Bois (RC)	0,00	0,60	1,06	0,00	0,73	1,29

Source : Calculs CGDD

Nous tenons compte de l'évolution des différentes composantes des prix acteurs et des coûts socio-économiques des énergies, et en particulier de celle de la part moléculaire dont le prix hors taxe est supposé évoluer de façon géométrique : 1 % par an pour l'électricité (hypothèse interne), 1,045 % par an pour le pétrole brut (Projections AIE de 2015), 1,025 % par an pour le gaz naturel vers l'Europe (Projections AIE de 2015) et 1,013 % par an pour le bois (Pégase, INSEE). Nous obtenons alors les coûts « acteurs » et « socio-économiques » en 2016 et 2036, ainsi qu'un taux de croissance annuel moyen (TCAM) pour chaque source d'énergie (tableau 12).

Tableau 12 : Projection des prix « acteurs » et des coûts « socio-économiques » des différentes sources d'énergie

	Coûts en 2016 (€ /MWh)		TCAM (% /an)		Coûts en 2036 (€ /MWh)	
	acteurs	socio-économiques	acteurs	socio-économiques	acteurs	socio-économiques
Électricité PAC	154,4	121,6	0,88 % ⁴⁰	1,79 %	183,9	173,3
Gaz	75,7	63,1	2,73 %	2,73 %	129,8	108,2
Fioul	80,2	65,5	4,33 %	4,38 %	187	154,4
PAC	154,4	121,6	0,88 %	1,79 %	183,9	173,3
Bois granulés (particuliers)	66,0	61,5	1,30 %	1,29 %	85,5	79,5
Bois plaquettes (RC)	22,0	21,7	1,30 %	1,28 %	28,5	27,9

Source : Calculs CGDD

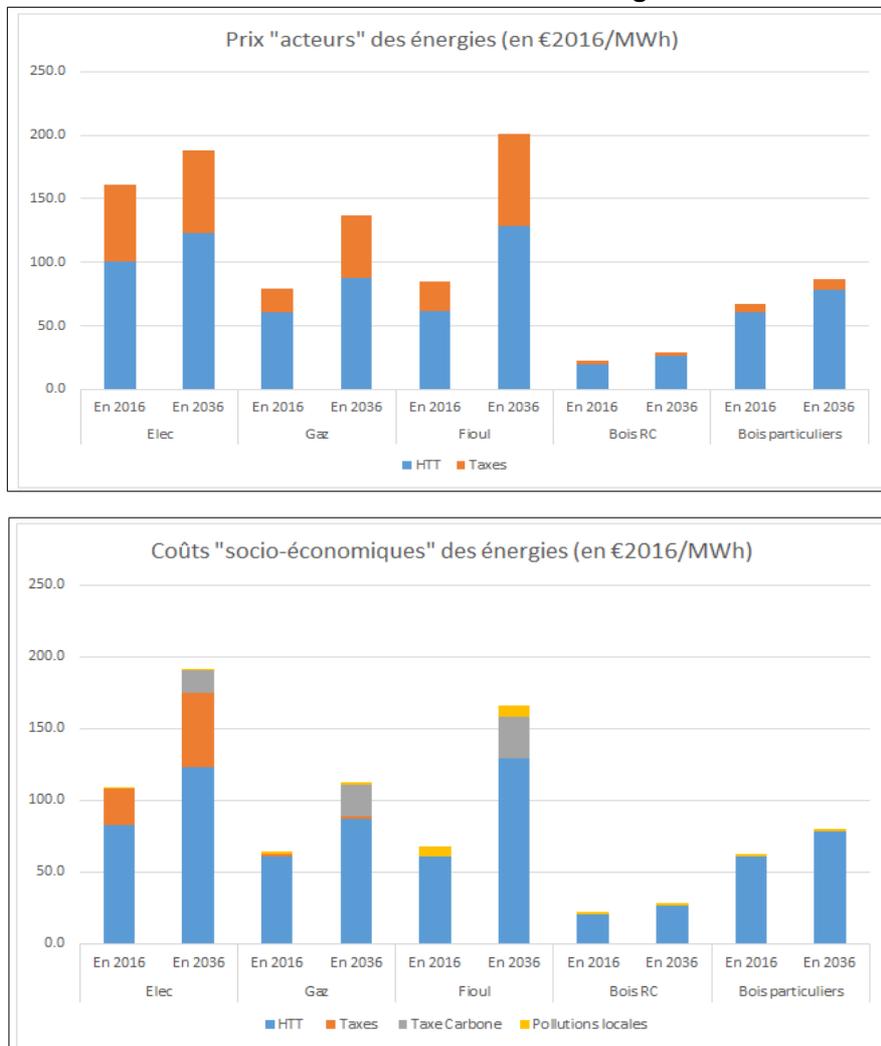
³⁹ Dans la pratique, pour 2016, nous tenons compte du fait que le coût du CO₂ est déjà intégré dans les taxes existantes.

⁴⁰ Ce taux est inférieur à celui du coût socio-économique du fait qu'une partie importante du surcoût de production des ENR est financé par une contribution sur les énergies fossiles et ne pèse donc pas sur les consommateurs d'électricité.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Enfin, afin d'apprécier les ordres de grandeur des différentes composantes des prix des énergies, et de leur évolution entre 2016 et 2036, nous décomposons les prix acteurs et des prix socio-économiques (graphique 6), sachant que nous ne retirons dans l'approche socio-économique que les taxes qui couvrent les coûts inhérents aux filières énergétiques, et sachant que nous tenons compte de la consommation de gaz dans les réseaux de chaleur à travers les chaudières d'appoint et de secours.

Graphiques 6 : Décomposition des prix « acteurs » et des coûts « socio-économiques » des différentes sources d'énergie



NB : Dans les deux graphiques précédents, les coûts « acteurs » et « socio-économiques » du bois RC tiennent compte de la part « gaz » des chaudières d'appoint et de secours, selon la pondération définie précédemment (à savoir 80 % pour le bois et 20 % pour le gaz).

Rappel (cf. pages 19 et 20) : Dans les coûts socio-économiques, la composante taxe représente les taxes qui couvrent spécifiquement les coûts inhérents à la filière énergétique.

Partie 2 : Développement d'un modèle de simulation du prix de la chaleur

Niveaux de consommation de chauffage et d'Eau Chaude Sanitaire⁴¹ (énergie finale en kWh/m²/an)⁴²

Nous obtenons les données en énergie finale, pour les bâtiments peu performants, le parc moyen et la RT 2005, à partir des données Amorce. En revanche, pour les RT2012 et RT2020, nous ne disposons que de données exprimées en énergie primaire. Or ces valeurs dépendent de plusieurs paramètres dont la zone climatique, et leur conversion en énergie finale dépend de l'énergie employée. À partir de données du Ceren, du CSTB et de l'Ademe, nous construisons donc un ordre de grandeur de l'énergie finale consommée (en kWh/m²/an) à partir de rapports de proportionnalité⁴³ :

Tableau 13 : Les différents niveaux de consommations de chauffage et de ECS

kWh/m ² /an	Chauffage	ECS
RT 2020	20	21
RT 2012	40	31,4
RT 2005	64,6	31,4
Parc moyen	104,6	31,4
Bâtiment peu performant	208,6	31,4

Source : Calculs CGDD

D'après le rapport "Les réseaux de chaleur" (Henri Prévot, 2006) [8], la consommation des logements individuels est plus faible du fait d'une meilleure régulation des besoins (pour les ordres de grandeur en RT2005 par exemple : 9 400 kWh par an en chauffage individuel et de 9 800 kWh par an en chauffage collectif). Nous appliquons donc dans le modèle un coefficient de 9,8/9,4 aux besoins en énergie finale pour les réseaux de chaleur et pour le gaz collectif⁴⁴.

⁴¹ Nous emploierons ECS pour Eau Chaude Sanitaire.

⁴² À partir des moyennes statistiques relevées par le modèle Amorce. Pour la RT2012 et 2020, nous prenons des ordres de grandeur à partir des données en énergie primaire du Ceren.

⁴³ Ces valeurs ne sont pas à considérer en absolu mais plutôt en relatif. Il s'agit simplement d'une première approximation.

⁴⁴ Le modèle permet de modifier ce paramètre.

Partie 3

Optimisation d'un réseau de chaleur bois

Différents effets d'échelle structurent les coûts d'investissement des chaudières, des sous-stations et du réseau de distribution qui constituent un réseau de chaleur : nous en mesurons l'amplitude à travers des tests *toutes choses étant égales par ailleurs*. Il ressort que l'augmentation de la densité thermique du réseau et de la puissance des chaudières et des sous-stations permet globalement d'augmenter la rentabilité d'un réseau de chaleur.



Afin de mieux comprendre les marges d'optimisation d'un réseau de chaleur bois, nous commençons par rappeler les contraintes à prendre en compte pour calibrer un réseau de chaleur de façon réaliste, puis nous estimons les effets d'échelle propres aux différentes caractéristiques d'un réseau de chaleur.

ÉQUATIONS DE CONSERVATION

Pour calibrer la puissance et le nombre des chaudières et des sous-stations d'une part, et la densité thermique et la longueur du réseau primaire d'autre part, il convient de **respecter une égalité énergétique** que nous spécifierons à chaque fois et que nous illustrerons par un exemple concret. Qui plus est, pour ne pas biaiser les résultats en sur-dimensionnant le réseau par rapport aux besoins de chaleur fixés en entrée du modèle, nous envisagerons le cas échéant un nombre non entier de chaudières ou de sous-stations (par exemple 2.7 chaudières).

Calibrage des chaudières principales

Pour calibrer les chaudières principales d'un réseau de chaleur, nous devons nous assurer de l'égalité énergétique :

$$\begin{aligned} & \text{Besoin annuel en énergie finale (kWh) par logement} * \text{nombre de logements} \\ & = \text{puissance de chaque chaudière (kW)} * \text{durée de fonctionnement (h)} * \text{nombre de chaudières} \\ & \quad \text{principales} * \text{rendement du réseau} \end{aligned}$$

Nous rappelons qu'une chaufferie peut contenir plusieurs chaudières, mais pour les besoins de l'exercice, qui estime les effets d'échelle de la puissance de chaque chaudière, nous supposons que chaque chaufferie ne possède qu'une unique chaudière. Nous utiliserons donc indistinctement les deux termes dans le cadre de notre exercice.

Par ailleurs, comme expliqué plus haut, nous supposons que les chaudières d'appoint et les chaudières de secours ont la même puissance que les chaudières principales : les chaudières d'appoint ne fourniront cependant que 20 % de la chaleur totale en moyenne, alors que les chaudières de secours doivent pouvoir se substituer complètement aux chaudières principales en cas de panne majeure.

Exemple : pour une durée de fonctionnement de 2 500 heures par an⁴⁵, un quartier de 1 200 logements avec le niveau de consommation « parc moyen », un rendement du réseau de 90 %, le besoin annuel en chaleur est de 16,1 GWh (en énergie finale). Sachant que les chaudières principales ne couvrent que 80 % des besoins en chaleur, nous pourrions considérer deux chaudières principales d'une puissance de 2 575 kW chacune ou 10 chaudières principales d'une puissance de 515 kW chacune.

⁴⁵ La durée de fonctionnement, appelée aussi «durée d'utilisation équivalente à pleine puissance», est généralement de 2 500 heures par an, pour un total maximum de 8 760 heures (nombre d'heures dans l'année). Cette durée dépend de la zone climatique.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois

N.B : Par la suite, nous considérons que les chaudières principales couvrent 80 % des besoins en chaleur, les chaudières d'appoint couvrant le complément de 20 %.

Calibrage des sous-stations

Pour calibrer la puissance des sous-stations d'un réseau de chaleur, nous devons nous assurer de l'égalité énergétique suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Puissance requise / logement (kW)} * \text{nombre de logements} \\ & = \text{puissance de chaque sous-station (kW)} * \text{nombre de sous-stations} \end{aligned}$$

Pour cela, nous supposons que pour le parc moyen, un m² requiert 0,1kW, soit 7 kW pour 70m² comme indiqué par le rapport « Les réseaux de chaleur » (Henri Prévot, 2006) [8] ; nous adaptons proportionnellement cette puissance requise au m² pour d'autres niveaux de consommation par logement.

Exemple : pour 1 200 logements en parc moyen, nous aurons besoin de trois sous-stations de puissance 2 800 kW chacune (3*400 = 1 200 logements) ou de 75 sous-stations de puissance 112 kW chacune (75*16 = 1 200 logements)

Calibrage de la longueur du réseau

Enfin, pour calibrer le réseau (primaire/secondaire), nous devons nous assurer de l'égalité énergétique suivante :

$$\begin{aligned} & \text{Besoin annuel en énergie finale (kWh) / logement} * \text{nombre de logements} \\ & = \text{longueur du réseau (m)} * \text{densité thermique (kWh/m)} \end{aligned}$$

La densité thermique d'un réseau de chaleur est calculée comme le ratio de la chaleur distribuée sur la longueur des conduites au départ des chaudières. Pour en décliner des niveaux typiques, nous nous inspirons de trois réseaux de chaleur existants et cités dans le rapport « Les réseaux de chaleur » (Henri Prévot, Mines 2006) [8] : le réseau de Paris a une densité thermique élevée : 6 TWh de chaleur distribuée pour 450 km de conduites ; le réseau de Grenoble a une densité thermique moyenne : 0,7 TWh pour 130 km ; enfin, le réseau de la cité de la Planoise a une densité thermique faible : 15 000 MWh pour 11 km.

Soit en résumé :

Tableau 14 : Quantification de trois niveaux de densité thermique

Densité thermique (en MWh / km linéaire)	Forte	Moyenne	Faible
	13 000	5 400	1 400

Exemple : pour une chaleur distribuée de 16,1 GWh par an, un réseau de chaleur ayant une densité thermique forte de 13 000 MWh/ km linéaire nécessitera 1,24 km de réseau, tandis qu'un réseau de chaleur ayant une densité thermique faible de 1 400 MWh/ km linéaire nécessitera 11,5 km de réseau.

IDENTIFICATION DES PRINCIPAUX DÉTERMINANTS DES COÛTS DES RÉSEAUX DE CHALEUR

Dans le cas d'une création de réseau de chaleur, nous réalisons des tests de sensibilité – toutes choses étant égales par ailleurs - autour de la puissance des chaudières, de leur durée de fonctionnement, de la puissance des sous-stations et des densités thermique et urbaine afin d'estimer les effets d'échelles sur ses différentes composantes de coûts. **Les prix indiqués – acteurs ou socio-économiques - correspondent au prix d'un MWh d'énergie finale, hors subventions.**

Encadré : Exemple d'un réseau de chaleur existant et ordres de grandeur des coûts

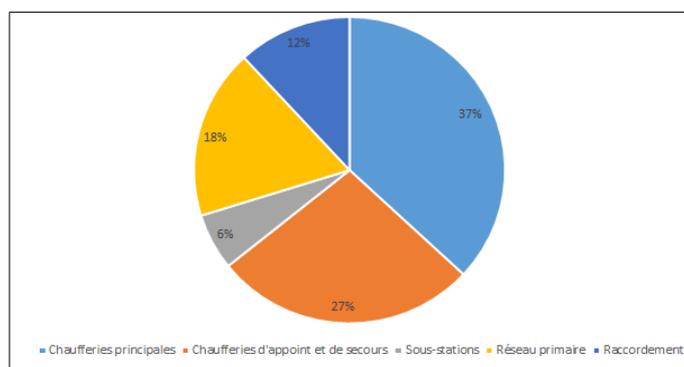
Pour faciliter la lecture et la comparaison des résultats, nous considérons un réseau de chaleur existant (tableau 15) et l'identifions comme le scénario de référence (« RC E » pour « Réseau de Chaleur Existant »).

Tableau 15 : Caractéristiques du réseau de chaleur existant

	RCE
Puissance par chaudière principale (en kW)	1 800
Durée de fonctionnement (h)	2 500
Nombre de chaudières	3,6
Puissance par sous-station (en kW)	260
Nombre de sous-stations	32
Densité thermique (MWh/km linéaire)	4 715
Longueur linéaire du réseau (en m)	3 423
Nombre de logements par sous-station	140

Les parts des différentes composantes de coût qui composent le coût total d'investissement d'un réseau de chaleur (graphique 7), permettent de vérifier que les effets d'échelle au niveau des chaudières et du réseau primaire sont les plus importants.

