

RAPPORTS

CETE Ouest
Département Villes et
territoires

Unité Bâtiment et Énergie

Pôle Réseaux de Chaleur

21/03/2012

Place des réseaux de chaleur dans les nouveaux quartiers

***Effets de la densité et de la mixité sur la
pertinence énergétique d'un réseau de
chaleur***

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



Centre d'Études Techniques de l'Équipement
de l'Ouest

www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
0.1	28/11/2011	
1.0	06/04/2012	Relecture PCI

Affaire suivie par

Julien Bertron CETEO/DVT/BATEN
Tél. : 02 40 12 84 48
Courriel : Prénom. Julien.bertron@developpement-durable.gouv.fr

Rédacteurs

Julien Bertron- CETE-O/DVT/BATEN – PCI Réseaux de Chaleur
Stéfan Le-Dû - CETE-O/DVT/BATEN – PCI Réseaux de Chaleur

Relecteur

Éric Hennion – CETE-O/DVT/BATEN (responsable d'unité)

Référence internet : <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr>

Rubrique Réseaux de Chaleur

> Approfondir

> Réseaux de chaleur et nouveaux quartiers

SOMMAIRE

1 - INTRODUCTION – RAPPEL DU CONTEXTE.....	5
2 - L'ÉTUDE COMPARATIVE : UN MOYEN PERTINENT POUR ÉLABORER UN CHOIX.....	7
2.1 - Notion de densité thermique.....	7
2.2 - Notion de mixité d'usage.....	8
2.3 - Pertinence énergétique.....	11
2.3.1 -Les indicateurs énergétiques.....	11
2.3.1.a - Énergie utile [kWh]	11
2.3.1.b - Énergie finale consommée [kWh]	11
2.3.1.c - Facteur de ressource primaire [sans unité]	11
2.3.1.d - Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance [h].....	11
2.3.2 -Les indicateurs environnementaux.....	12
2.3.2.a - Contenu CO2 de l'énergie [kgCO2/kWh].....	12
2.3.2.b - Part d'énergie renouvelable [%]	12
2.4 - L'outil de simulation.....	12
2.4.1 -Les données d'entrées.....	13
2.4.2 -L'algorithme de calcul.....	14
3 - PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE DE CAS.....	16
3.1 - Présentation du quartier simulé.....	16
3.1.1 -Le quartier Bottière-Chénaie.....	16
3.1.2 -Le réseau de chaleur.....	17
3.1.3 -Les solutions décentralisées de référence.....	18
3.2 - Simulation 0 : le calcul de référence.....	19
3.2.1 -Définition des paramètres.....	19
3.2.2 -Présentation des résultats.....	20
3.3 - Simulation 1 : effets de la densité.....	22
3.3.1 -Augmentation de 30% de la densité (+).....	22
3.3.2 -Diminution de 30% de la densité (-).....	23
3.3.3 -Comparaison et interprétation.....	23
3.3.3.a - Effet de la variation de densité sur l'énergie finale consommée.....	24
3.3.3.b - Effet de la variation de densité sur le rendement global	26
3.3.3.c - Effet de la variation de densité sur les émissions de CO2.....	27
3.3.4 -Conclusion de l'effet de densité sur un réseau de chaleur.....	27
3.4 - Simulation 2 : effets de la mixité d'usage.....	28
3.4.1 -Quartier à mixité d'usage importante.....	28
3.4.2 -Quartier à mixité d'usage faible.....	30
3.4.3 -Comparaison et interprétations.....	32
3.4.3.a - Effet de la variation de mixité sur l'énergie finale consommée.....	32
3.4.3.b - Effet de la variation de mixité sur le rendement global.....	34

3.4.3.c - Effet de la variation de mixité sur la durée d'utilisation équivalente à pleine puissance.....	35
3.4.3.d - Effet de la variation de mixité sur le contenu CO2.....	36
3.4.4 -Conclusion de l'effet de la mixité sur un réseau de chaleur.....	36
3.5 - Simulation 3 : effets de l'amélioration du réseau de chaleur par diminution de la température de fonctionnement.....	37
3.5.1 -Le réseau basse température.....	37
3.5.2 -Comparaison et interprétation.....	37
3.5.2.a - Effet de l'amélioration du réseau de chaleur sur ses performances énergétiques.....	37
3.5.2.b - Effet de l'amélioration du réseau de chaleur sur ses performances environnementales.....	38
3.5.3 -Conclusion sur l'effet de l'amélioration du réseau de chaleur	39
4 - CONCLUSION.....	40
5 - ANNEXES.....	42

Index des illustrations

Illustration 1: Représentation de la densité thermique suivant le type d'aménagement.....	7
Illustration 2: Quartier mixte regroupant commerces, services et logements. Sur la photo : immeuble de logements, commerces au rez-de-chaussée, école et médiathèque à droite.....	8
Illustration 3: Les différents stades de l'énergie.....	11
Illustration 4: Schéma d'un réseau de chaleur.....	15
Illustration 5: Plan du quartier Bottière-Chenaie.....	17
Illustration 6: Évolution hebdomadaire des pics de besoins de chaleur-mixité d'usage importante....	29
Illustration 7: Évolution hebdomadaire des pics de besoins de chaleur-mixité d'usage faible.....	31

1 - Introduction – Rappel du contexte

Les lois Grenelle ont renforcé les liens entre politique énergétique d'une part, et urbanisme et construction d'autre part.

La loi Grenelle 1¹, rappelle ainsi dans son article 3 que le secteur du bâtiment consomme plus de 40% de l'énergie finale et contribue au quart des émissions nationales de gaz à effet de serre. Sur la base de ce constat, la loi redéfinit les contours de la réglementation thermique pour les bâtiments neufs et définit un objectif ambitieux de diminution des consommations dans les bâtiments existants (-38% d'ici 2020). En matière de développement des énergies renouvelables en lien avec l'aménagement, la loi Grenelle 1 a introduit dans le code de l'urbanisme une nouvelle obligation : toute action ou opération d'aménagement soumise à étude d'impact doit faire l'objet d'une étude de faisabilité sur le potentiel de développement des énergies renouvelables dans la zone, en particulier l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid². Cette obligation incite ainsi les aménageurs à aborder la question de la desserte énergétique par les énergies renouvelables le plus en amont possible des projets.

Les choix retenus sur les équipements de chauffage, de climatisation mais aussi de production d'eau chaude sanitaire constituent en effet un parti pris pour de nombreuses années. Revenir sur ces choix l'aménagement réalisé et les bâtiments construits peut s'avérer très difficile, voire impossible. Or ces choix ont des conséquences directes sur le coût pour les usagers et sur l'impact environnemental de l'aménagement. Le réseau de chaleur est une solution d'équipement qui permet d'assurer les besoins énergétiques d'un quartier, d'un ensemble de quartiers ou même d'une ville entière. Il permet de mobiliser des quantités d'énergies renouvelables conséquentes, limitant ainsi la hausse des émissions de CO₂ et contribuant à l'indépendance énergétique. Cependant le coût d'investissement d'un tel équipement et l'engagement pris sur plusieurs décennies nécessitent de vérifier la pertinence de ce système au regard de solutions décentralisées.