Graphique 7 : Répartition moyenne des coûts d'un réseau de chaleur



Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois

Impact marginal de la puissance de la chaudière

Augmenter la puissance des chaudières (principales et d'appoint) permet de réaliser une économie d'échelle sur les coûts de la chaudière, mais aussi des coûts d'exploitation. En revanche, le coût du mètre linéaire du réseau primaire augmente avec la puissance des chaudières. Pour apprécier l'amplitude de ces évolutions contrastées, nous concevons sur un quartier de 1 200 logements⁴⁶ quatre réseaux de chaleur identiques en tout point sauf sur la puissance des chaudières qui le desservent (et qui diffèrent donc du nombre de chaudières puisque nous supposons le volume de chaleur délivré constant)⁴⁷ (tableau 16).

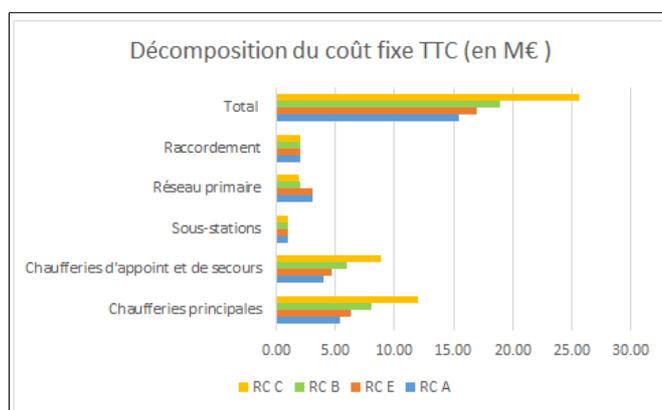
Tableau 16 : Caractéristiques spécifiques et communes aux réseaux de chaleur étudiés

	RC A	RC E	RC B	RC C
Puissance par chaudière principale (en kW)	3 200	1 800	700	150
Nombre de chaudières	2	3,6	9,2	43
Coût de la chaudière par kW (en €)	697	809	1 033	1 540
Coût du mètre linéaire ⁴⁸ (en €)	741	741	482	462

Nombre de logements par sous-station	37
Puissance par sous-station (en kW)	260
Nombre de sous-stations	32,3
Coût de la sous-station par kW (en €)	100
Densité thermique (MWh/kmlinéaire)	4 715
Longueur linéaire du réseau (en m)	3 423

Nous obtenons alors les coûts d'investissements initiaux RC et les prix acteurs et socio-économiques suivants : graphiques 8.

Graphiques 8 : Coûts d'investissement et prix au MWh des différents réseaux de chaleur

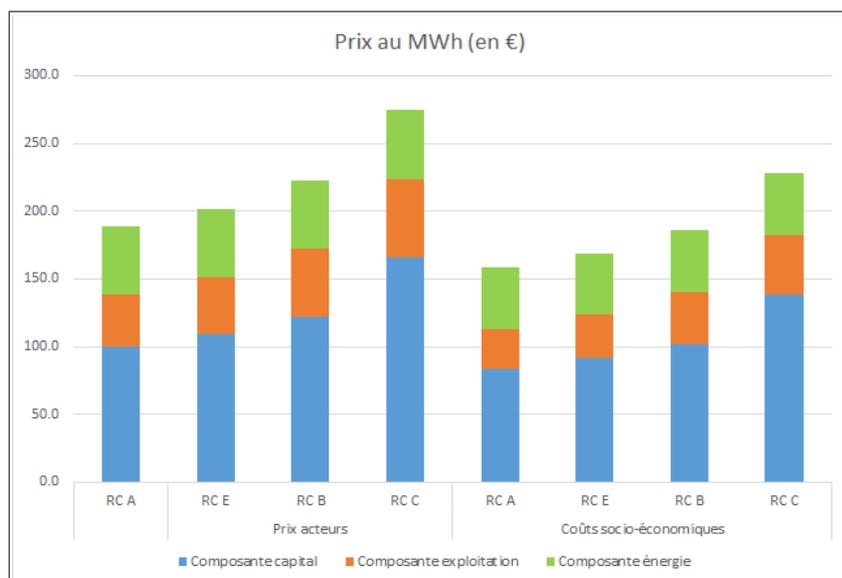


⁴⁶ En consommation « parc moyen » soit un total de 16,1 GWh annuels en énergie finale.

⁴⁷ Nous aurions pu fixer le nombre de chaudières et faire varier la demande d'énergie, mais les résultats au MWh auraient été les mêmes.

⁴⁸ Le coût au mètre linéaire du réseau dépend directement de la puissance des chaudières comme indiqué dans la matrice des coûts linéaires.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois



En augmentant la puissance des chaudières, les déséconomies d'échelle sur le coût du réseau primaire sont donc plus faibles que les économies d'échelle produites sur le coût des chaufferies et les coûts d'exploitation.

Conclusion : Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la puissance des chaudières est importante, plus le réseau de chaleur est rentable.

Impact marginal de la durée de fonctionnement des chaudières

Pour un réseau de chaleur donné, nous envisageons le cas d'un effet de foisonnement qui se produit par exemple si le réseau alimente à des heures différentes un quartier résidentiel et un quartier d'affaires, ou une proportion importante de clients industriels. Ainsi par rapport à un réseau de chaleur de référence (RC E), nous considérons un réseau de chaleur desservant le même nombre d'équivalents logements pour lequel le nombre de chaudières est divisé par deux (RC Ebis) (tableau 17).

Tableau 17 : Caractéristiques spécifiques et communes⁵⁰ aux réseaux de chaleur

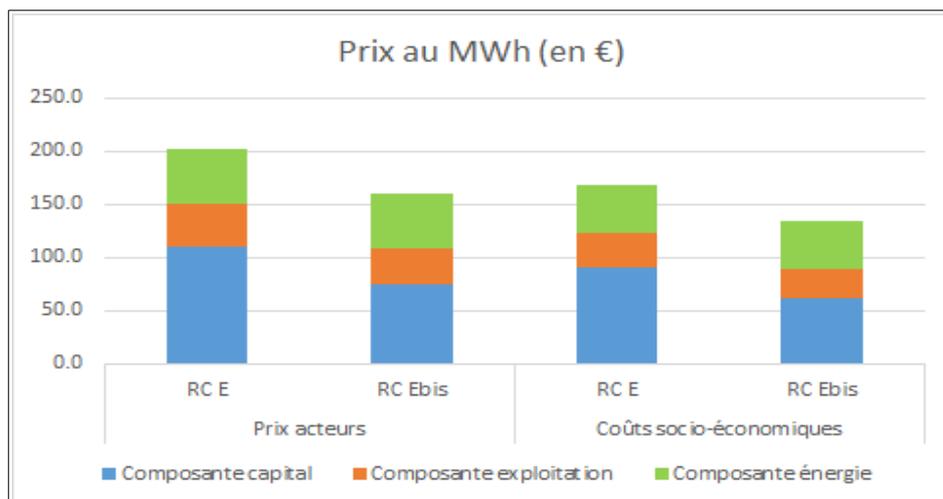
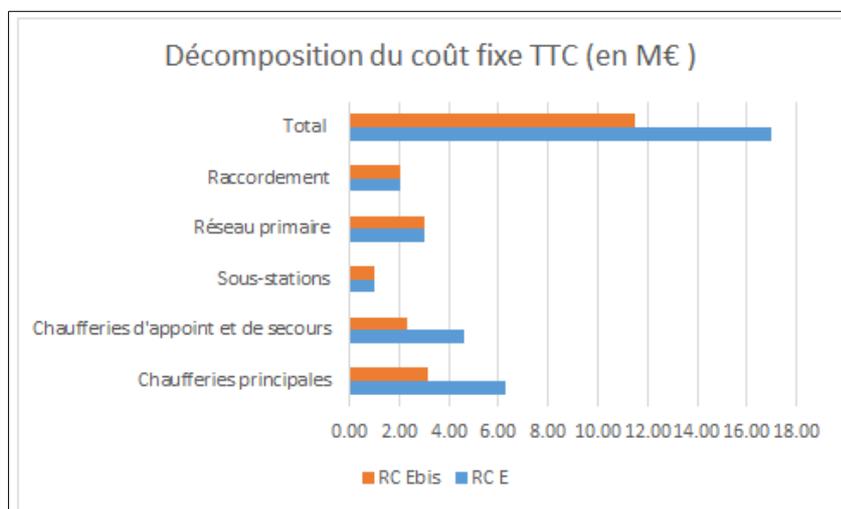
	RC E	RC Ebis
Durée de fonctionnement des chaudières (h)	2 500	5 000
Puissance par chaudière principale (kW)	1 800	1 800
Nombre de chaudières	3,6	1,8
Coût de la chaudière par kW (en €)	809	809
Nombre de logements par sous-stations		37
Puissance par sous-station (en kW)		260
Nombre de sous-stations		32,3
Coût de la sous-station par kW (en €)		100
Densité thermique (MWh/kmlinéaire)		4 715
Longueur linéaire du réseau (en m)		3 423
Coût par mètre linéaire de réseau (en €)		741

⁵⁰ Rapportées à 16,1 GWh.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois

Nous obtenons alors les coûts d'investissements initiaux RC et les prix acteurs et socio-économiques suivants : graphiques 9.

Graphiques 9 : Coûts d'investissement et prix au MWh des différents réseaux de chaleur



Conclusion : Toutes choses étant égales par ailleurs, l'augmentation de la durée de fonctionnement permet de réduire les coûts d'investissements et donc le prix au MWh.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois

Impact marginal de la puissance des sous-stations

Augmenter la puissance des sous-stations permet de réaliser une économie d'échelle sur les coûts des sous-stations, mais aussi des coûts d'exploitation. Pour apprécier l'amplitude de cette économie d'échelle, nous envisageons - de même - sur un quartier de 1 200 logements⁵¹ quatre réseaux de chaleur identiques en tout point sauf sur la puissance des sous-stations qui le desservent (et qui diffèrent donc par le nombre de sous-stations puisque nous supposons le volume de chaleur délivré constant) (tableau 18).

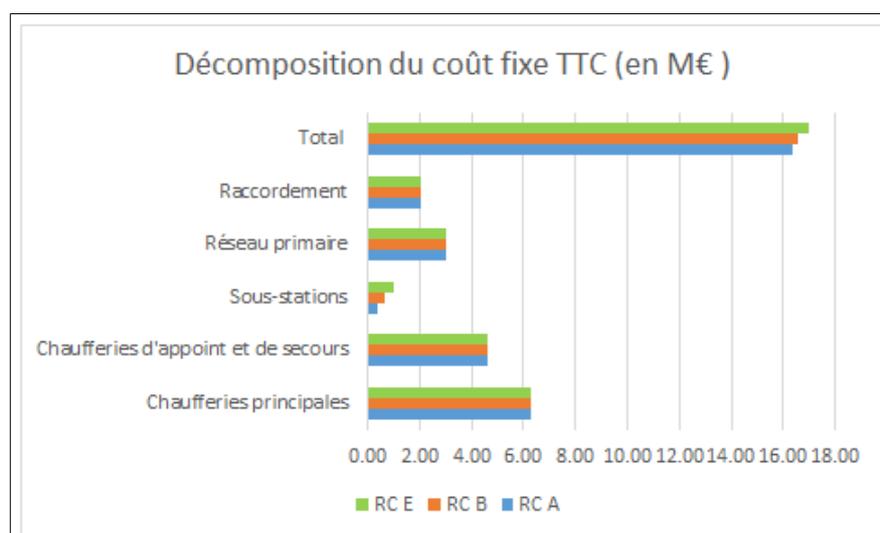
Tableau 18 : Caractéristiques spécifiques et communes aux réseaux de chaleur

	RC A	RC B	RC E
Puissance par sous-station (en kW)	2 800 ⁵²	800	260
Nombre de sous-stations	3	10,5	32,3
Coût de la sous-station par kW (en €)	36,5	62,2	100,4

Puissance par chaudière principale (en kW)	1 800
Nombre de chaudières	3,6
Durée de fonctionnement (h)	2 500
Coût de la chaudière par kW (en €)	809
Longueur linéaire du réseau (en m)	3 423
Densité thermique (MWh/kmlinéaire)	4 715
Coût par mètre linéaire de réseau (en €)	741

Nous obtenons alors les coûts d'investissements initiaux RC et les prix acteurs et socio-économiques suivants : graphique 10.

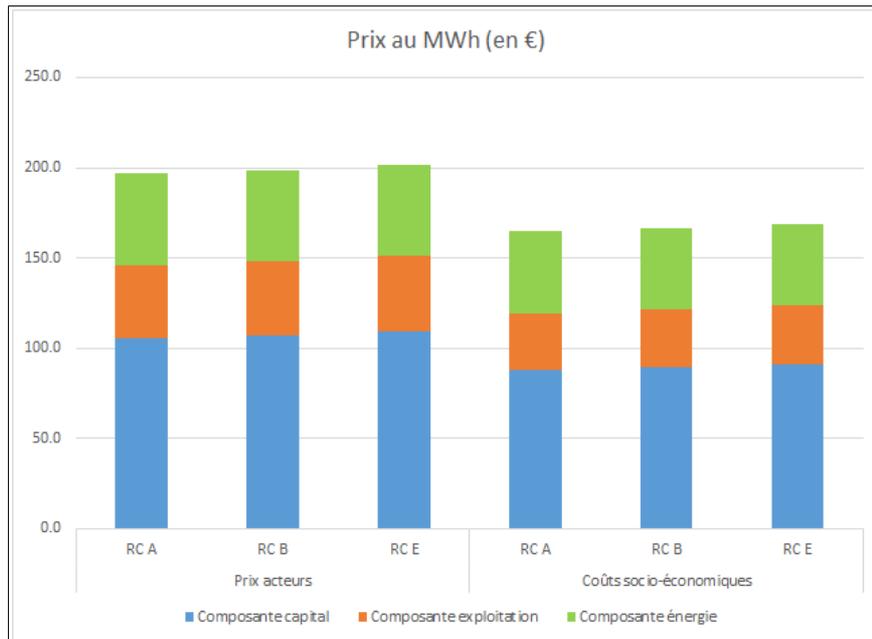
Graphiques 10 : Coûts d'investissement et prix au MWh des différents réseaux de chaleur



⁵¹ En consommation « parc moyen » soit un total de 16,1 GWh annuels en énergie finale.

⁵² Une telle puissance correspond à l'ordre de grandeur des sous-stations à Paris.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois



Conclusion : Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la puissance des sous-stations est importante, moins le réseau de chaleur est rentable. Cependant, l'impact d'une modification de la puissance des sous-stations demeure relativement faible sur les coûts et les prix.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois

Impact marginal de la densité thermique et urbaine du réseau

À volume de chaleur fixé, augmenter la densité thermique (par exemple dans un contexte de densité urbaine croissante) revient à diminuer la longueur du réseau primaire mais à augmenter son coût unitaire, ce qui se traduit in fine par une baisse de son coût global. Pour apprécier l'amplitude de cette économie d'échelle, nous envisageons - de même - sur un quartier de 1 200 logements⁵³ trois réseaux de chaleur identiques en tout point sauf sur la densité thermique :

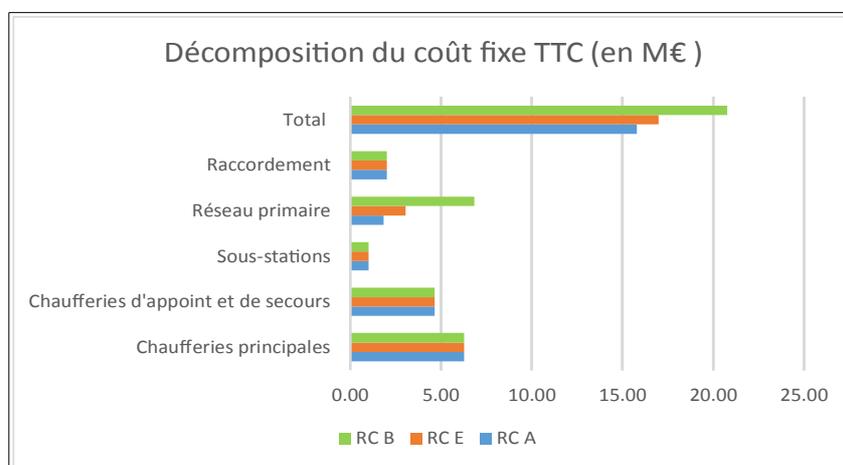
Tableau 19 : Caractéristiques spécifiques et communes aux réseaux de chaleur

	RC A	RC E	RC B
Densité thermique (en MWh / km linéaire)	13 000	4 715	1 400
Longueur du réseau (m)	1 240	3 423	11 527
Densité urbaine	Très forte	Moyenne	Faible
Coût par mètre linéaire de réseau (en €)	1234	741	494

Puissance par chaudière principale (en kW)	1 800
Nombre de chaudières	3,6
Durée de fonctionnement	2 500
Coût de la chaudière par kW (en €)	809
Puissance de la sous-station (en kW)	260
Nombre de sous-stations	32,3
Coût de la sous-station par kW (en €)	100

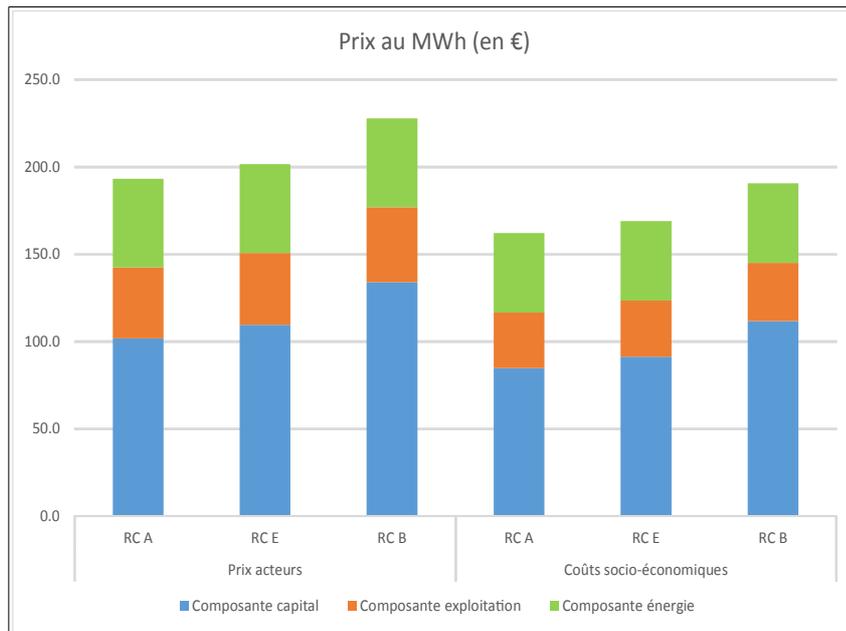
Nous obtenons alors les coûts d'investissements initiaux RC et les prix acteurs et socio-économiques suivants : graphiques 11.

Graphiques 11 : Coûts d'investissement et prix au MWh des différents réseaux de chaleur



⁵³ En consommation « parc moyen » soit un total de 16,1 GWh annuels en énergie finale.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois



Conclusion : Lorsque les densités thermiques et urbaines augmentent, la longueur du réseau diminue plus vite que le coût du réseau au mètre linéaire n'augmente. Ainsi, et toutes choses étant égales par ailleurs, plus la densité thermique et urbaine est importante, plus le réseau de chaleur est rentable.

Récapitulatif

À partir des évolutions et des amplitudes obtenues, nous concluons qu'augmenter la forme urbaine et/ou le nombre de logements par sous-stations et/ou la puissance des chaudières permet de diminuer conjointement l'ensemble des composantes de coût du réseau de chaleur et *in fine* le prix du MWh. Nous résumons ci-dessous les variations absolues maximales de la composante « capital » et de la composante « exploitation » du prix de la chaleur des réseaux de chaleur, par rapport à la valeur médiane : tableau 20.

Tableau 20 : Variation des composantes capital et exploitation du prix de la chaleur des réseaux de chaleur par rapport à la médiane

	Puissance chaufferie		Puissance sous-station		Densité thermique	
	plus forte	plus faible	plus forte	plus faible	plus forte	plus faible
Composante capital	-25	+25	-3	+3	-16	+16
Composante exploitation	-8,5	8,5	-0,7	0,7	-1,5	1,5

Ainsi, en définissant deux typologies de quartier où ces trois variables sont conjointement élevées ou conjointement faibles, nous obtenons un encadrement du coût de production des réseaux de chaleur.

Partie 3 : Optimisation d'un réseau de chaleur bois

Partie 4

Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

En dépit d'une grande hétérogénéité des réseaux de chaleur existants, il apparaît une corrélation statistique positive entre la puissance des chaudières, la puissance des sous-stations et la densité thermique. Comme l'augmentation conjointe de ces paramètres permet d'augmenter la rentabilité des réseaux de chaleur, nous simulons deux cas polaires, de faible ou de forte puissance, afin d'estimer un intervalle maximal de coûts des réseaux de chaleur.

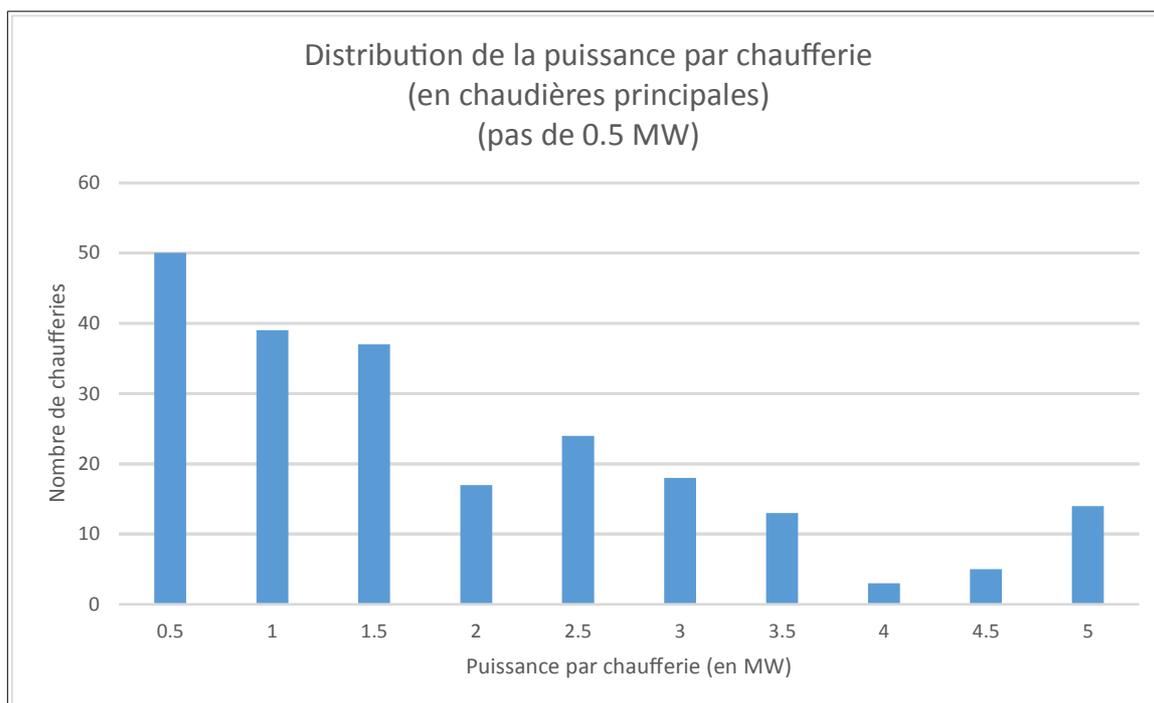


Afin de simuler les coûts des réseaux de chaleur, et d'apprécier l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur, il est essentiel d'appréhender les éventuelles corrélations entre les caractéristiques d'un réseau de chaleur d'une part, et les caractéristiques urbaines d'autre part.

HÉTÉROGÉNÉITÉ DES RÉSEAUX DE CHALEUR

En nous appuyant sur des données de l'enquête sur les réseaux de chaleur et de froid (2014)⁵⁴, qui considère en particulier les réponses **de 225 réseaux de chaleur alimentés au bois**, il apparaît une grande hétérogénéité des réseaux de chaleur « bois », tant de la puissance par chaufferie principale, de la puissance par sous-station, du nombre de sous-stations⁵⁵ par réseau de chaleur, ou encore de la densité thermique et de la longueur du réseau primaire, comme en témoignent les courbes de distribution (graphiques 12)⁵⁶ :

Graphiques 12 : Cinq courbes de distribution pour les caractéristiques des réseaux de chaleur au bois

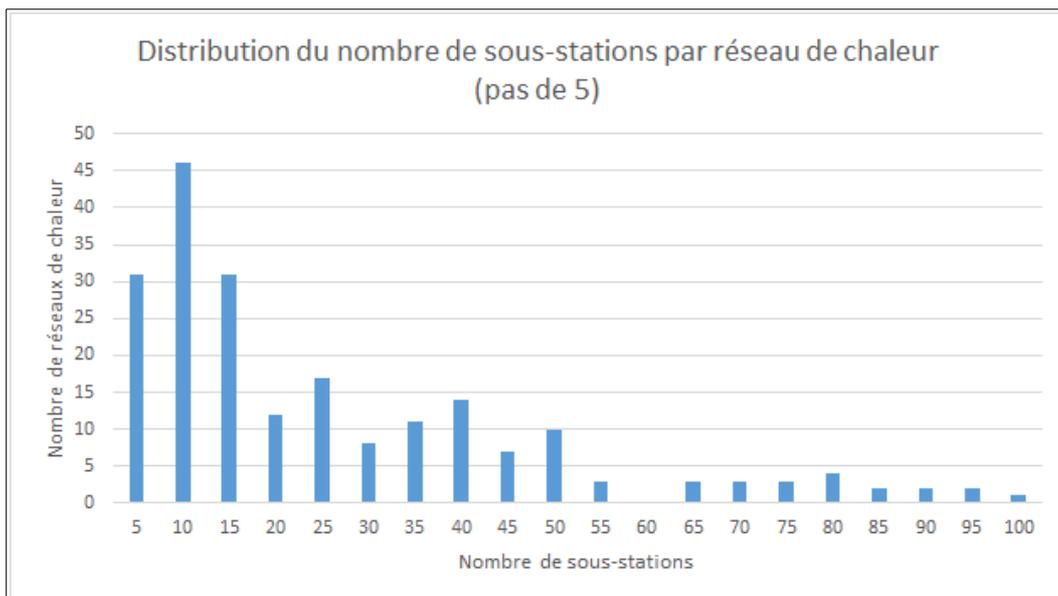
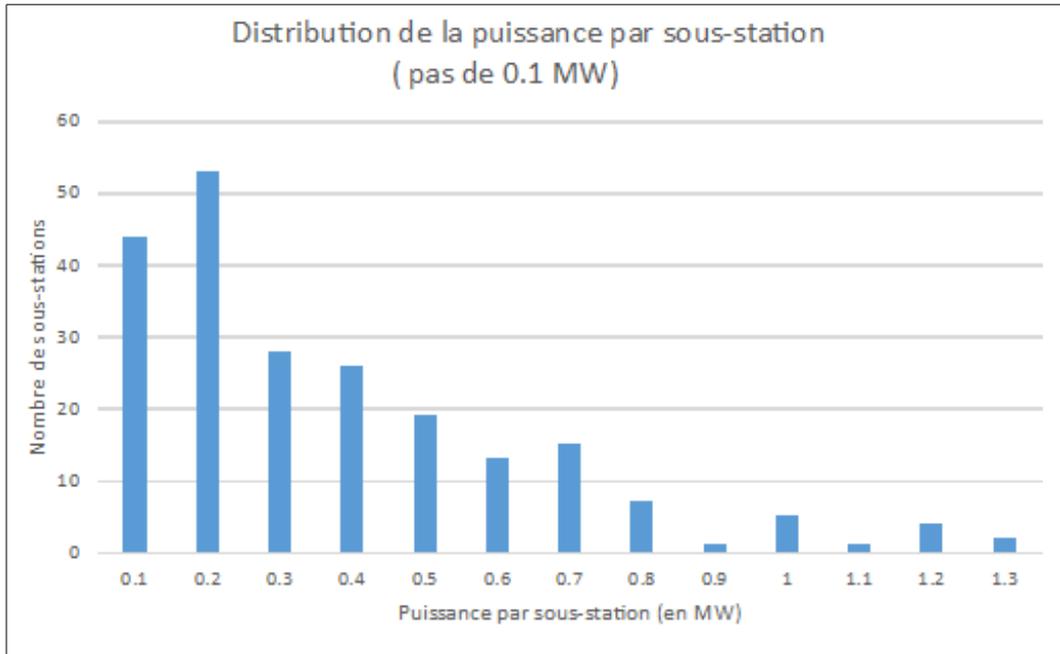


⁵⁴ http://réseaux-chaleur.cerema.fr/wp-content/uploads/20150205-ENQUETE_2013_Rapport-final-2014.pdf

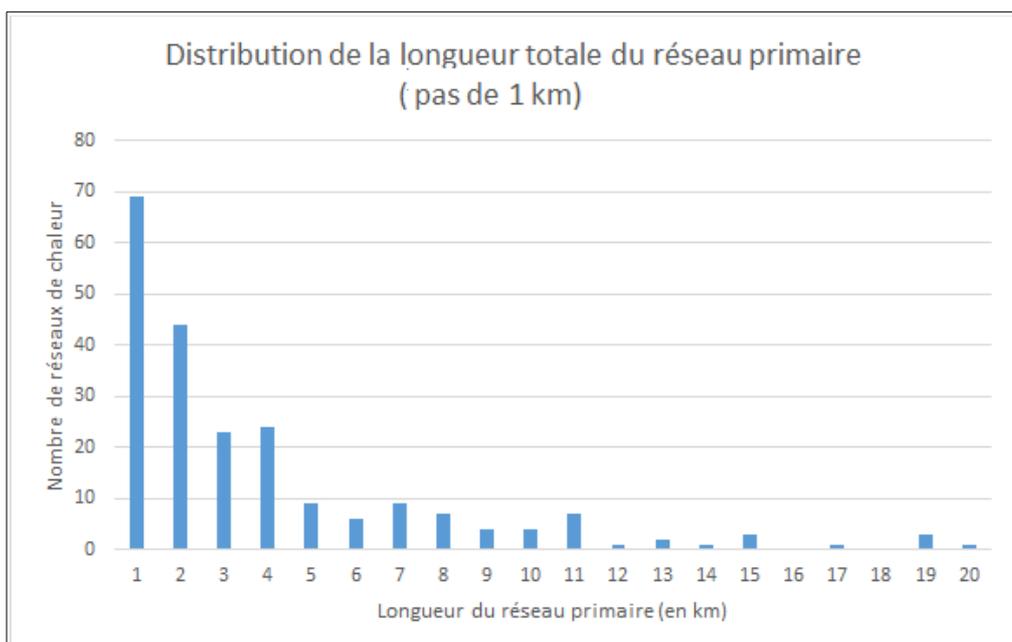
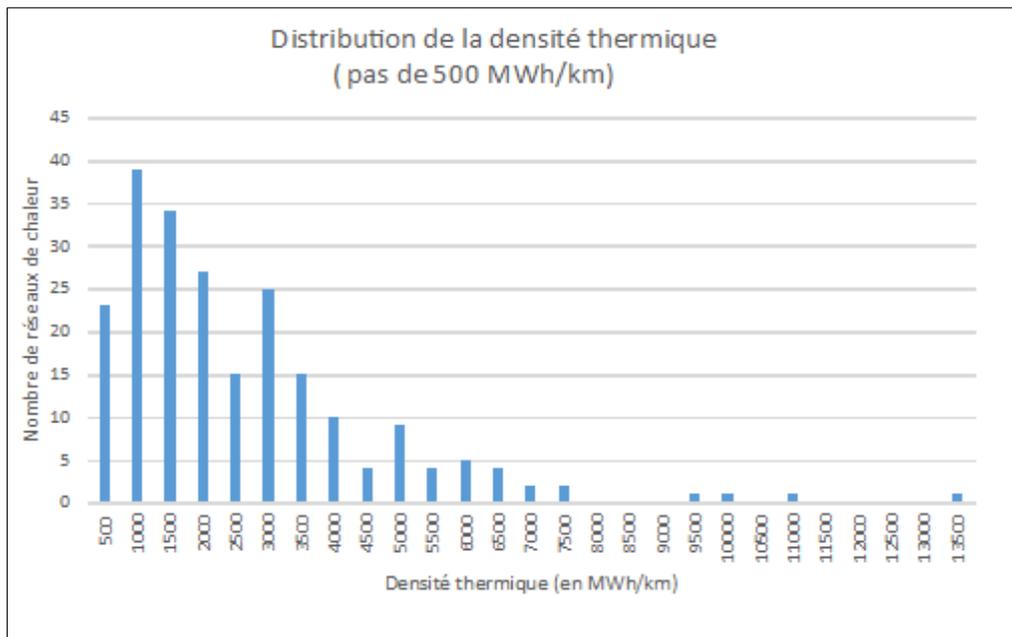
⁵⁵ Autrement appelée « point de livraison ».