La pertinence énergétique d'un équipement de chauffage (ou d'un ensemble de solutions décentralisées) est intrinsèquement liée à la typologie du quartier qu'il dessert. La standardisation des bâtiments BBC³, la mise en place d'une réglementation thermique exigeante amènent à se poser diverses questions : **un réseau de chaleur est-il pertinent pour alimenter en chaud et/ou froid ces nouveaux quartiers (des éco-quartiers par exemple) ?**, **Les pertes d'énergie liées au maintien en chaud du réseau ne sont-elles pas excessives au regard de la « faible » quantité de chaleur à fournir aux bâtiments?** Répondre à ces questions n'est pas chose aisée dans l'immédiat. Cependant des études ont été menées⁴ et elles montrent qu'un réseau de chaleur reste une solution pertinente dans certains cas.

1 loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement

2 Lire : Étude sur les énergies renouvelables dans les nouveaux aménagements- « Conseil pour la mise en œuvre de l'article L128-4 du code de l'urbanisme » - CETE Ouest, CETE Méditerranée, CERTU, DREAL Rhône-Alpes. 2011 - <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/guide-les-etudes-d-energies-a752.html>

3 Bâtiment Basse Consommation

4 Notamment : « Réseaux de chaleur et bâtiments basse consommation : l'équation impossible? » AMORCE, 64p. 2011

Objet de l'étude

La présente étude a pour objet d'illustrer les effets de la densité et de la mixité d'usage sur la performance énergétique d'un réseau de chaleur et de la comparer à celle de solutions décentralisées.

Il s'agit d'une étude basée sur un outil de modélisation simplifié, développé par le CETE de l'Ouest, permettant de calculer des consommations de quartiers en fonction de leur typologie caractérisée par des paramètres simples (surface des bâtiments, types des bâtiments, linéaire de voirie) et des systèmes énergétiques choisis (en particulier : réseau de chaleur ou ensemble de systèmes décentralisés).

A l'aide de cet outil, nous faisons varier, sur la base d'un quartier donné, les paramètres « densité » et « mixité » (notions définies en partie 2.1 et 2.2), et mesurons l'impact de ces variations sur la pertinence relative des différents systèmes, sur le plan des consommations d'énergie, sur la part d'énergies renouvelables et des rejets de CO₂, etc..

Définir une typologie type ou « moyenne » d'un quartier est un exercice difficile. Pour éviter d'imaginer un quartier totalement fictif qui pourrait être peu représentatif, il a été préféré de travailler sur la base d'un quartier existant et de caractériser la variation de paramètres définissant le quartier.

Cette étude théorique est évidemment perfectible. Elle pourrait être approfondie, pour consolider et préciser les résultats, notamment en :

- étudiant davantage de scénarios : plusieurs « quartiers de référence » ; davantage de versions alternatives de chaque quartier de référence (par exemple : densité +/- 10%, densité +/- 20%, densité +/-50%...) ; modification des systèmes de génération de chaleur individuels sans modifier le quartier ; etc.
- améliorant l'outil de simulation : consolidation des scénarios d'appel de puissance de chaque bâtiment ; ajout de nouvelles classes de bâtiments afin de représenter plus fidèlement chaque quartier étudié.

Nous avons souhaité, avec ce premier travail, illustrer par des calculs des tendances « intuitivement » connus, et surtout les quantifier. Nous sommes ouverts à toute remarque sur cette étude. Vous pouvez réagir via le site internet du CETE de l'Ouest :

<http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr>

Rubrique Réseaux de Chaleur

> Approfondir

> Réseaux de chaleur et nouveaux quartiers

2 - L'étude comparative : un moyen pertinent pour élaborer un choix

La performance énergétique d'un système ne s'évalue pas, dans l'absolu, uniquement sur la quantité d'énergie qu'il consomme; d'autant plus à l'échelle d'un quartier. La performance s'apprécie au regard d'autres solutions, sur la base de critères énergétiques bien évidemment, mais aussi sur la base de critères environnementaux et économiques.

La comparaison de systèmes entre eux permet à un aménageur ou un investisseur de s'assurer que la solution qu'il retient est la meilleure vis à vis des autres solutions. S'agissant d'un acteur public garant de l'intérêt général, cette comparaison doit évidemment porter sur une longue période.

La présente étude concerne l'analyse de critères énergétiques (quantité d'énergie consommée, rendement du système) et environnementaux (émission de CO₂ et quantité d'énergie renouvelable mobilisée).

Une comparaison complète des systèmes devrait également prendre en compte de nombreux autres paramètres : coût d'investissement, coût des combustibles et scénarios d'évolution des prix sur le long terme, impact sur l'économie locale, impacts environnementaux hors CO₂ (qualité de l'air, impact paysager...), etc.⁵

2.1 - Notion de densité thermique

La définition théorique de la densité thermique est décrite dans la loi dite « Loi de Fourier »⁶. Elle caractérise, à un instant t, la quantité d'énergie traversant une surface.

Cette notion physique et théorique a été transposée à la problématique des réseaux de chaleur, devenant une des caractéristiques résultant du croisement entre un réseau (donc un linéaire) et un quartier (donc un des bâtiments).

Par analogie à la densité de population qui correspond au nombre d'habitants par km², la densité thermique d'un quartier correspond à la quantité totale de chaleur livrée en kWh sur une année par rapport à la superficie du quartier. Intuitivement, il est aisé de s'imaginer qu'un quartier d'une ville telle que Paris, avec une densité de population très élevée est beaucoup plus dense thermiquement qu'un quartier pavillonnaire dans le faubourg d'une ville de campagne. De même, la qualité de l'isolation des bâtiments, et donc leur époque de construction, a un impact très fort sur la densité thermique.



Illustration 1: Représentation de la densité thermique suivant le type d'aménagement

⁵ Le guide pour la réalisation des études d'EnR dans les nouveaux aménagements développe cette question de la comparaison multicritères des systèmes énergétiques. - <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/guide-les-etudes-d-energies-a752.html>

⁶ Joseph Fourier a établi expérimentalement en 1822 la loi qui lie la densité thermique à un gradient de température

Dans le cas des réseaux de chaleur, la densité thermique correspond à la quantité d'énergie utile délivrée par le réseau par rapport à la longueur totale des canalisations. Ce rapport s'exprime en $\text{kWh}_{\text{utile}}/\text{m}_{\text{linéaire}} \cdot \text{an}$.

Quelques valeurs usuelles de densité thermique pour les réseaux de chaleur⁷ :

- $\approx 8 \text{ MWh}/\text{mètre} \cdot \text{an}$ pour les réseaux existants les plus courants
- jusqu'à $15\text{-}20 \text{ MWh}/\text{m} \cdot \text{an}$ sur certains réseaux très denses des années 60-70
- $3\text{-}6 \text{ MWh}/\text{m} \cdot \text{an}$ sur les réseaux récents
- $1\text{-}1,5 \text{ MWh}/\text{m} \cdot \text{an}$: limite basse communément admise (réseaux ruraux notamment)

Pour l'attribution d'aides au titre du fonds chaleur, l'ADEME exige une densité d'au moins $1,5 \text{ MWh}/\text{an} \cdot \text{ml}$ (sauf cas particuliers sous certaines conditions).

A titre de comparaison, les valeurs moyennes de densité énergétique pour les réseaux d'électricité sont de $5,6 \text{ MWh}/\text{m} \cdot \text{an}$ sur le transport et $0,34 \text{ MWh}/\text{m} \cdot \text{an}$ sur la distribution (réseau basse tension). Pour le gaz, ces valeurs sont respectivement de 11 et $2,1 \text{ MWh}/\text{m} \cdot \text{an}$.

La densité thermique d'un réseau et la densité thermique d'un quartier ont une variation commune, et sont proportionnelles dès lors que la longueur du réseau ainsi que la superficie du quartier ne varient pas.

2.2 - Notion de mixité d'usage

A l'échelle d'un quartier ou d'un aménagement on parle de mixité d'usage, ou de mixité fonctionnelle, quand plusieurs fonctions sont représentées : habitat, tertiaire, équipement, industrie, etc.

Cette mixité des fonctions est très importante en urbanisme puisqu'elle évite le découpage du territoire en zones fonctionnelles différenciées (« zoning »), et permet de rapprocher sur de courtes distances diverses fonctions aux habitants qui en ont le besoin.

Dans le cas de la fourniture d'énergie à un quartier ou à un ensemble de quartiers, la mixité d'usage est un élément essentiel à la pertinence énergétique d'un réseau de chaleur, car elle procure un **effet de foisonnement**.

L'effet de foisonnement se caractérise par une diminution de l'intermittence du puisage et un lissage des pics de besoins.

L'intermittence d'un événement se définit comme étant la discontinuité d'apparition de celui-ci. En thermique du bâtiment on dit d'un bâtiment qu'il est à forte intermittence lorsque le puisage de la chaleur de ce bâtiment est irrégulier, discontinu dans le temps. Par exemple sur une semaine, les bâtiments de bureau sont considérés comme intermittents : on chauffe généralement le matin avant l'arrivée du personnel puis en journée suivant les besoins et le week-end on ne chauffe pas. Par contre, les logements collectifs ou les maisons individuelles



Illustration 2: Quartier mixte regroupant commerces, services et logements.
Sur la photo : immeuble de logements, commerces au rez-de-chaussée, école et médiathèque à droite.

⁷ Source : AMORCE : « Réseaux de chaleur et bâtiments basse consommation : l'équation impossible ? » (2011)

ont une meilleure intermittence (plus faible) : on chauffe plus longtemps en journée et le week-end. Enfin, les EHPAD⁸ sont des bâtiments à très faible intermittence (donc très bonne): les chambres ainsi que les locaux sont chauffés en permanence.

Bâtiment	Bureaux, Gymnases	Maisons individuelles, LC	EHPAD, Hôtels
Intermittence	Élevée (mauvaise)	Moyenne (correcte)	Faible (bonne)

Les pics de besoins de chaleur dimensionnent les puissances de chaudières mises en places pour chauffer un bâtiment, ou tout un quartier dans le cas d'un réseau de chaleur. La chaudière doit être dimensionnée de façon à répondre au pic le plus élevé de l'année (100% de la puissance) même si le reste du temps elle ne fonctionne qu'à 60% de sa puissance de fonctionnement maximale : on parle de dégradation du rendement de génération. Cette situation se retrouve régulièrement dans les bâtiments d'habitation avec une chaudière individuelle mixte (production de chauffage et d'ECS) : la chaudière est dimensionnée de façon à assurer le chauffage dans les conditions d'un hiver rigoureux mais est utilisée à des taux de charges faibles en été pour la production d'ECS. Globalement, sur l'année, on utilise donc une faible partie de la puissance dans laquelle on a pourtant investi pour équiper le logement. Ce surcoût d'investissement est d'autant plus problématique que les systèmes fonctionnant à partir d'énergies renouvelables ont généralement un coût d'investissement, à la puissance installée, très supérieur à celui de systèmes gaz ou électriques de puissance équivalente.

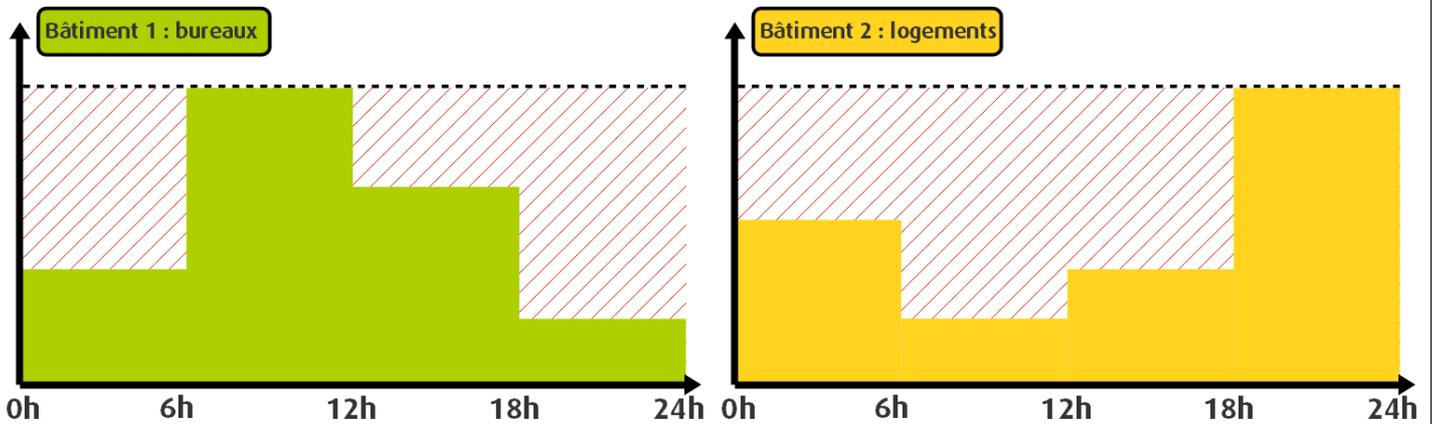
Dans le cas d'un réseau de chaleur, ce problème peut être assez souvent évité : une chaufferie alimente différents bâtiments qui ont chacun des pics de chaleur plus ou moins intense durant l'année, et désynchronisés à l'échelle d'une journée. Ainsi, durant la période hivernale, la chaudière principale subvient à l'ensemble des pics et en été (la chaudière d'appoint étant mise en service les jours de fortes demandes ou bien de panne de la chaudière principale), si le réseau est raccordé à une piscine municipale, une blanchisserie ou autre établissement consommant beaucoup de chaleur même en été, la chaudière principale assurera la production de chaud (on parle donc de lissage des pics). A une échelle plus réduite, sur une journée par exemple, le fait de raccorder à un même réseau de chaleur ou de froid des bâtiments qui ont des besoins d'énergie à des périodes différentes (désynchronisation des pics de besoins de chaleur) permet d'avoir au global une intermittence réduite.

L'encadré présenté page suivante montre le principe et l'intérêt du foisonnement, sur la base d'un exemple simplifié.

⁸ Établissement d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes

Présentation schématique du principe du foisonnement

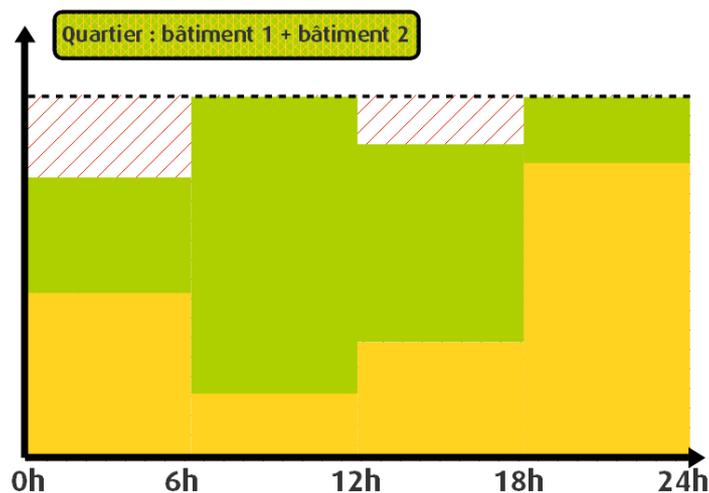
Cas n°1 : 2 bâtiments disposant chacun de leur système de chauffage



Pour le bâtiment 1 (bureaux), la pointe de consommation se situe sur la tranche horaire 6h-12h (arrivée des employés dans le bâtiment). A l'inverse la consommation est très faible en soirée, le bâtiment étant inoccupé. Dans le bâtiment 2 (logements), on considère dans cet exemple simplifié que c'est le scénario inverse : en journée, le logement est vide donc faiblement chauffé, en revanche les occupants présents en soirée et la nuit font appel au chauffage pour assurer leur confort.