⁵⁶ Dans un souci de lisibilité, nous avons retiré les valeurs les plus extrêmes (c'est-à-dire trois fois supérieures à la médiane), si toutefois elles représentent moins de 10 % de l'échantillon.

Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur



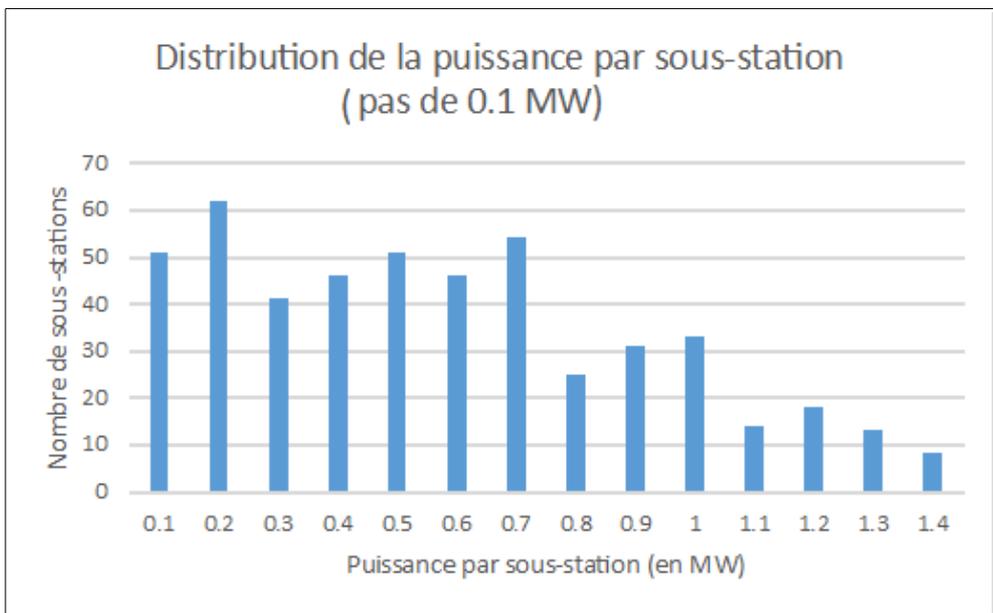
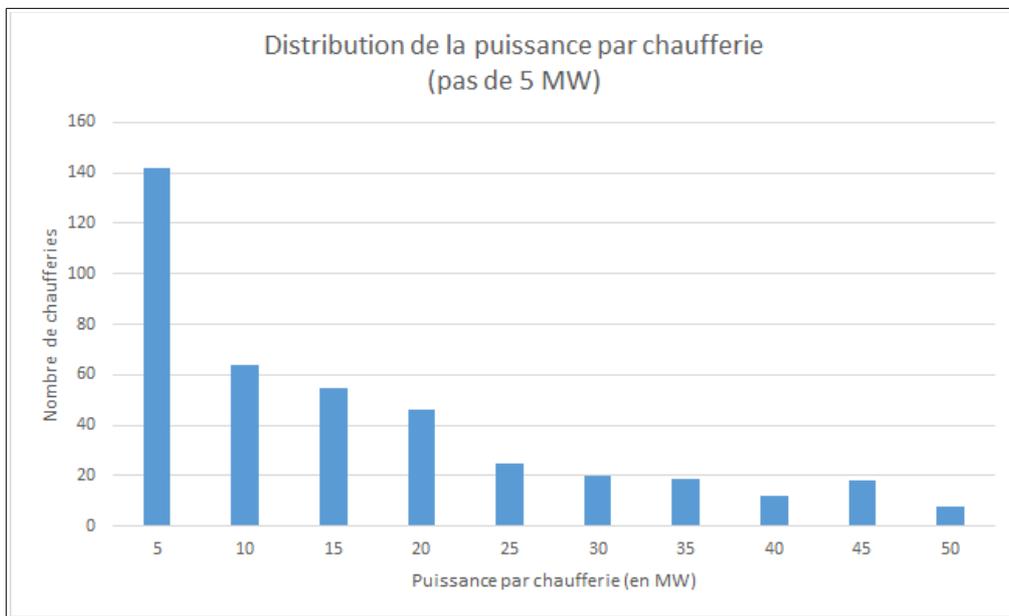
Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur



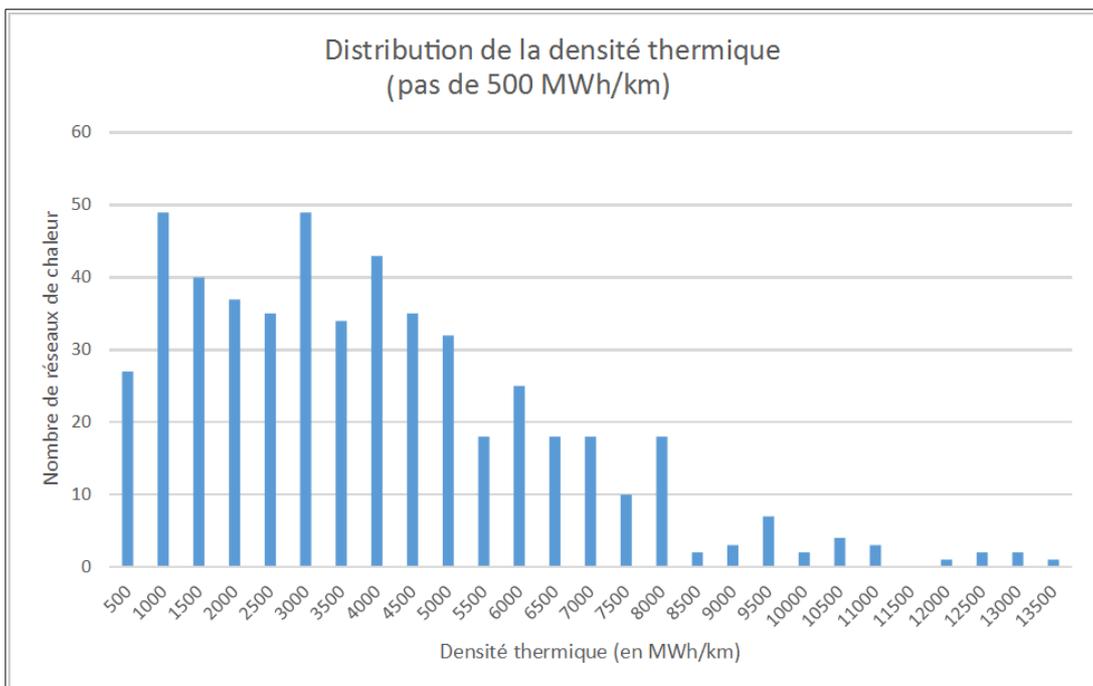
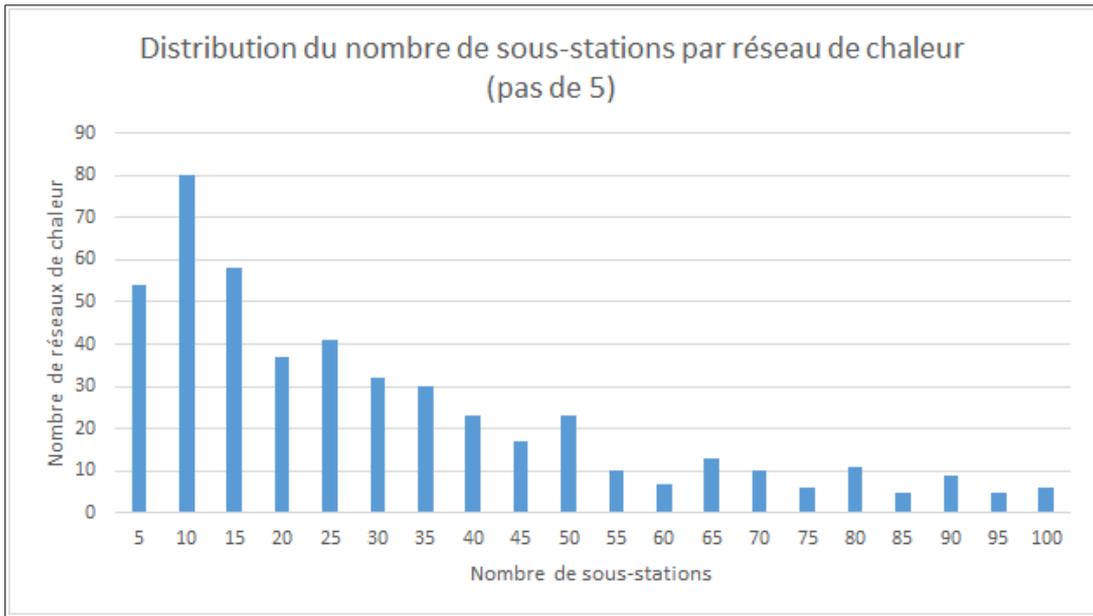
Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

Si l'on considère à présent l'**ensemble des réseaux de chaleur** (plus de 500), il apparaît une dispersion encore plus grande pour chacune des caractéristiques (**graphiques 12 bis.**)

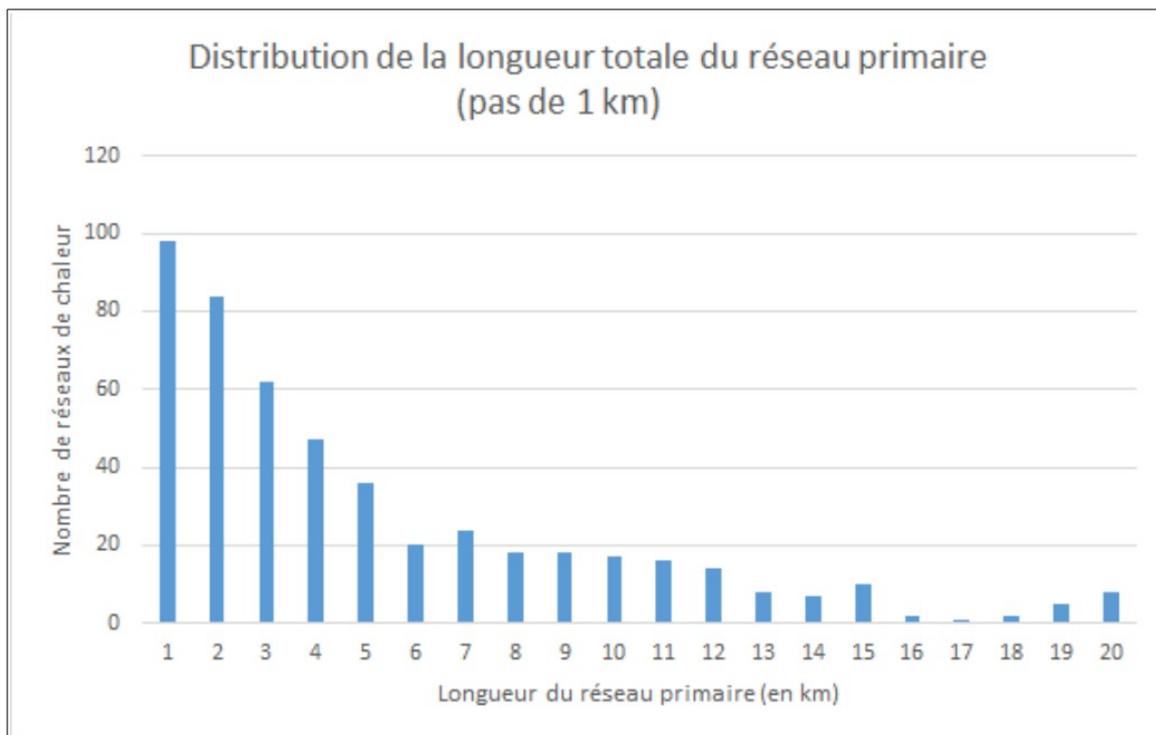
Graphiques 12 bis : Cinq courbes de distribution pour l'ensemble des réseaux de chaleur (bois, gaz, etc.)



Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur



Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

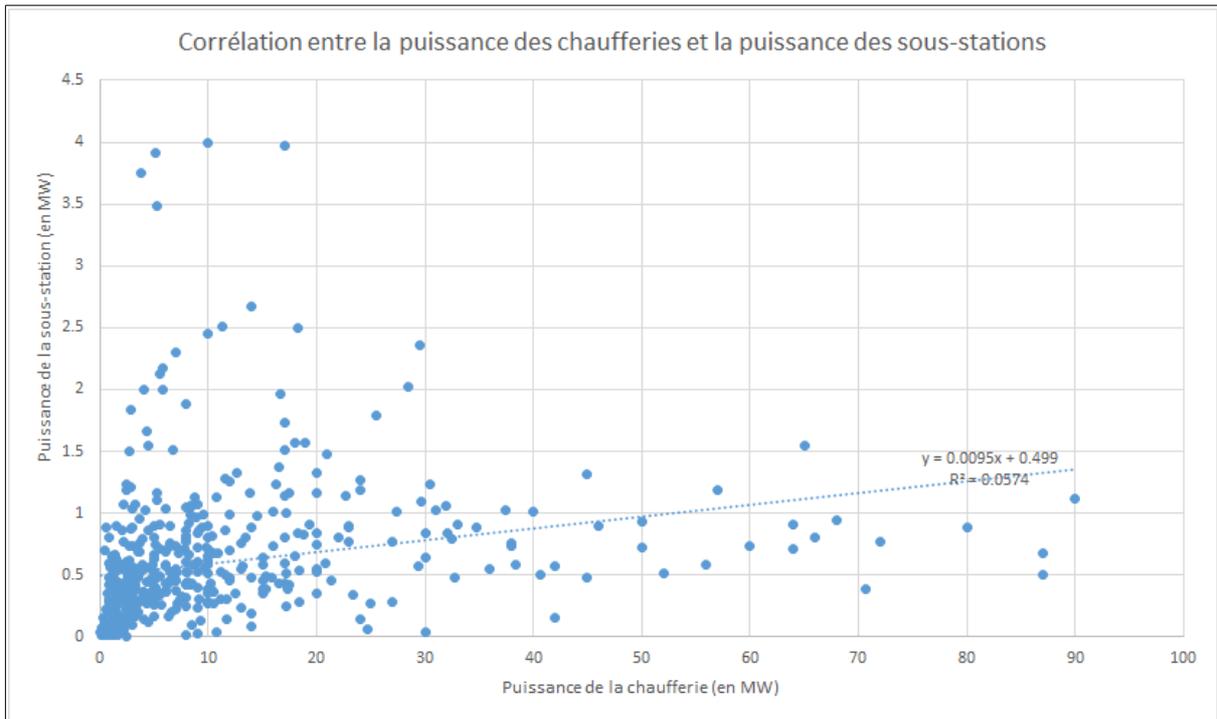


En dépit de la grande hétérogénéité des réseaux de chaleur, nous allons voir qu'il existe une corrélation positive entre certaines de leurs caractéristiques.

LIENS ENTRE LES DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES D'UN RÉSEAU DE CHALEUR

En dépit de la grande hétérogénéité des réseaux de chaleur, il apparaît une corrélation positive entre certaines caractéristiques d'un réseau de chaleur. **En considérant l'ensemble des réseaux de chaleur, et comme l'illustrent les graphiques suivants : à chaleur desservie constante, plus les sous-stations sont puissantes⁵⁷, plus la densité thermique est forte⁵⁸, et plus les chaudières sont puissantes.**

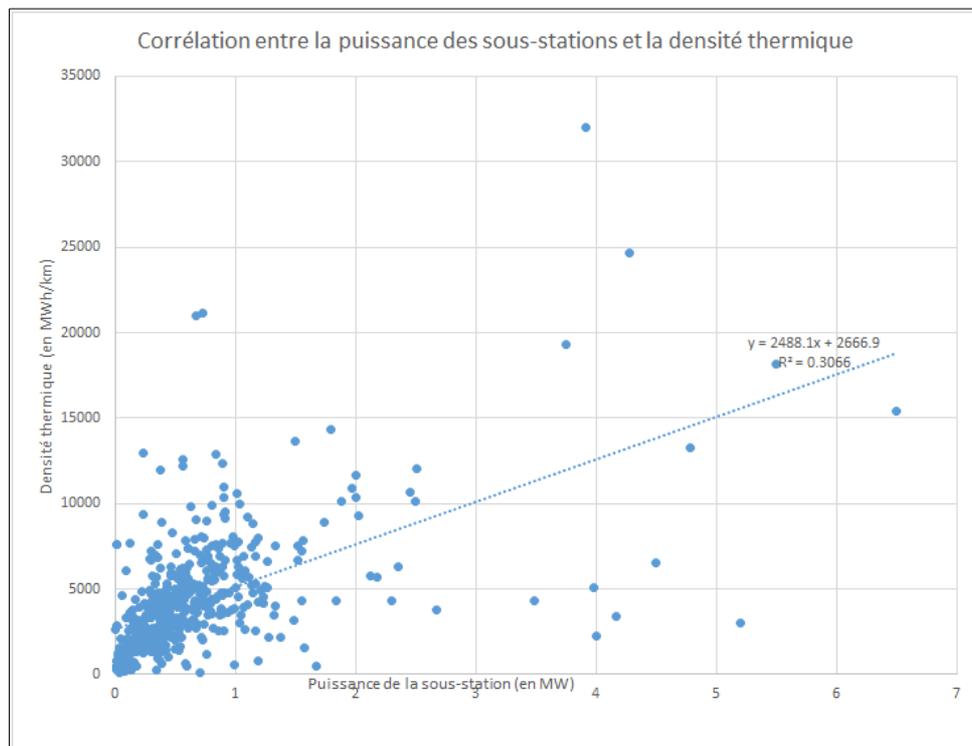
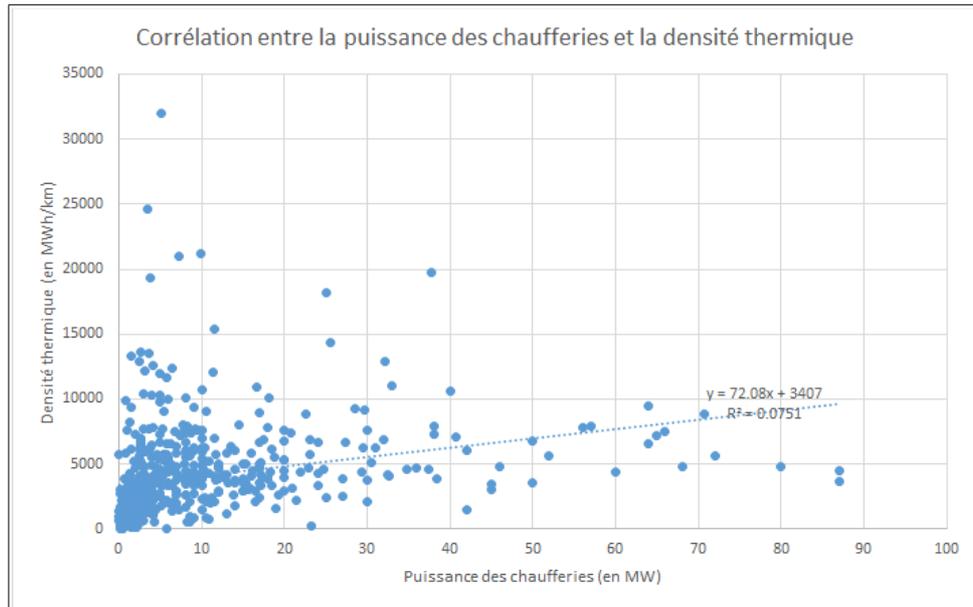
Graphiques 13 : Corrélations entre la puissance des chaudières principales, la puissance des sous-stations et la densité thermique des réseaux de chaleur



⁵⁷ Ce qui peut s'expliquer par le fait que chaque sous-station devra desservir un plus grand nombre de logements.

⁵⁸ Ce qui peut s'expliquer par le fait que la longueur du réseau devra être plus faible pour une même quantité de chaleur à délivrer.

Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur



Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

En appelant x la puissance des chaufferies, y la puissance des sous-stations et z la densité thermique, une analyse multivariée nous amène à calculer les coefficients de corrélation partielle $r_{xy,z}$, $r_{xz,y}$ et $r_{yz,x}$ ($r_{xy,z}$ par exemple correspond à la corrélation entre la variable x et la variable y après avoir contrôlé chacune d'elles par la variable z via une régression linéaire). Nous appliquons alors la formule suivante (où les coefficients de corrélation r_{xy}^2 , r_{xz}^2 et r_{yz}^2 sont égaux aux coefficients de déterminations R^2 des régressions simples correspondantes) :

$$r_{yz \bullet x} = \frac{r_{yz} - r_{xy}r_{xz}}{\sqrt{[(1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz}^2)]}}$$

Nous obtenons, par permutations successives, $r_{yz,x} = 0.523$, $r_{xy,z} = 0,110$ et $r_{xz,y} = 0,175$ dont la positivité indique effectivement **une corrélation positive conjointe entre les trois variables**.

En particulier, et pour mieux comprendre la corrélation entre la taille d'un réseau (i.e. la longueur du réseau primaire) et sa densité thermique et la puissance de ses sous-stations, nous régressons la longueur du réseau primaire $LOG(KM)$ sur la quantité totale de chaleur délivrée $LOG(MWH)$ d'une part, et le nombre de sous-stations $LOG(NB_SS)$ sur la quantité totale de chaleur délivrée $LOG(MWH)$ et la longueur du réseau primaire $LOG(KM)$. Nous obtenons alors les deux équations économétriques suivantes où l'ensemble des paramètres estimés sont significatifs (à plus de 95%) :

$$LOG(KM) = -3.97 + 0.56 * LOG(MWH) + \varepsilon$$

(0.18) (0.019)

$$LOG(NB_SS) = 1.40 + 0.12 * LOG(MWH) + 0.57 * LOG(KM) + \varepsilon$$

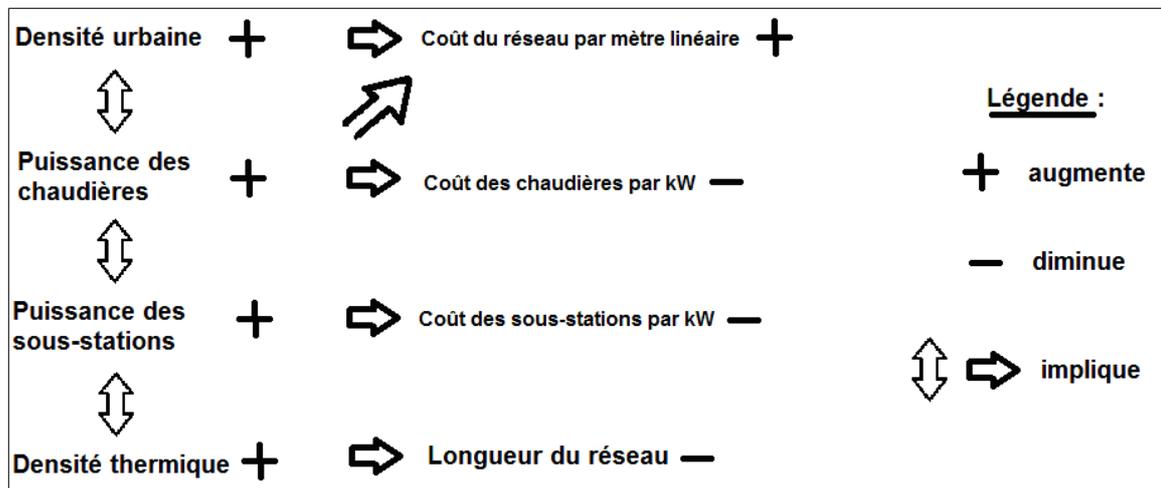
(0.26) (0.032) (0.045)

Il apparaît d'une part que la longueur du réseau évolue approximativement comme la racine carrée de la quantité totale de chaleur délivrée (i.e. $KM = \sqrt{MWH}$) ; or la densité thermique étant égale au ratio de la quantité totale de chaleur délivrée par la longueur du réseau, nous en déduisons que la densité thermique augmente également comme la racine carrée de la taille du réseau (densité thermique = $MWH / KM = MWH / \sqrt{MWH} = \sqrt{MWH}$). D'autre part, il ressort que le nombre de sous-stations évolue moins vite que la quantité totale de chaleur délivrée ($0,12 < 1$) et que la longueur du réseau ($0,57 < 1$) : en corollaire, cela signifie que la puissance moyenne des sous-stations augmente avec la taille du réseau. **En résumé, ces données confirment que les réseaux de grande taille présentent en moyenne des densités thermiques fortes et sont donc sans doute préférentiellement implantés dans des zones de densité urbaine élevée.**

Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

De plus, nous avons vu que la puissance des sous-stations est positivement corrélée à la densité urbaine : en effet, plus la densité urbaine est forte, plus les sous-stations doivent être puissantes pour desservir chacune un plus grand nombre de logements sur une même surface. **En définitive, il ressort différents liens entre les différentes composantes d'un réseau de chaleur, et leurs coûts unitaires respectifs**, que nous synthétisons dans le graphique 14.

Graphique 14 : Synthèse des corrélations entre les caractéristiques et les coûts unitaires d'un réseau de chaleur



DÉTERMINATION DE L'INTERVALLE DE COÛTS DES RÉSEAUX DE CHALEUR

Du fait des corrélations positives entre la forme urbaine, la densité urbaine, la puissance des chaudières, la puissance des sous-stations et la densité thermique, nous considérons trois réseaux de chaleur desservant trois quartiers où l'ensemble de ces variables évoluent conjointement :

- un réseau de chaleur A, noté par la suite « RC A », dans un quartier dense de grande hauteur caractérisé par une forte densité thermique, et des chaudières et des sous-stations de fortes puissances ;
- à l'inverse, un réseau de chaleur B, noté par la suite « RC B », dans un quartier peu dense de faible hauteur caractérisé par une faible densité thermique, et des chaudières et des sous-stations de faibles puissances ;
- de façon intermédiaire, le réseau de chaleur E, noté par la suite RC E, correspondra à un quartier moyennement dense, de hauteur moyenne, et des chaudières et des sous-stations de puissances intermédiaires.

Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

Or, en étudiant l'impact marginal de l'augmentation de chacune des caractéristiques d'un réseau de chaleur, il ressort que les économies d'échelle sur le coût de la puissance des chaudières et des sous-stations l'emportent largement sur la déséconomie d'échelle sur le coût du réseau primaire.

Les réseaux de chaleur RC A et RC B ci-dessous correspondent à deux cas polaires visant à encadrer le coût de la chaleur produite par un réseau de chaleur, RC E correspondant à une situation moyenne.

Nous considérons 1 200 logements de 70 m² en parc moyen pour chaque quartier ayant chacune ses caractéristiques (tableau 21).

Tableau 21 : Caractéristiques des trois réseaux de chaleur « type »

	RC A	RC E	RC B
Puissance par chaudière principale (en kW)	3 200	1 800	500
Durée de fonctionnement (h)	2 500	2 500	2 500
Nombre de chaudières	2	3,6	12,9
Coût de la chaudière par kW (en €)	697	809	1127
Puissance par sous-station (en kW)	2 800	260	112
Nombre de sous-stations	3	32,3	75
Coût de la sous-station par kW (en €)	36,5	100	144
Densité thermique (MWh/km linéaire)	13 000	4 715	1 400
Longueur linéaire du réseau (en m)	1 240	3 420	11 527
Nombre de logements par sous-stations	400	140	16
Coût par mètre linéaire de réseau (en €)	1 234	741	482

N.B. 1 : Il apparaît que les quartiers A et B correspondent à des typologies de quartier réalistes puisque nous relevons dans l'enquête SNCU près 8 réseaux de chaleur dont les caractéristiques sont proches du type RC A et 63 réseaux de chaleur proches du type RC B. De plus, ces deux typologies de quartier, si elles s'écartent des relations économétriques établies précédemment, c'est précisément parce qu'elles correspondent à des caractéristiques extrêmes et donc éloignées de la moyenne des caractéristiques que reflètent les coefficients des relations économétriques.

N.B. 2 : Plutôt que de considérer des réseaux de chaleur comportant un nombre identique – et entier – de chaudières et de sous-stations, nous décidons de considérer pour la suite de

l'exercice un unique quartier ayant des besoins en chaleur identiques, et d'adapter les typologies de réseau de chaleur RC A, RC E et RC B, quitte à produire un nombre non entier de chaudières et de sous-stations. Ce choix est motivé par trois raisons :

- Par rapport à la situation où nous aurions considéré des réseaux de chaleur comportant un nombre identique – et entier – de chaudières et de sous-stations, le coût au MWh est inchangé, par linéarité des équations ;
- En coûts totaux, il est nécessaire de comparer des projets sur un quartier constant ; a contrario, il n'y aurait aucun sens à comparer le coût total d'investissement d'une petite installation avec une grande, cette dernière coûtant bien entendu plus cher ;
- Enfin, et comme indiqué précédemment, adapter le réseau de chaleur (quitte à produire un nombre non entier de chaudières et de sous-stations) permet de ne pas surdimensionner un réseau par rapport à des besoins constants donnés, et d'éviter des effets de seuil consistant à ajouter ou à retirer une chaudière (ou une sous-station) à 1 kWh de besoin en chaleur près.

Partie 4 : Détermination de l'intervalle de coûts des réseaux de chaleur

Partie 5

Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

Cette partie compare les coûts d'investissement et les coûts de production de chaleur de six modes de chauffage conventionnels à ceux des trois réseaux de chaleur définis dans la partie 4, dans le cas d'une création et d'une extension d'un réseau : alors que la création d'un réseau de chaleur se justifie surtout pour des réseaux de forte puissance, l'extension d'un réseau de chaleur est quasi systématiquement la solution la plus économique.