Le système de chauffage propre au bâtiment 1 doit être capable de délivrer la puissance nécessaire au pic de la tranche matinale, tandis que celui du bâtiment 2 doit assurer la puissance nécessaire au pic du soir. Les surfaces de hachures rouges représentent la puissance installée et non utilisée sur chaque tranche horaire. On constate que ces surfaces sont relativement importantes.

Cas n°2 : 2 bâtiments constituant un « micro-quartier », chauffés par un système collectif



Les profils d'appel de chaleur des 2 bâtiments sont strictement identiques à ceux du cas n°1. En les additionnant, on obtient une courbe d'appel sur la journée beaucoup plus stable, les pics du bâtiment 1 étant en phase avec les heures creuses du bâtiment 2.

On constate que la surface hachurée est beaucoup plus faible que dans le cas n°1. La puissance totale installée est plus faible et les générateurs fonctionnent plus souvent à un régime proche de leur puissance nominale, ce qui améliore leur rendement.

2.3 - Pertinence énergétique

Lorsque l'on étudie la pertinence d'un système vis à vis d'un autre, plusieurs critères de comparaison peuvent être employés.

Dans le cadre de cette étude nous limitons la comparaison sur la base de deux types de paramètres :

- des paramètres énergétiques
- des paramètres environnementaux

2.3.1 - Les indicateurs énergétiques

2.3.1.a - Énergie utile [kWh]

Représente la quantité d'énergie fournie par la chaudière pour répondre aux besoins en chaud et ECS des usagers. Cet indicateur permet de connaître le total des besoins d'un quartier. Une différence peut intervenir entre l'énergie utile fournie par la chaufferie d'un réseau de chaleur et la somme des énergies utiles fournies par les systèmes individuels. Cette différence est notamment due à l'arrêt de la chaudière d'appoint sur le réseau en période estivale.

2.3.1.b - Énergie finale consommée [kWh]

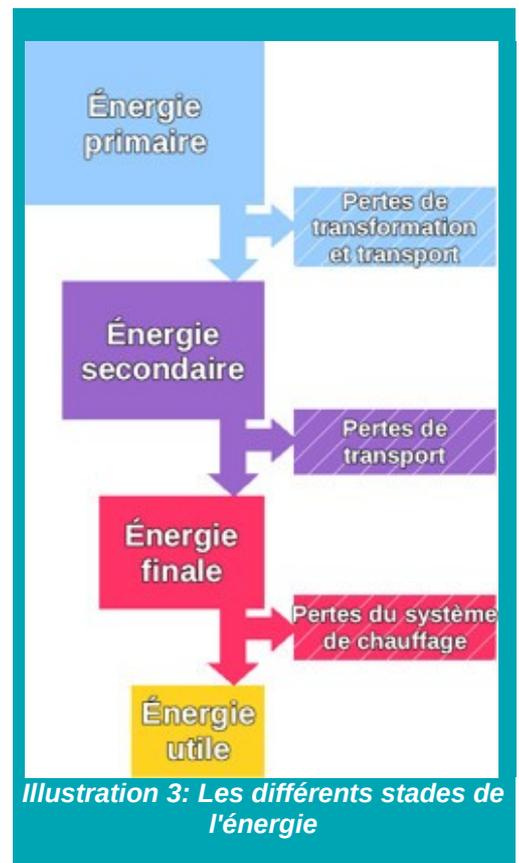
Représente la quantité d'énergie finale consommée par le réseau pour fournir de l'énergie utile. Il permet de connaître les quantités de combustibles consommées par le système de chauffage. Par ailleurs le rapport entre l'énergie utile fournie et l'énergie finale consommée correspond au rendement global du réseau de chaleur. La différence entre l'énergie finale consommée et l'énergie utile correspond aux pertes (pertes de génération, pertes dans le réseau de distribution) et aux consommations électriques des auxiliaires.

2.3.1.c - Facteur de ressource primaire [sans unité]

Correspond à la quantité d'énergie primaire⁹ consommée par le réseau relativement à la quantité d'énergie utile délivrée. Un système est d'autant plus performant que son facteur de ressource primaire sera faible.

2.3.1.d - Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance [h]

Correspond au rapport entre l'énergie utile livrée et la puissance du système. On parle également de « durée de fonctionnement ». Moins les besoins sont intermittents, plus la durée



⁹ L'énergie primaire est l'énergie brute n'ayant subi aucune transformation

d'utilisation équivalente à pleine puissance est élevée. Comme le coût d'un système de génération dépend de sa puissance, et que son amortissement dépend de la quantité de chaleur produite (donc vendue), on cherche à obtenir une durée de fonctionnement aussi élevée que possible.

Pour un fonctionnement théorique à pleine charge (chaudière qui serait à 100% de sa puissance nominale toute l'année), la durée de fonctionnement est de 8760 heures (24x365). Une chaudière au bois fonctionnant plus de 5000 heures est très performante¹⁰. Un tel fonctionnement est possible dans des zones d'activité ou en chauffage urbain si l'on chauffe, l'été des piscines, des hôpitaux, des entreprises ou encore pour produire du froid. Une « durée » de 2500 heures est courante. Lorsque la « durée » de fonctionnement est inférieure à 2000 heures, cela signifie que la capacité de la chaudière est peu exploitée, avec un impact négatif sur le coût de la chaleur, dont une partie sert à rembourser l'achat de la puissance installée.

2.3.2 - Les indicateurs environnementaux

2.3.2.a - Contenu CO₂ de l'énergie [kgCO₂/kWh]

Représente le rapport entre la quantité de CO₂ émise liée aux consommations de combustibles et la quantité d'énergie finale consommée.

2.3.2.b - Part d'énergie renouvelable [%]

Représente le rapport entre la quantité d'énergie d'origine renouvelable et la quantité d'énergie finale consommée.

2.4 - L'outil de simulation

Afin de quantifier l'impact de la variation du mix énergétique et de la mixité d'usage sur la pertinence d'un réseau de chaleur quant à la desserte énergétique d'un quartier, nous avons utilisé un outil de simulation thermique.

Cet outil, développé par le CETE de l'Ouest, permet de réaliser à l'échelle d'un (ou plusieurs) quartier(s), voire d'une ville (sous réserve de pouvoir la modéliser avec les paramètres disponibles dans l'outil), une comparaison des quantités d'énergies finales (mais aussi primaires) consommées pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (prise en compte que pour quelques bâtiments), selon que les bâtiments de la zone étudiée sont équipés de systèmes décentralisés ou desservis par un réseau de chaleur. Les indicateurs environnementaux mentionnés au paragraphe 2.3.2 sont aussi calculés.

Cet outil n'a pas vocation à remplacer une étude de desserte énergétique spécifique d'un quartier prenant en compte toutes les caractéristiques réelles des bâtiments et le contexte local du quartier. Il s'agit avant tout d'un outil de sensibilisation, d'illustration et d'aide à la réflexion.