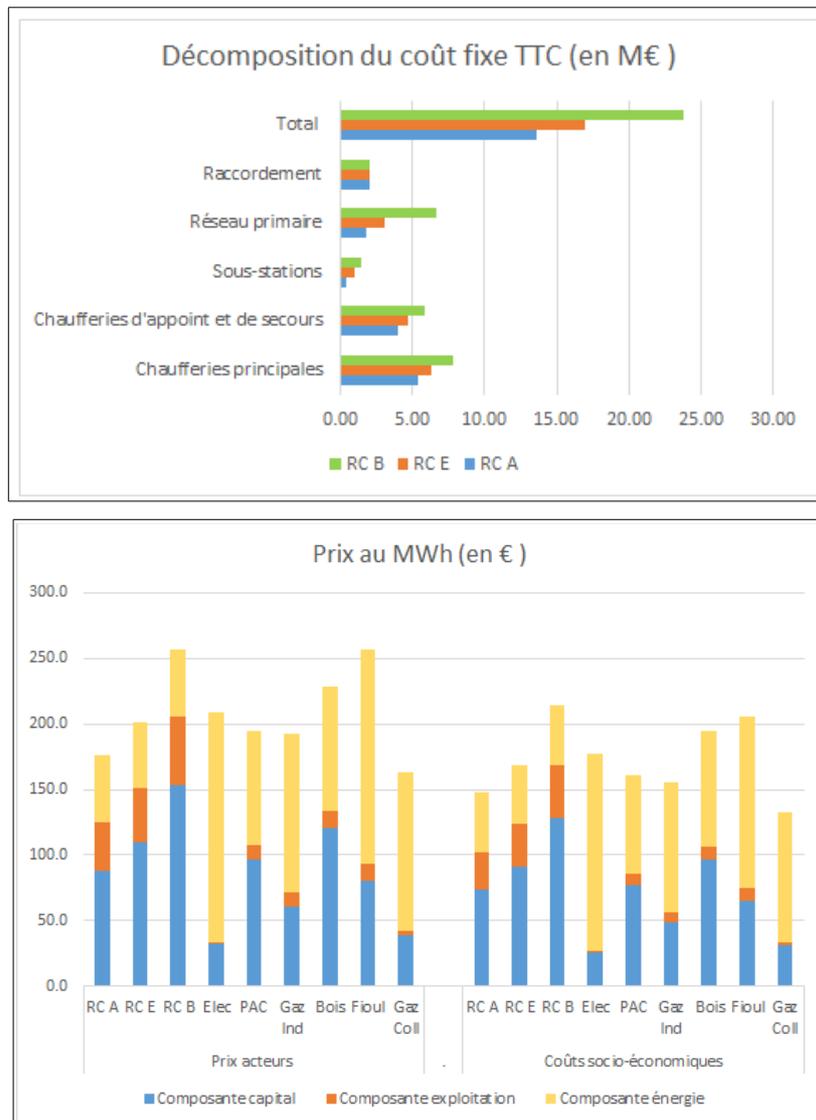
Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

Sur les trois réseaux de chaleur définis dans la partie 4, nous simulons les coûts et les prix (en €2016) au MWh dans le cas d'une création puis d'une extension de réseau de chaleur.

CRÉATION D'UN RÉSEAU DE CHALEUR

À partir des trois quartiers-types précédemment définis, nous obtenons alors les coûts d'investissements initiaux RC et les prix acteurs et socio-économiques hors subvention (graphiques 15).

Graphiques 15 : Coûts d'investissement et prix au MWh des différents réseaux de chaleur



Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

- Il ressort de ces éléments que la combinaison de chaudières et de sous-stations de forte puissance, de densités (thermique et urbaine) fortes, a pour effet de réduire le coût d'investissement de chacune des composantes du réseau de chaleur et donc le prix au MWh (la composante « coût du capital » baisse de 27 % environ entre le RC B et le RC E, et à nouveau de 21 % environ entre le RC E et le RC A).
- Pour le niveau de consommation énergétique correspondant à la moyenne du parc de logements, la création d'un réseau de chaleur de type RC A est la deuxième solution la plus rentable (après le gaz collectif) en approche « acteurs » et en approche socio-économique, tandis que la création d'un réseau de chaleur de type RC B (resp. RC E) est seulement la quatrième solution la plus rentable après le gaz collectif, le gaz individuel et la pompe à chaleur (resp. la solution la moins rentable). Pour que les réseaux de chaleur RC A, RC E et RC B, dans le cas d'une création, soient chacun plus rentable que le gaz en prix acteurs, il faudrait que le prix du gaz (qui est supposé augmenter de 2,73 % par an) augmente respectivement, et *a minima*, de 4,2 %, 6 % et 8,6 % annuellement sur la période 2016-2026.
- Sur la base des rendements des modes de chauffage et des contenus CO₂ des combustibles, on estime les économies de CO₂ permises par un réseau de chaleur « bois » relativement aux différents modes de chauffage conventionnels, que ce soit par MWh d'énergie finale ou par logement moyen de 70 m² annuellement :

Tableau 22 : Économies de CO₂ relatives aux différents modes de chauffage

Tonnes de CO ₂ économisées par un réseau de chaleur bois relativement à ...	Gaz Ind	Gaz Coll	Elec Ind	PAC	Fioul
Par MWh d'énergie finale	0,19	0,18	0,12	0,06	0,28
Par logement moyen de 70m ² annuellement	1,84	1,74	1,15	0,58	2,63

Source : Calculs CGDD

EXTENSION D'UN RÉSEAU DE CHALEUR

Nous considérons deux types d'extension d'un réseau de chaleur existant pour raccorder 1 200 logements supplémentaires⁵⁹, que nous estimons également pour un parc moyen :

- le premier type d'extension consiste à ne réinvestir que dans de nouvelles chaudières, en supposant que les sous-stations et le réseau étaient initialement sous-exploités et ne demandent pas d'investissements supplémentaires pour être raccordés à un nouveau quartier ; nous supposons que le quartier raccordé supporte toutefois la moitié des coûts d'exploitation des sous-stations et du réseau ;
- le second type d'extension consiste à ne réinvestir que dans de nouvelles sous-stations et du réseau, en supposant que les chaudières étaient initialement sous-exploitées et ne demandent pas d'investissements supplémentaires pour être raccordés à un nouveau quartier⁶⁰ ; nous supposons que le quartier raccordé supporte toutefois la moitié des coûts d'exploitation des chaudières.

Dans les deux cas, comme chaque extension nécessite des investissements dans le réseau secondaire, nous tenons toujours compte d'un coût de raccordement. Nous calculons ici **le prix marginal appliqué au nouveau quartier raccordé : autrement dit, ce prix est calculé pour n'amortir que les investissements additionnels propres au raccordement au nouveau quartier**. Pour rappel, les trois quartiers-types sont calibrés pour un parc moyen selon les caractéristiques données dans le tableau 21.

Nous détaillons, pour les deux types d'extension, les coûts d'investissements initiaux RC et les prix acteurs et socio-économiques hors subvention.

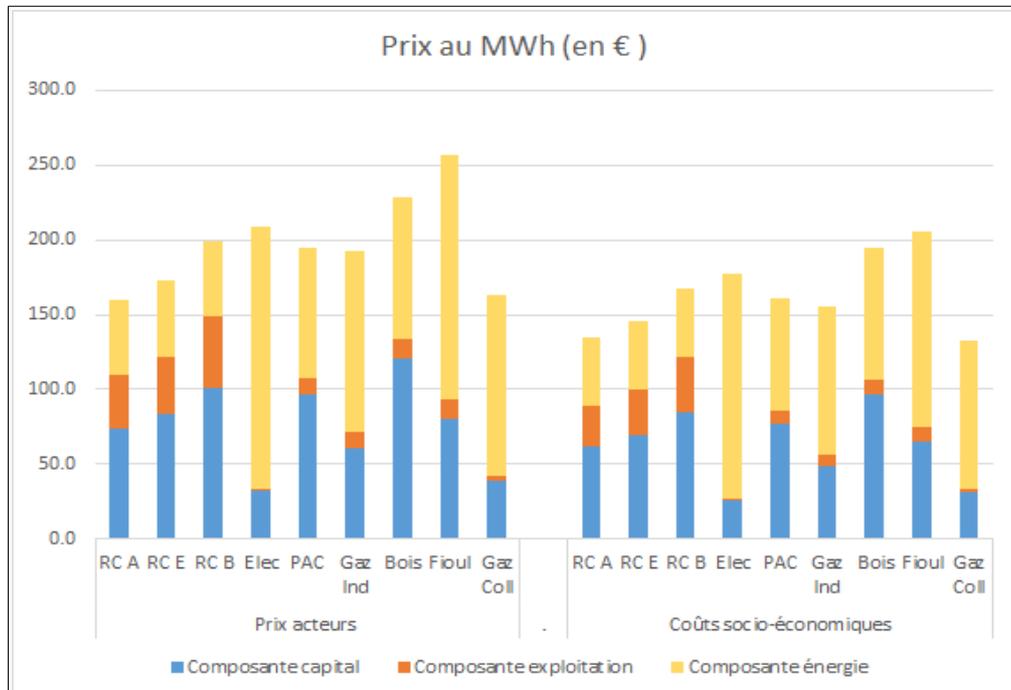
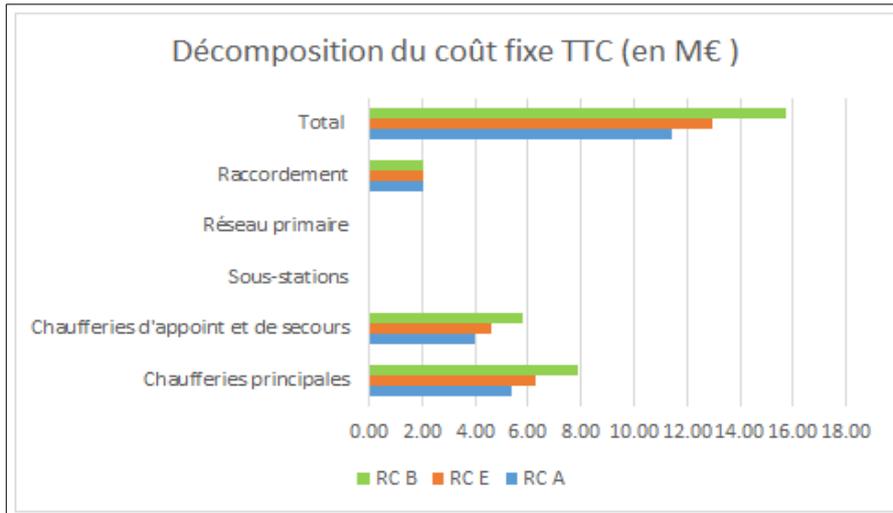
⁵⁹ Il est à noter pour le cas de l'extension que le nombre de logements raccordés n'a pas d'impact sur le prix au MWh à la condition de fixer les puissances de sous-stations et la densité thermique puisque seules ces dernières ont un effet non linéaire sur le coût au MWh de l'énergie délivrée. Pour la commodité, nous considérerons donc 1 200 logements supplémentaires raccordés.

⁶⁰ Nous supposons qu'un investissement supplémentaire sur des sous-stations va de pair avec un investissement sur le réseau primaire ; nous tenons compte toujours d'un coût d'exploitation sur la moitié des chaudières spécifiquement employées à desservir le quartier nouvellement raccordé.

Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

Premier type d'extension : réinvestissements uniquement dans les chaudières

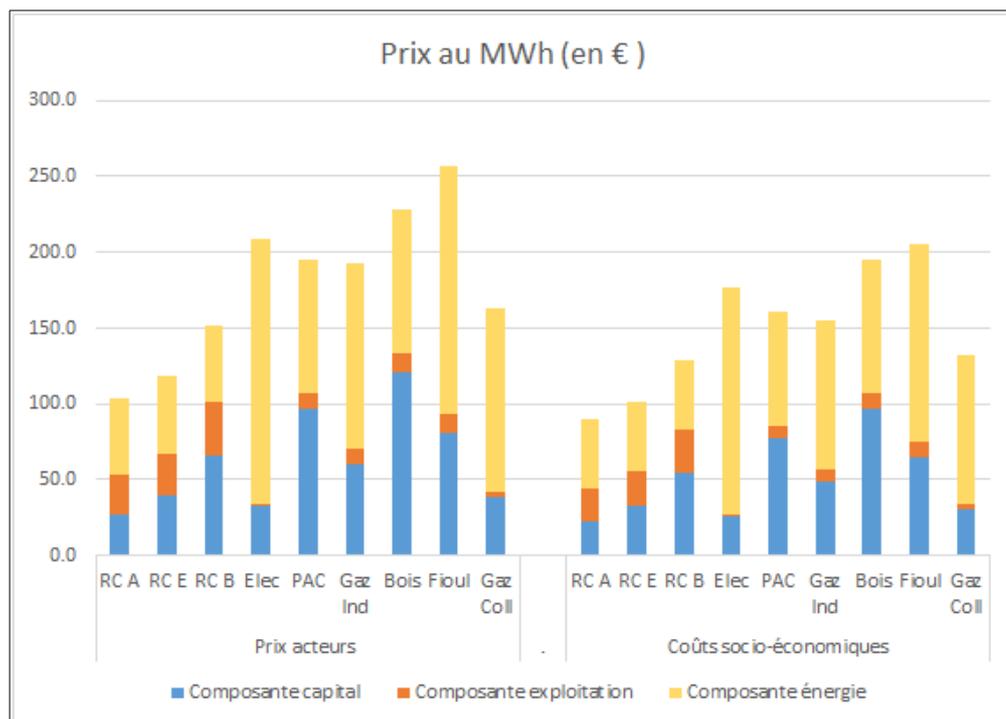
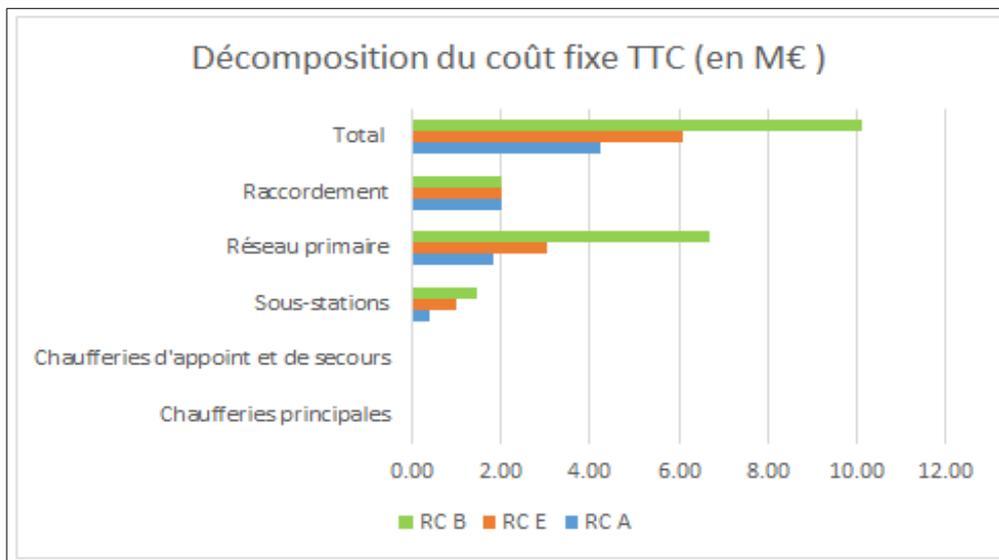
Graphiques 16 : Coûts d'investissement et prix au MWh des différents réseaux de chaleur



Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

Deuxième type d'extension : réinvestissements uniquement dans les sous-stations et le réseau primaire

Graphiques 17 : Coûts d'investissement et prix au MWh des différents réseaux de chaleur



Conclusions générales pour l'extension d'un réseau de chaleur :

- ➔ l'extension semble clairement la plus compétitive si elle n'engage pas d'investissements supplémentaires dans des chaudières, et d'autant plus que le réseau est puissant ;
- ➔ à l'inverse, lorsqu'il s'agit d'investir dans de nouvelles chaudières, la rentabilité n'est pas toujours assurée : un réseau de chaleur de forte puissance du type RC A⁶¹ reste la solution la plus compétitive, tandis qu'un réseau de chaleur de type RC B est la deuxième solution (après le gaz collectif) et un réseau de chaleur de type RC E est parmi les trois solutions les moins compétitives.

Nota bene : Il existe en réalité un continuum de cas d'extension, selon la combinaison des caractéristiques du réseau de chaleur qui se retrouvent modifiées. Par exemple, on peut imaginer un réseau de chaleur alimentant un quartier de 1 200 logements pour lequel il est décidé de renouveler les chaudières à la fin de leur durée d'exploitation par des chaudières 33 % fois plus puissantes afin de pouvoir alimenter 600 logements environnants supplémentaires tout en investissant à hauteur de 50 % dans de nouvelles sous-stations et kilomètres de réseau. Dans tous les cas, il ressort que moins il y a d'investissements au niveau des chaudières, plus la solution de l'extension est compétitive.

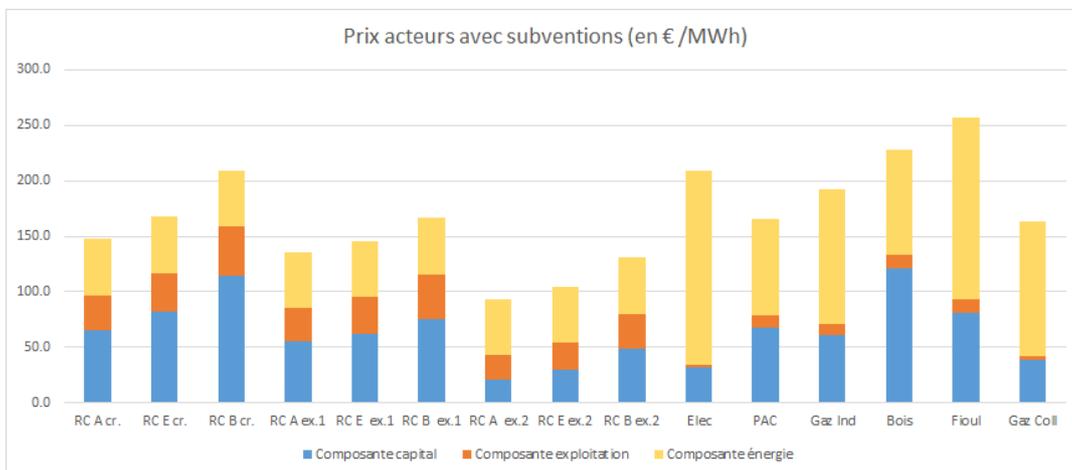
⁶¹ Pour un logement de 70 m² en parc moyen desservi par des réseaux de chaleur de type RC A ou RC E, nous obtenons une facture énergétique annuelle comprise entre 1 000 et 1 200 euros soit dans l'ordre de grandeur prévue par Amorce en l'absence de subvention.

Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

Encadré : Et en tenant compte des subventions et avantages fiscaux ?

Nous avons jusqu'à présent réalisé l'étude hors subventions et avantages fiscaux accordées à certaines solutions techniques. Or, à ce jour, un taux de subvention de 15 % en moyenne (via le Fonds Chaleur de l'Ademe) s'applique sur les coûts fixes des réseaux de chaleurs approvisionnés à plus de 50 % en énergies renouvelables et de récupération comme c'est le cas dans notre étude. De plus, la TVA est réduite à 5,5 % pour les réseaux de chaleur, tandis que les pompes à chaleur peuvent bénéficier de 30 % de subventions via le Crédit d'impôt Transition Énergétique (CITE). Ces aides représentent une réduction de coût de l'ordre de 30 €/MWh TTC à la fois pour la PAC et le réseau de chaleur « E ».

En appliquant ces avantages fiscaux, nous augmentons sans surprise la compétitivité des réseaux de chaleur « bois » ainsi que celle des pompes à chaleur. Avec les indices « cr. », « ex. 1 » et « ex. 2 » pour le cas d'une création, d'une extension de type 1 et d'une extension de type 2 de réseaux de chaleur, respectivement, nous obtenons les résultats suivants :



En tenant compte des mesures d'aide actuelles, il ressort que les réseaux de chaleur deviennent le mode de chauffage le plus compétitif du point de vue de l'utilisateur dans tous les cas sauf dans le cas d'une création pour les réseaux de chaleur de faibles puissance et densité (RC B).

Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

TESTS SUR LA CONSOMMATION DES BÂTIMENTS

Nous étudions ici le cas où un quartier raccordé à un réseau de chaleur – ou un autre mode de chauffage – se retrouve avec un niveau de consommation énergétique plus faible, par exemple suite à un programme de rénovation énergétique.

Les niveaux de consommation énergétique considérés sont repris dans le tableau 23.

Tableau 23 : Rappel des niveaux de consommations de chauffage et de ECS

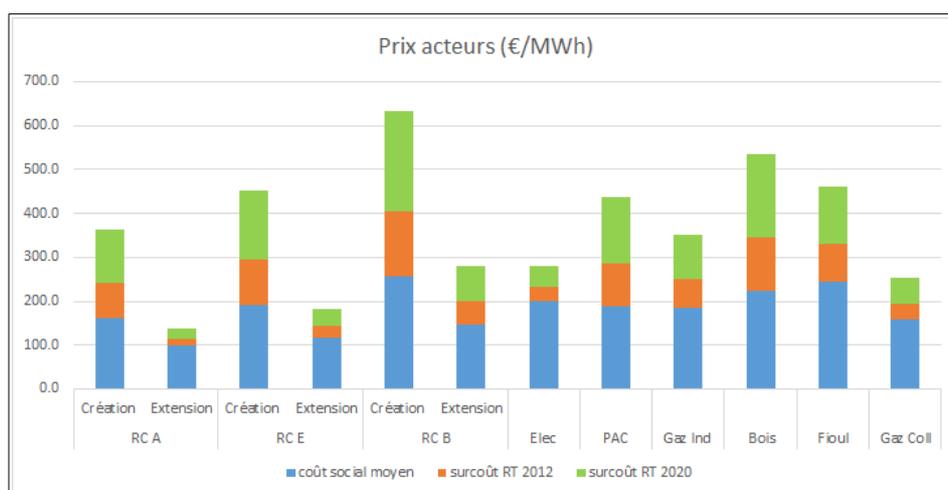
En kWh/m ² /an	Chauffage	ECS
RT 2020 ⁶²	20	21
RT 2012	40	31,4
Parc moyen	104,6	31,4

Source : Calculs CGDD

Nous considérons un réseau de chaleur qui approvisionne un quartier – à la suite d'une création ou d'une extension⁶³ de réseau de chaleur - dont la consommation moyenne par logement diminue sans la possibilité de redimensionner le réseau de chaleur. Nous supposons que les réseaux de chaleur RC A, RC E et RC B sont initialement à un niveau de consommation « parc moyen » avant de subir une baisse de consommation correspondant à la RT 2012 ou à la RT 2020. Ainsi, nous supposons que les caractéristiques du réseau de chaleur restent fixées aux valeurs données dans le tableau 21.

En termes de prix au MWh, nous obtenons alors :

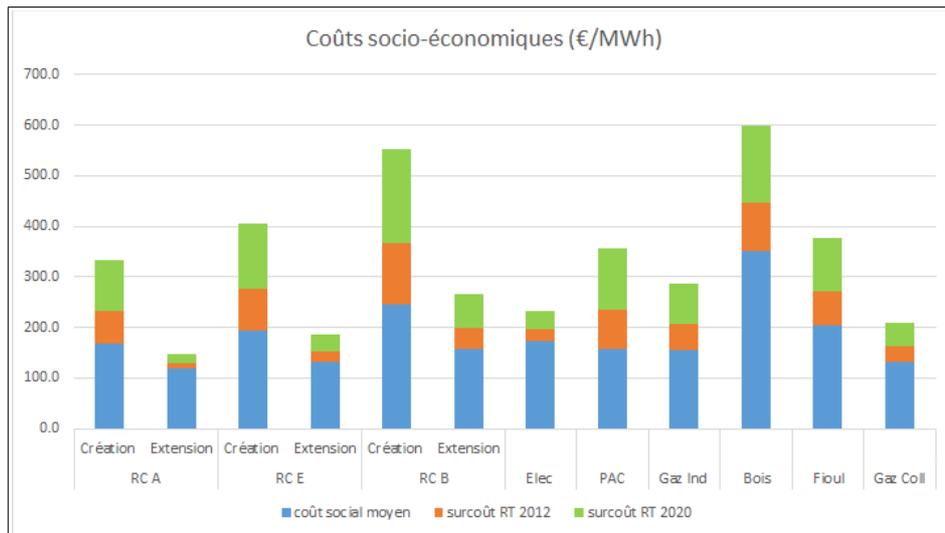
Graphiques 18 : Prix au MWh des différents modes de chauffage



⁶² Pour la RT 2012 et 2020, nous prenons respectivement 20 et 40 kWh/m²/an pour le chauffage et toujours 31,4 kWh/m²/an pour les ECS (dont nous supposons la consommation quasi incompressible).

⁶³ Nous appellerons désormais « extension » le cas de figure où seuls des investissements pour le réseau, pour les sous-stations et pour le raccordement sont nécessaires, et comme précédemment, nous indiquerons le prix marginal associé.

Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur



- ➔ La forte intensité capitalistique des réseaux de chaleur les rend particulièrement vulnérables à une baisse importante de la chaleur livrée sous l'effet d'une baisse de la consommation d'énergie des bâtiments desservis .
- ➔ En l'absence d'extension concomitante du réseau à de nouveaux clients, la hausse du coût de la chaleur livrée aurait un impact négatif notable sur l'intérêt économique d'une rénovation énergétique des bâtiments desservis :

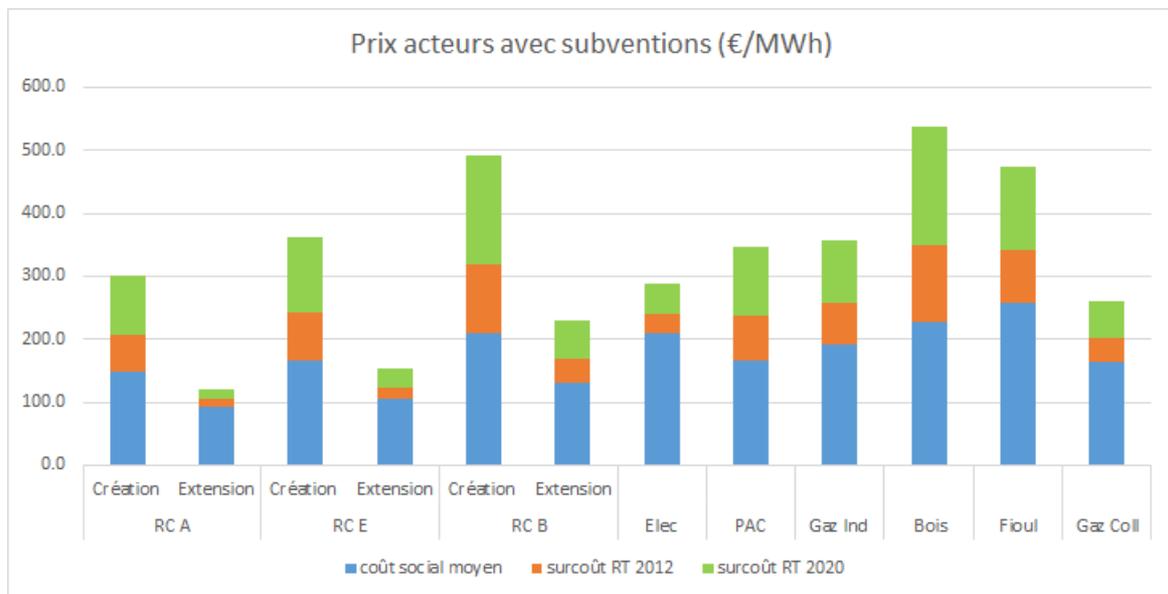
- alors qu'entre le niveau de consommation « parc moyen » et le niveau RT2012, la consommation énergétique est divisée par 1,9 (de 136 kWh/m²/an à 71,4 kWh/m²/an), la facture énergétique ne baisserait respectivement que de 31 %, 27 % et 21 % pour les réseaux de chaleur RC A, RC E et RC B, sous l'effet d'une hausse du prix de la chaleur respectivement multiplié par 1,45 (RC A), 1,50 (RC E) et 1,57 (RC B).

- de même, alors qu'entre le niveau de consommation RT2012 et le niveau de consommation RT2020, la consommation énergétique est divisée par 1,75 (de 71,4 kWh/m²/an à 41 kWh/m²/an), la facture énergétique ne baisserait respectivement que de 14 %, 13 % et 10 % pour les réseaux de chaleur RC A, RC E et RC B, sous l'effet d'une hausse du prix de la chaleur respectivement multiplié par 1,48 (RC A), 1,52 (RC E) et 1,57 (RC B) entre le niveau de consommation.

Les mêmes conclusions s'appliquent aux autres modes de chauffage, mais dans une moindre mesure, sachant qu'elles sont globalement moins capitalistiques et que les durées d'amortissement des équipements sont plus courtes.

Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

→ En tenant compte des aides (TVA réduite et subventions aux RC ; subvention aux PAC) présentées dans l'encadré (page 62), nous obtenons les résultats suivants en prix « acteurs » :



La prise en compte des aides atténue la vulnérabilité des réseaux de chaleur à une baisse du besoin de chaleur, mais celle-ci reste forte, notamment pour le réseau de type B, dans le cas d'une création de réseau.

CONCLUSION

Si le modèle présenté dans cette étude permet de délivrer un ensemble de messages généraux sur le domaine de pertinence des réseaux de chaleur, il ne permet pas de réaliser une étude d'opportunité ou de faisabilité pour un projet précis ou de faire des comparaisons fines et exhaustives entre les différents modes de chauffage dans un contexte donné. L'intérêt du modèle est de présenter les principaux flux financiers correspondant à chaque mode de chauffage, d'illustrer l'importance de réaliser des études coûts-bénéfices en coût global, et de détailler la répartition des différents coûts (distribution/production, fixe/variable, etc.) dans le coût global.

Les paramètres pouvant affecter la compétitivité des réseaux de chaleur au bois relativement à d'autres modes de chauffage sont nombreux, et leurs combinaisons possibles d'autant plus. Les différentes simulations permettent de dégager six principaux faits stylisés :

- Ce sont les coûts d'investissement dans les chaudières, et les économies d'échelle que permet l'augmentation de leur puissance, qui impactent le plus fortement le coût du MWh de chaleur délivrée ;
- Dans le cas d'une création, les réseaux de chaleur ayant des puissances et des densités fortes apparaissent compétitifs face aux autres modes de chauffage, derrière toutefois le gaz (collectif surtout) et l'électricité, tant dans l'approche acteurs que dans l'approche socio-économique ;
- L'extension d'un réseau de chaleur ne nécessitant pas d'investissements supplémentaires au niveau des chaudières apparaît comme la solution la plus favorable, et ce, quel que soit le type de réseau de chaleur et le niveau de consommation énergétique du quartier, tant dans l'approche acteurs que dans l'approche socio-économique ;
- Dans le cas d'une diminution de la consommation énergétique dans un quartier desservi par un réseau de chaleur (par exemple à l'occasion d'un programme de rénovation des bâtiments), une extension à de nouveaux consommateurs est souhaitable pour maintenir la compétitivité du réseau ;
- Les réseaux de chaleur, du fait de l'importance de la part capitalistique, sont, avec le chauffage au bois individuel et la pompe à chaleur, les plus sensibles à une augmentation du taux d'actualisation (et du taux d'intérêt) ; à l'inverse, ils sont moins sensibles à la variation du prix des énergies qu'ils emploient du fait de la plus faible part de la composante énergie dans le coût total de la chaleur ;
- L'impact favorable des réseaux de chaleur au bois en matière de climat et la maîtrise des émissions de polluants de l'air devraient améliorer sensiblement leur rentabilité économique future dans un contexte de hausse de la valorisation monétaire des externalités environnementales.

Partie 5 : Coûts des différentes configurations de réseaux de chaleur

En tenant compte des mesures d'aide actuelles, il ressort que les réseaux de chaleur deviennent le mode de chauffage le plus compétitif du point de vue de l'utilisateur dans la très grande majorité des cas.

RÉFÉRENCES

- [1] *Réseaux de Chaleur en France*, DTerOuest, 2012.
- [2] <http://www.amorce.asso.fr/fr/reseaux-de-chaleur/> (le modèle n'est pas en accès public).
- [3] Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte, Article L. 100-4, 22 juillet 2015.
- [4] Loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte, Article 1.
- [5] *Les prix de vente de la chaleur en 2012*, Amorce, 2012.
- [6] *Évaluation socioéconomique des investissements publics*, CGSP, septembre 2013.
- [7] *Les réseaux de chaleur au bois*, Ademe-Cibe, 2009.
- [8] *Les réseaux de chaleur*, Henri Prévot, Conseil général des mines, 2006.
- [9] *Comparaison des coûts de production de chaleur centralisée / décentralisée*, CETE Nord Picardie, décembre 2013.
- [10] *Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France (OMINEA)*, CITEPA, avril 2016.
- [11] *L'évaluation socio-économique en période de transition*, CGSP, 2014
- [12] Arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 (relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910) ; Règlement mettant en œuvre la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil (établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie) ; Règlement 2015/1185 de la commission du 24 avril 2015 (portant application de la directive 2009/125/CE du Parlement européen et du Conseil).