¹⁰ Source : rapport « Les réseaux de chaleur » - Conseil général des Mines – 2006 - <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/les-reseaux-de-chaleur-conseil-a410.html>

2.4.1 - Les données d'entrées

La liste des données à renseigner pour caractériser le quartier, le réseau et les systèmes est la suivante

	Paramètres	Données à renseigner	
Quartier	Zone climatique	H1,H2,H3 ¹¹	
	Logement collectif neuf	Surface chauffée totale des bâtiments m ²	
		Nombre de logements	
		Nombre de bâtiments	
		Système de chauffage (individuel ou en pied d'immeuble)	
		Type de générateur	
	Logement collectif ancien	Identique à logement collectif neuf	
	Bureau neuf	Surface chauffée totale des bâtiments m ²	
		Nombre de bâtiments	
		Type de générateur	
	Bureau ancien	Identique à bureau neuf	
	Hôtel neuf	Identique aux autres bâtiments	
	Restaurant ancien	Identique aux autres bâtiments	
	Enseignement neuf	Identique aux autres bâtiments	
	Enseignement ancien	Identique aux autres bâtiments	
Commerce neuf	Identique aux autres bâtiments		
Sport neuf (gymnase)	Identique aux autres bâtiments		
Maison individuelle	Identique aux autres bâtiments		
Réseau de chaleur	Longueur de voirie ¹²	m	

¹¹ Le découpage climatique retenu est celui proposé par la réglementation thermique des bâtiments neufs, RT2005

¹² Afin que l'outil soit utilisable simplement à partir de données relatives à l'aménagement, la longueur du réseau de distribution de chaleur est estimée en fonction de la longueur du réseau de voirie.

	Paramètres	Données à renseigner
Systèmes décentralisés	Fioul standard	Puissance du générateur kW
	Fioul basse température	Identique aux autres générateurs
	Fioul condensation	Identique aux autres générateurs
	Gaz standard	Identique aux autres générateurs
	Gaz basse température	Identique aux autres générateurs
	Gaz condensation	Identique aux autres générateurs
	Chaudière bois classe 1	Identique aux autres générateurs
	Chaudière bois classe 2	Identique aux autres générateurs
	Chaudière bois classe 3	Identique aux autres générateurs
	PAC air	COP
	PAC autre	COP
	Chauffage électrique	Puissance du générateur kW
	Réseau de chaleur	Chaudière prioritaire
Si PAC renseigner le COP		
Puissance du générateur prioritaire kW		
Chaudière d'appoint		Identique à la chaudière prioritaire

2.4.2 - L'algorithme de calcul

Les besoins thermiques

Des profils de besoin en chaud et en ECS (uniquement pour logement collectif neuf et ancien, hôtel neuf) ont été établis heure par heure sur une année complète.

Concernant les **bâtiments neufs** les besoins ont été calculés sur la base de bâtiments BBC par le logiciel de calcul thermique RT2005.

Concernant les **bâtiments anciens**, les besoins ont été calculés sur la base de bâtiments existants par le logiciel de calcul thermique RTex.

Le rendement des systèmes

Le calcul des rendements utilise la méthode définie dans la réglementation thermique des bâtiments neufs RT2005¹³. Le rendement fait intervenir le taux de charge de la chaudière, la puissance nominale de la chaudière et les rendements à charge intermédiaire.

Les pertes thermiques du réseaux

Les pertes thermiques des canalisations ont été déterminées sur la partie primaire et secondaire du réseau. L'hypothèse a été faite que le type de canalisations est identique pour les deux réseaux, seule change la température de l'eau chaude dans les canalisations. Le réseau de chaleur simulé est de type moyenne température (90°C dans le primaire et 70°C dans le secondaire). La quantité de chaleur perdue dans les canalisations est déterminée par la norme NF EN ISO 12241¹⁴.

Les pertes thermiques dans les sous-stations d'échange

Les pertes thermiques au niveau de chaque sous-station d'échanges ont été calculées en utilisant la méthode proposée dans la réglementation thermique des bâtiments existants Rtex¹⁵.

La consommation électrique des auxiliaires du réseau

L'hypothèse a été faite que le réseau de canalisation est de type 3 voies avec une vitesse d'eau constante. Par ailleurs par souci de simplification du calcul, le réseau de chaleur est modélisé en ligne droite. Les pertes de charges sont calculées grâce au coefficient de Moody. La puissance des pompes installées est ainsi calculée en tenant compte de la perte de charge du réseau et du débit de circulation d'eau. On suppose aussi que les pompes du réseau fonctionnent sans interruption toute l'année.



13 Réglementation thermique RT2005, méthode de calcul ThCE-chapitre 17 : génération de chaleur, de froid et d'ECS

14 NF EN ISO 12241 « <Isolation thermique des équipements de bâtiments et des installations industrielles – chap 8 >

15 Méthode de calcul Th-CE Ex – Chapitre XV : Génération, stockage et transfert de chaleur, de froid pour le chauffage, le refroidissement et l'ECS

3 - Présentation de l'étude de cas

Méthodologie retenue

Le choix de simuler un quartier existant a été retenu pour s'affranchir d'erreurs liées à la définition d'un quartier théorique, dont les paramètres de mixité, de densité, de rapport surface bâtie/linéaire de voirie, etc. auraient pu ne pas être cohérents les uns avec les autres.

La simulation du quartier existant servira de socle de comparaison afin de quantifier directement les effets de densité ou de foisonnement par rapport à la première simulation, à savoir celle du quartier existant.

Par ailleurs, afin d'évaluer la pertinence du réseau de chaleur vis à vis de solutions décentralisées, comme par exemple des chaudières en pied d'immeuble, une simulation du quartier avec un ensemble de systèmes décentralisés de production de chaleur sera réalisée pour chaque cas étudié.

Pour chaque simulation, l'ensemble des indicateurs (chapitre 2.3.1) seront calculés pour le réseau mais aussi pour l'ensemble des solutions décentralisées de référence.

3.1 - Présentation du quartier simulé

3.1.1 - *Le quartier Bottière-Chénaie*

Le quartier Bottière-Chénaie est un projet de ZAC écoquartier porté par la ville de Nantes. Ce projet, dont la phase construction a débuté en 2009, est situé dans le Nord-Est de Nantes. Il a pour objectif de créer un centre urbain au cœur d'un quartier plus vaste de Nantes : le quartier Bottière. Sur une surface de 35 ha, 160 000 m² de surface habitable sont prévues :

- 140 000 m² de surface pour 2100 logements répartis sur 48 bâtiments collectifs ;
- 20 000 m² de surface pour 300 maisons individuelles.

Cela représente une population approximative de 4500 habitants.

Par ailleurs, 7650 m² de surface pour les services publics sont prévus :

- Une médiathèque de 2000m²;
- Un gymnase de 1650 m²;
- Un groupe scolaire de 4000 m².

Enfin, 7350 m² de surfaces d'activités sont prévues, répartis sur 6 bâtiments. Un restaurant de 300 m² est prévu lui aussi sur la ZAC Bottière-Chénaie.

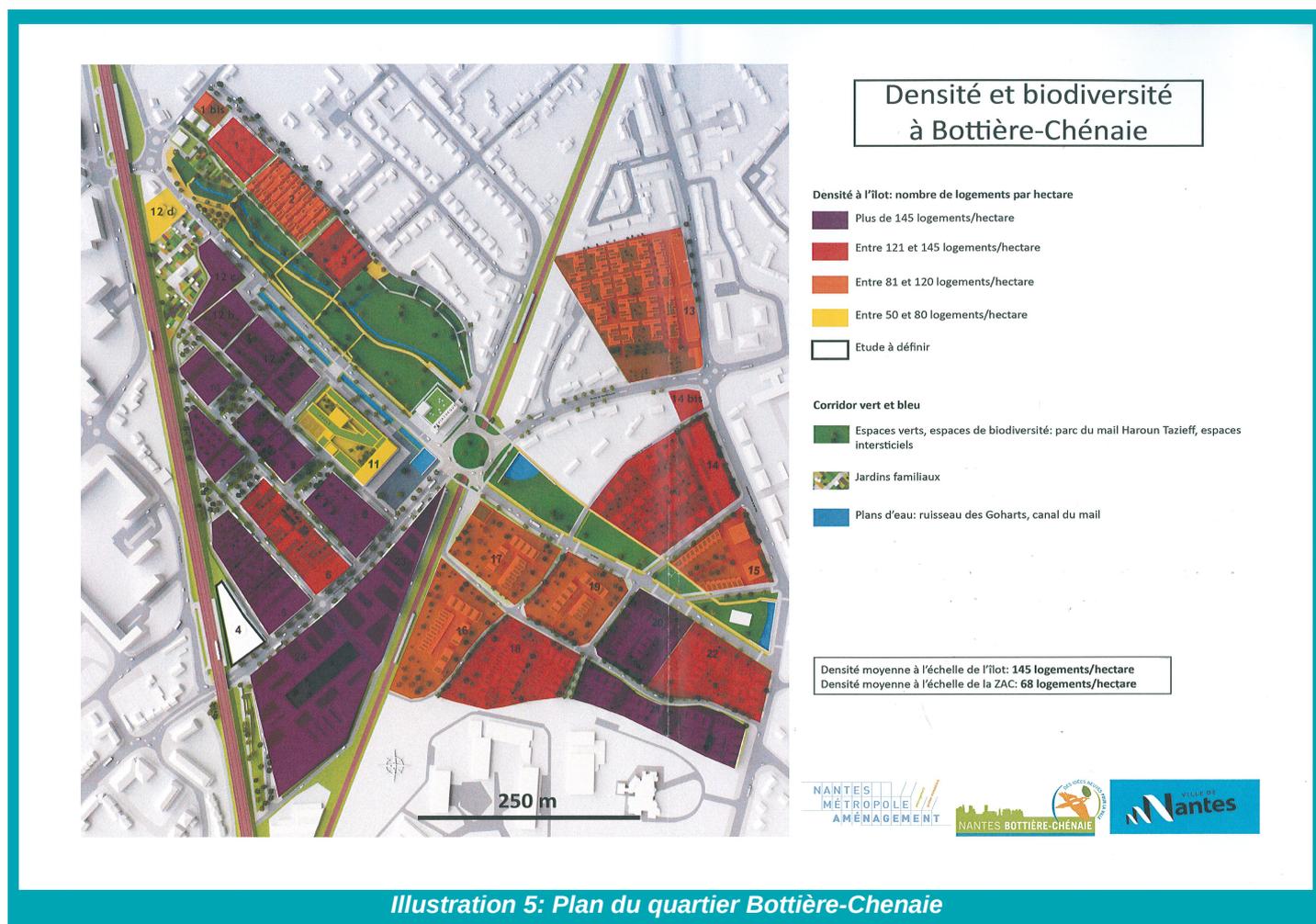


Illustration 5: Plan du quartier Bottière-Chénaie

3.1.2 - Le réseau de chaleur

Le quartier Bottière-Chénaie n'étant pas desservi par un réseau de chaleur existant ou projeté, nous avons fait un choix quant au réseau à étudier. Suite aux visites des différents réseaux de chaleur¹⁶, nous constatons que les opérations d'aménagement neuf ou de réhabilitations massives privilégient majoritairement un réseau de chaleur bois avec appoint gaz.

Le réseau de chaleur retenu pour l'étude est alimenté par **le bois énergie et en appoint par le gaz**. La chaufferie bois est dimensionnée de sorte à fournir 90%¹⁷ de la quantité d'énergie produite annuellement afin de répondre aux besoins du quartier. La chaudière d'appoint est interrompue en été.

Une étude sommaire menée par le PCI réseaux de chaleur a permis d'établir un ratio moyen de 45% entre le linéaire de voirie d'une partie de territoire urbanisée et la longueur du réseau primaire nécessaire pour desservir l'ensemble des bâtiments du quartier (ou des quartiers) considéré(s) : pour un quartier dont la voirie mesure 10km, le réseau primaire aura une longueur de l'ordre de 4,5km¹⁸. Ce ratio est bien entendu à utiliser avec prudence et ne se vérifiera pas à chaque fois, mais dans le cadre de la présente simulation, il permet de disposer

¹⁶ Voir les exemples de réalisation :

<http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/exemples-de-realizations-r293.html>

¹⁷ Taux moyen de dimensionnement constaté sur les installations nouvelles ou sur les choix retenus pour les évolution du mix énergétique

¹⁸ Voir <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/relation-entre-lineaire-de-reseau-a711.html>

d'un ordre de grandeur réaliste sans avoir à définir « manuellement » un tracé du réseau de chaleur. Sur la base de ces hypothèses, le linéaire de voirie du quartier Bottière-Chénaie étant de 6575 m, on en déduit une longueur de réseau primaire de 2959 m.

Par ailleurs, lors de nos visites, nous avons constaté que suivant la densité des quartiers étudiés, les sous-stations ne se situaient pas automatiquement en pied d'immeubles mais plutôt au centre d'îlot d'opération. Ainsi, une longueur de réseau secondaire a été prise en compte dans l'outil de simulation. En première approche et en l'absence de chiffres plus précis disponibles, nous considérons que la longueur du réseau primaire et celle du secondaire sont égales. Cette hypothèse est elle aussi à manier avec précaution et pourrait nécessiter d'être précisée par l'étude de cas réels.

Enfin le réseau de chaleur est de type « moyenne température ¹⁹ » : gaine sur-isolée enterrée, par paire de tuyau (DN 50, isolation par 6 cm de polyuréthane) avec un régime de température 90°C/70°C. Les ratios de dissipation sont de 10W/m pour le réseau primaire et 8W/m pour le secondaire.

3.1.3 - Les solutions décentralisées de référence

Dans le cadre de notre étude, la pertinence énergétique des systèmes décentralisés est étudiée afin de pouvoir la comparer aux résultats du réseau de chaleur.

Une synthèse des données concernant les modes de chauffage en France²⁰ réalisée conjointement par le PCI économie de la construction du CETE Nord Picardie et le PCI réseau de chaleur du CETE de l'Ouest a montré que :

- Pour les logements collectifs neufs, la production de chaleur décentralisée est assurée majoritairement par de l'électricité (59%) et par du gaz (36%);
- Pour les bâtiments tertiaires, la production de chaleur décentralisée représente 51% des dépenses d'énergies. Par ailleurs, 41% des dépenses d'énergies sont dues à l'électricité et 32% sont dues au gaz

Ainsi nous retenons la configuration suivante pour les systèmes de production de chaleur décentralisée, qui permet à la fois de maintenir une modélisation simple, tout en étant en cohérence avec les grandes tendances observées au niveau national ces dernières années :

- Habitat collectif : chauffage collectif en pied d'immeuble avec une chaudière gaz standard;
- Habitat individuel : chauffage individuel électrique;
- Activité tertiaire : chauffage électrique;
- Équipement public et enseignement : chauffage avec une chaudière gaz standard.