Partie 6

Annexes : autres tests de sensibilité sur les différents modes de chauffage

En testant différents jeux d'hypothèses, il apparaît notamment que les réseaux de chaleur, du fait de l'importance de leur part capitalistique, sont avec le bois et la pompe à chaleur les plus sensibles à une augmentation du taux d'actualisation (et indirectement du taux d'intérêt) : à l'inverse, ils sont moins sensibles à la variation du prix des énergies du fait de la plus faible part de la composante énergie dans leur coût total.



Partie 6 : Autres tests de sensibilité sur les différents modes de chauffage

Nous procédons ici à quelques tests de sensibilité – hors subvention à nouveau - afin de mieux appréhender le domaine de pertinence des réseaux de chaleur, que nous définissons comme étant les configurations pour lesquelles le réseau de chaleur est -comparativement aux six autres modes de chauffage- la solution la plus compétitive⁶⁴. Pour chacun des tests de sensibilité, nous considérons à nouveau les trois types de réseau de chaleur (RC A, RC E et RC B).

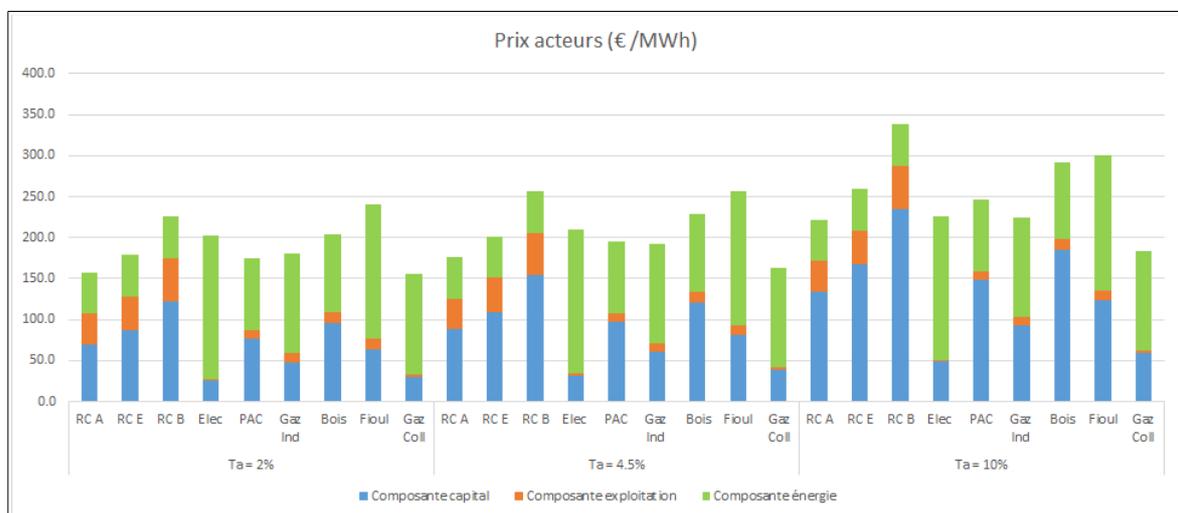
TESTS SUR LE TAUX D'ACTUALISATION

Dans le cas d'une création de réseau de chaleur dans un parc moyen, nous testons neuf cas de figure, au croisement de ces deux critères :

- le type de réseau de chaleur : RC A, RC E ou RC B ;
- le taux d'actualisation : 2 %, 4,5 % ou 10 %.

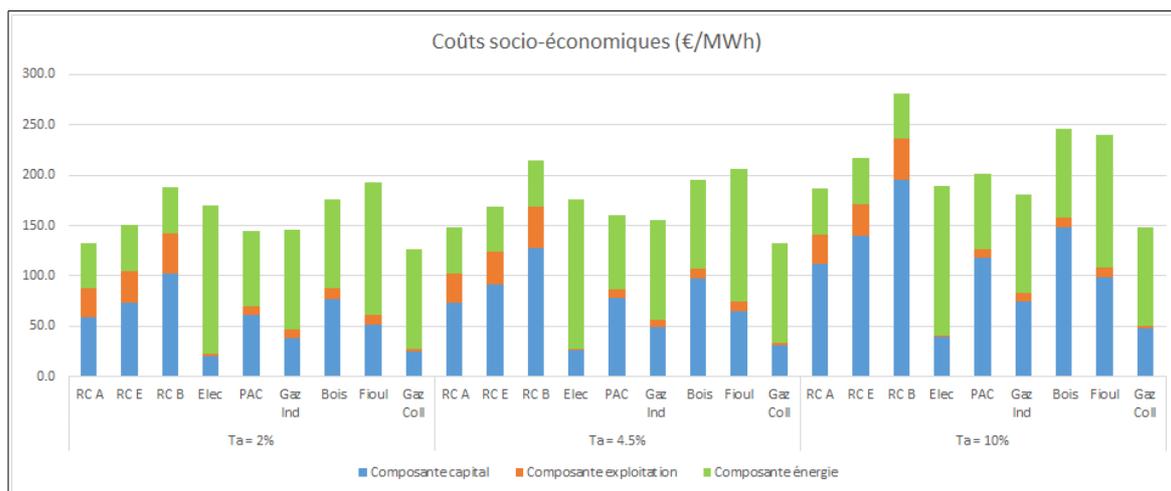
Nous obtenons les prix acteurs et socio-économiques suivants (voir les graphiques 19) :

Graphiques 19 : Prix au MWh des différents modes de chauffage



⁶⁴ La notion de compétitivité inclut ici une dimension économique et une dimension écologique ; cette dernière, au regard des taxes retenues sur les externalités, joue toutefois une influence marginale.

Partie 6 : Autres tests de sensibilité sur les différents modes de chauffage



- Ce sont les modes de chauffage les plus capitalistiques qui subissent le plus une augmentation du taux d'actualisation (lequel traduit ici une hausse de la préférence pour le présent et/ou un coût du capital plus élevé). Ainsi les réseaux de chaleur, dans le cas d'une création, sont encore moins compétitifs face au gaz (collectif et individuel) et à l'électricité. Le bois et la pompe à chaleur, qui nécessitent aussi un capital initial relativement élevé, perdent également en compétitivité.
- Dans le cas d'une extension (non reproduit ici), tous les réseaux de chaleur se maintiennent parmi les modes de chauffage les plus compétitifs dans le cas d'une augmentation du taux d'actualisation.

TESTS SUR LE TAUX DE VARIATION DES PRIX DES ÉNERGIES

Dans le cas d'une création de réseau de chaleur, nous simulons douze cas de figure, au croisement de ces deux critères :

- le type de réseau de chaleur : RC A, RC E ou RC B ;
- l'énergie dont le prix subit une augmentation de son taux de croissance annuel moyen (TCAM) : cas favorable au bois, cas favorable au fioul, cas favorable à l'électricité, cas favorable au gaz.

Par commodité, nous considérons pour chacun des cas, une augmentation forfaitaire (de 1 point de pourcentage) sur le TCAM (acteurs et socio-économiques) de l'énergie « défavorisée ».

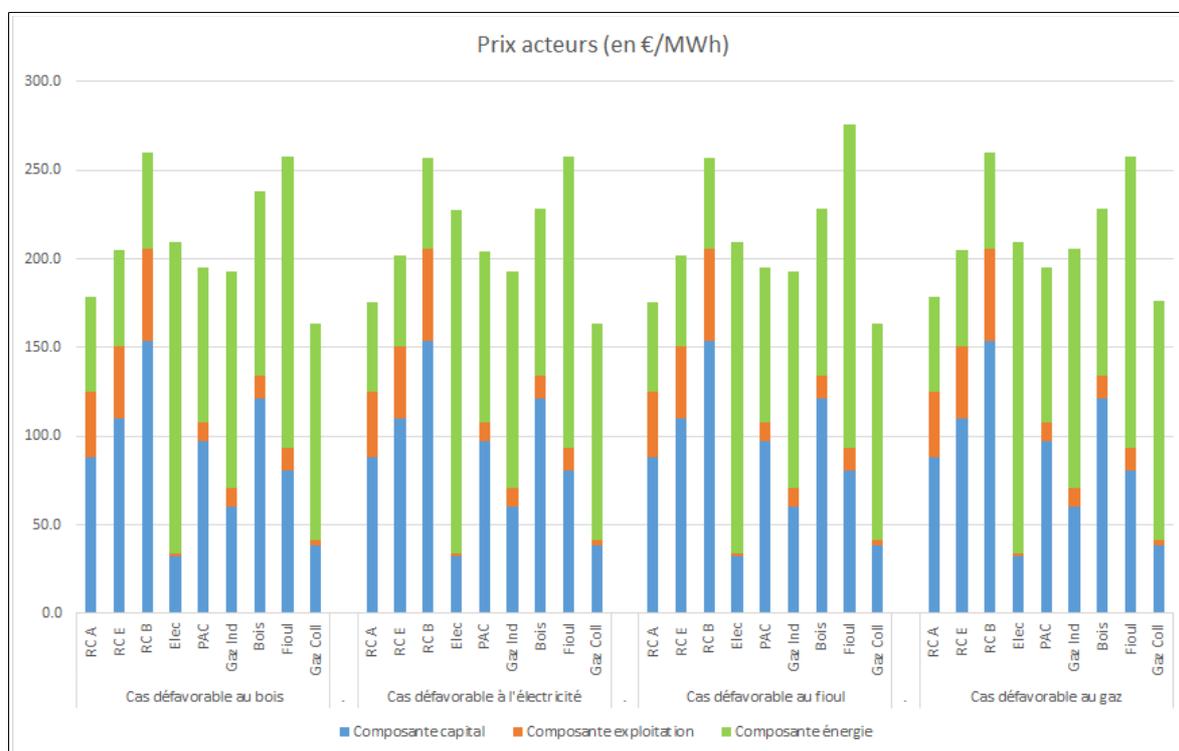
Partie 6 : Autres tests de sensibilité sur les différents modes de chauffage

Tableau 24 : Différents scénarios des taux de croissance annuels moyens des énergies

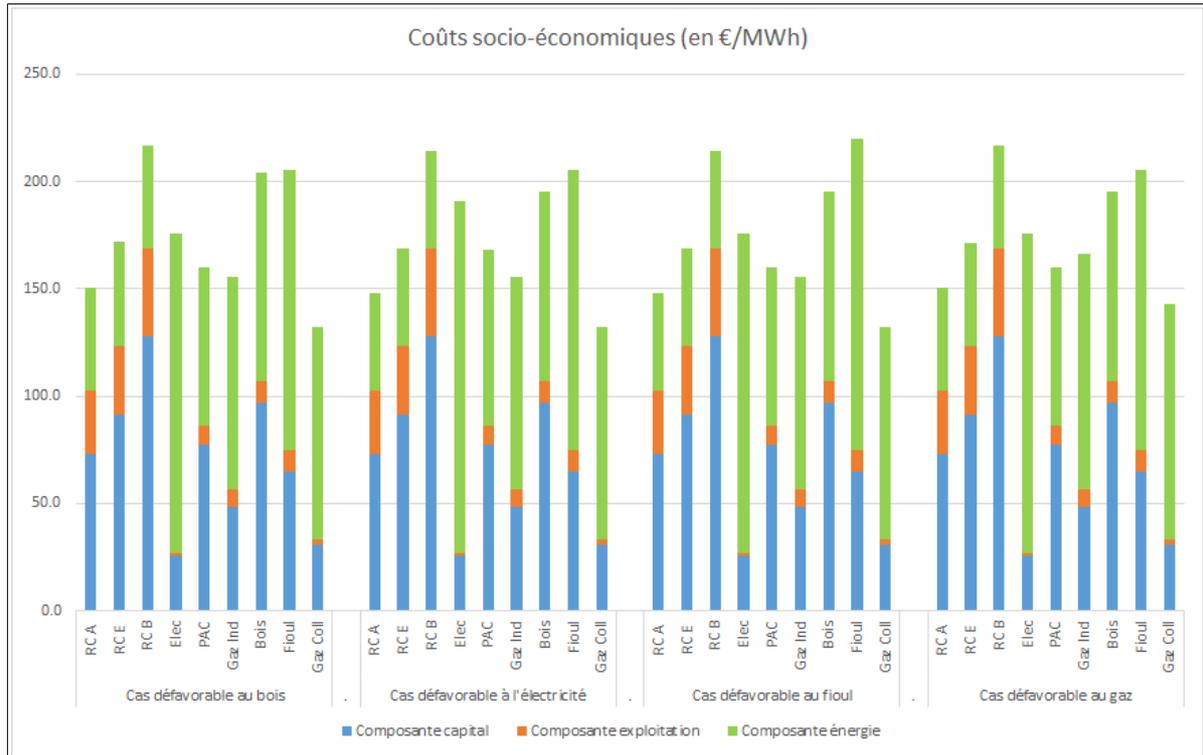
TCAM (en %) acteurs / socio-éco	Cas défavorable à :	Bois	Électricité	Fioul	Gaz
Electricité		0,88 / 1,78	1,88 / 2,78	0,88 / 1,78	0,88 / 1,78
PAC		0,88 / 1,78	1,88 / 2,78	0,88 / 1,78	0,88 / 1,78
Gaz		2,73 / 2,70	2,73 / 2,70	2,73 / 2,70	3,73 / 3,70
Fioul		4,33 / 4,38	4,33 / 4,38	5,33 / 5,38	4,33 / 4,38
Bois plaquettes		2,30 / 2,28	1,30 / 1,28	1,30 / 1,28	1,30 / 1,28
Bois granulés		2,30 / 2,28	1,30 / 1,28	1,30 / 1,28	1,30 / 1,28

Nous obtenons les prix acteurs et socio-économiques suivants (graphiques 20) :

Graphiques 20 : Prix au MWh des différents modes de chauffage



Partie 6 : Autres tests de sensibilité sur les différents modes de chauffage



➔ De façon évidente, augmenter le taux de variation d'une énergie donnée augmentera, en relatif comme en absolu, la composante « énergie » du mode de chauffage correspondant ; cet effet est d'autant plus prononcé que la part de la composante énergie est initialement importante, ce qui est le cas de l'électricité, et dans une moindre mesure le gaz et le fiouil. Au contraire, les réseaux de chaleur sont moins sensibles à une augmentation du TCAM du bois du fait que la composante capital est beaucoup plus importante initialement.

Partie 6 : Autres tests de sensibilité sur les différents modes de chauffage

Conditions générales d'utilisation

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (3, rue Hautefeuille — 75006 Paris), est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1er juillet 1992 - art. L.122-4 et L.122-5 et Code pénal art. 425).

Dépôt légal : Janvier 2017

ISSN : en cours



À travers une modélisation des coûts « acteurs » et des coûts « socio-économiques » permettant de comparer la rentabilité des réseaux de chaleur approvisionnés en bois à celle de moyens de chauffage traditionnels, il apparaît notamment que la création d'un réseau de chaleur est une solution compétitive pour les réseaux de forte puissance, tandis que l'extension d'un réseau de chaleur est quasi systématiquement la solution la plus favorable. En particulier, la rénovation thermique d'un quartier alimenté par un réseau de chaleur devrait être accompagnée, dans la mesure du possible, d'un programme d'extension pour éviter une augmentation du coût de la chaleur livrée pouvant mettre à mal l'équilibre financier du réseau.

**Réseaux de
chaleur bois**
Domaine de
pertinence



Commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du
développement durable
Sous-direction de la mobilité et de l'aménagement (MA)
Tour Séquoia
92055 La Défense cedex
Courriel : Ma.Seei.Cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.developpement-durable.gouv.fr