La mise en place de systèmes décentralisés mobilisant les mêmes énergies que le réseau de chaleur n'est pas étudiée car peu réaliste : il n'est pas possible d'équiper tous les bâtiments de systèmes de chauffage au bois, pour des raisons logistiques (acheminement et stockage du combustible, cheminées) et environnementales (impact sur la qualité de l'air, les systèmes individuels n'étant pas aussi performants que les chaudières collectives sur ce point).

¹⁹ Lire : *Solutions techniques pour optimiser les réseaux de chaleur dans un contexte de développement de bâtiments basse consommation*. AMORCE, INDDIGO, mai 2011, 33p.

²⁰ Lire : *Comparaison économique des systèmes de production de chaleur centralisé/décentralisé_Phase 1 : contexte*. CETE Nord-Picardie, CETE Ouest. 2011. 30 p.

3.2 - Simulation 0 : le calcul de référence

3.2.1 - Définition des paramètres

Cette première simulation permet de caractériser en l'état la pertinence énergétique et environnementale du réseau de chaleur vis à vis d'un ensemble de systèmes décentralisés de production de chaleur.

Paramètres du quartier

Quartier Bottière-Chénaie réel	Quartier théorique	Nombre de bâtiment	M ² chauffés
Zone climatique H2b	Zone climatique H2	-	-
2100 logements collectifs représentant une surface de 140 000 m ² répartie sur 48 bâtiments	48 bâtiments de logements collectifs neufs d'une surface identique (2900 m ²). Soit 44 logements/bâtiment	48	140 000
300 maisons individuelles représentant un surface de 20 000m ²	300 maisons individuelles neuves d'une surface identique de 67 m ²	300	20 000
Médiathèque de 2000 m ²	Commerce neuf de 2000 m ²	1	2000
Groupe scolaire de 4000 m ²	Enseignement neuf d'une surface de 4000 m ²	1	4000
Gymnase de 1850 m ²	Sport neuf d'une surface de 1850 m ²	1	1850
7350 m ² de surfaces de commerce réparties sur 6 bâtiments	6 commerces neufs d'une surface identique de 1225 m ²	6	7350
Un restaurant-bar de 300 m ²	1 restaurant ancien d'une surface de 300 m ²	1	300

Paramètres du réseau de chaleur

- Chaudière principale bois d'une puissance de 2000 kW

- Chaudière appoint gaz standard d'une puissance de 2630 kW
- La chaudière bois assure 90% de la fourniture annuelle de besoins de chaleur
- Arrêt de la chaudière d'appoint en été
- Longueur de canalisation du réseau primaire : 2959 m

Paramètres des systèmes décentralisés

Quartier Bottière-Chénaie	Système décentralisé
48 bâtiments de logements collectifs neufs d'une surface identique (2900 m ²). Soit 44 logements/bâtiment	48 chaufferie gaz en pied d'immeuble d'une puissance de 78,8 kW chacune
300 maisons individuelles neuves d'une surface identique de 67 m ²	300 convecteurs électrique d'une puissance de 2,7 kW
Médiathèque neuf de 2000 m ²	1 convecteur électrique d'une puissance de 120,6 kW
Enseignement neuf d'une surface de 4000 m ²	1 chaudière gaz standard d'une puissance de 397,8 kW
6 commerces neufs d'une surface identique de 1225 m ²	6 convecteurs électriques identique d'une puissance de 120,6.kW chacun
1 restaurant ancien d'une surface de 300 m ²	1 convecteur électrique d'une puissance de 42,3 kW
1 gymnase d'une surface 1850 m ²	1 chaudière gaz standard d'une puissance de 150,9 kW

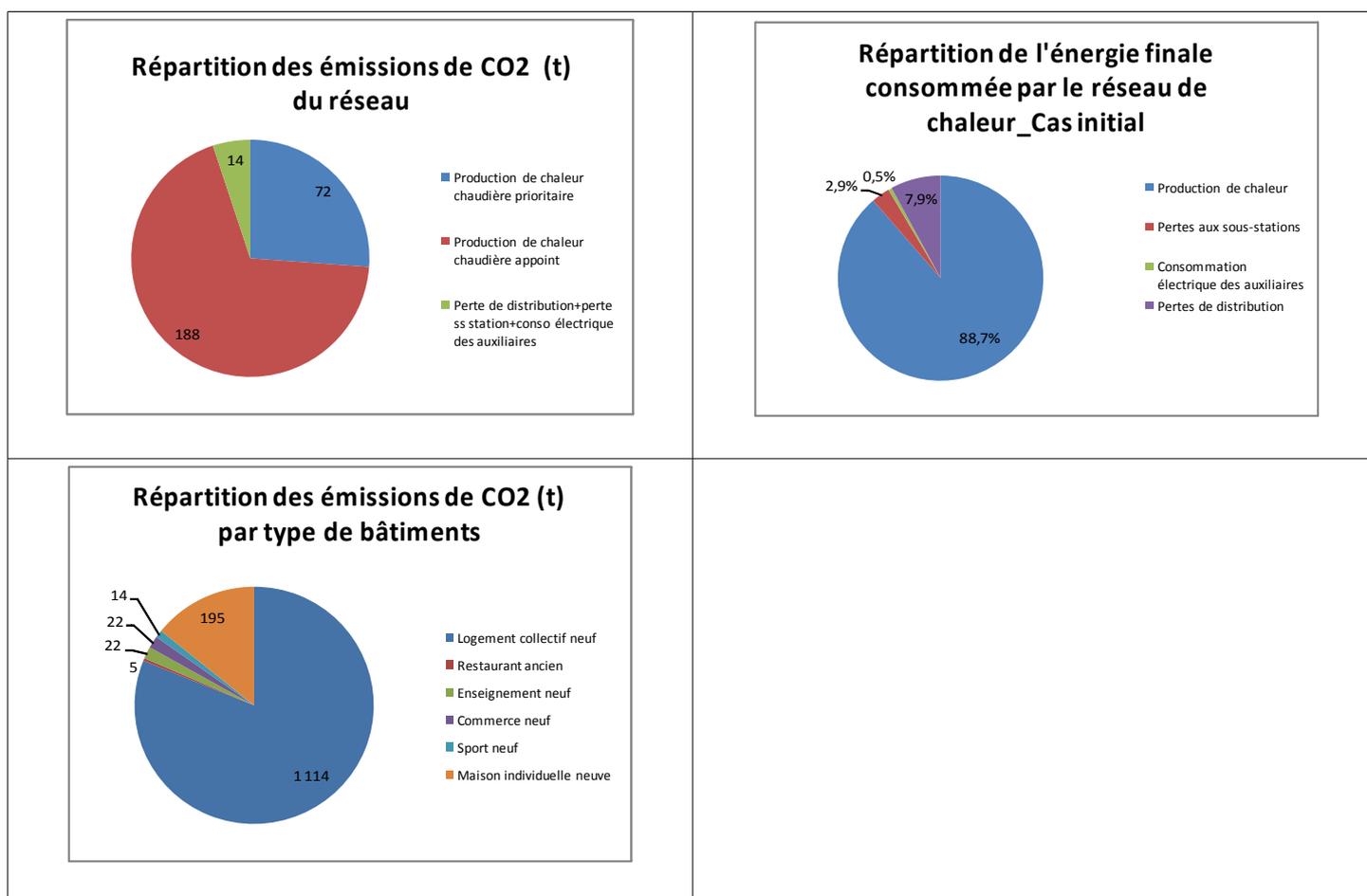
3.2.2 - Présentation des résultats

Le tableau qui suit présente les indicateurs énergétiques et environnementaux pour le réseau de chaleur et l'ensemble des systèmes décentralisés. Les cases vertes représentent un écart de valeur qui est à l'avantage des réseaux de chaleur vis à vis des systèmes décentralisés, les cases rouges représentent la tendance inverse :

	Réseau de chaleur	Systèmes décentralisés	Écart [%]
Énergie utile fournie aux bâtiments [MWh]	5250	5251	0
Énergie finale consommée [MWh]	6866	6152	-10,4
Énergie primaire consommée [MWh]	6916	8103	+17,2
Densité thermique [MWh/m]	1,78		
Rendement global (%)	76,5	85,4	+11,6
Facteur de ressource	1,32	1,76	+33,6

primaire			
Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance [h]	1134	1058	-6,7
Part d'énergie renouvelable [%]	89,7	7,1	-92,1
Tonne de CO ₂ (t)	274	1373	+401,6
Contenu CO ₂ [kgCO ₂ /kWh]	0,041	0,223	+459,9

Les graphiques suivants présentent les répartitions de l'énergie finale consommée ainsi que la répartition des émissions de CO₂ :



L'étude montre que le réseau de chaleur est moins performant au global que l'ensemble des systèmes décentralisés (**écart de 11,36% sur le rendement global**). Cet écart s'explique principalement par les déperditions thermiques du réseau de distribution. Par ailleurs les pertes liées aux sous stations sont, certes faibles, mais non négligeables.

Cependant, en terme de dimensionnement, on constate que le réseaux de chaleur est plus performant que les systèmes décentralisés. **Le facteur « Durée d'utilisation équivalente à**

plein de puissance » est nettement plus élevé que celui pondéré des systèmes décentralisés. En effet la mise en place d'un réseau de chaleur permet la mutualisation des besoins : ainsi la chaudière principale peut être sous dimensionnée vis à vis du pic de besoin mais assurera tout au long de l'année, dans des conditions optimums, la fourniture de chaleur. Les pics étant satisfaits par la mise en route de l'appoint. Pour les systèmes décentralisés, les systèmes de chauffage sont nécessairement sur-dimensionnés pour satisfaire les pics « individuels ». Le reste de l'année, surtout en été, les conditions nominales de fonctionnement ne sont pas respectées car la fourniture d'ECS doit être réalisée.

Le contenu CO₂ du réseau de chaleur est très faible comparé aux systèmes décentralisés. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où le bois énergie est employé à presque 90% pour la fourniture de chaleur. Sur l'exemple de ce quartier, la mise en place d'un réseau de chaleur desservant l'ensemble des bâtiments permet d'éviter, par rapport à la référence choisie, l'émission de plus de 1000 tonnes de CO₂, soit l'équivalent de la circulation de 480 véhicules sur une année.

3.3 - Simulation 1 : effets de la densité

Les simulations qui suivent ont pour objectif d'étudier l'effet de la variation de densité sur la performance énergétique et environnementale du réseau de chaleur. Les résultats pour les systèmes décentralisés sont aussi présentés.

A longueur de voirie constante (et donc superficie du quartier constante, car dans notre modèle, le seul paramètre indicatif de la superficie du quartier est la longueur de voirie), nous étudions l'effet d'une **augmentation de 30% des surfaces chauffés sur chaque catégorie de bâtiment**. De même, nous étudions l'effet d'une diminution de la densité, par une baisse de 30% des surfaces chauffées.

3.3.1 - Augmentation de 30% de la densité (+)

Les résultats sont les suivants :

	Réseau de chaleur	Systèmes décentralisés	Écart [%]
Énergie utile[MWh]	6825	6826	0
Énergie finale consommée [MWh]	8719	7977	-8,5
Énergie primaire consommée [MWh]	8823	10 515	+19,2
Densité thermique [MWh/an]	2,31		
Rendement global (%)	78,3	85,6	+9,3
Facteur de ressource primaire	1,29	1,76	+36
Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance [h]	1134	1058	-6,7

Part d'énergie renouvelable [%]	89,3	7,1	-92
Tonne de CO ₂ (t)	356	1780	+400,2
Contenu CO ₂ [kgCO ₂ /kWh]	0,0408	0,223	+446,7

3.3.2 - Diminution de 30% de la densité (-)

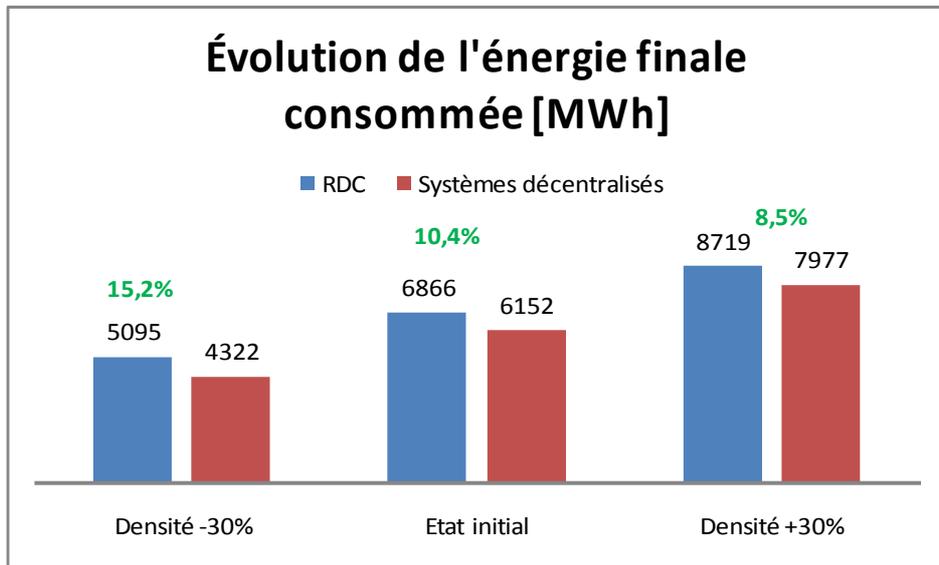
Les résultats sont les suivants:

	Réseau de chaleur	Systèmes décentralisés	Écart [%]
Énergie produite par l'ensemble des chaudières [MWh]	3675	3676	0
Énergie finale consommée [MWh]	5095	4322	-15,2
Énergie primaire consommée [MWh]	5113	5688	+11,2
Densité thermique [MWh/an]	1,24		
Rendement global (%)	72,1	85,1	+17,9
Facteur de ressource primaire	1,39	1,76	+26,6
Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance [h]	1134	1056	-6,9
Part d'énergie renouvelable [%]	89,6	7,1	-92,1
Tonne de CO ₂ (t)	211	965	+357,8
Contenu CO ₂ [kgCO ₂ /kWh]	0,0413	0,223	+439,8

3.3.3 - Comparaison et interprétation

Les résultats sont présentés pour certains paramètres (l'ensemble des graphiques sont présentés en ANNEXES). Afin de pouvoir comparer aisément l'effet de l'évolution de la densité sur les paramètres retenus, les résultats pour les 3 simulations sont présentés sous la forme d'histogrammes. Par ailleurs, afin de vérifier la pertinence du réseau de chaleur vis à vis de la solution décentralisée, les résultats des solutions décentralisées sont aussi présentés pour l'interprétation de l'évolution des écarts. Les écarts sont représentés par des valeurs en pourcentages (valeurs écrites en vert).

3.3.3.a - Effet de la variation de densité sur l'énergie finale consommée



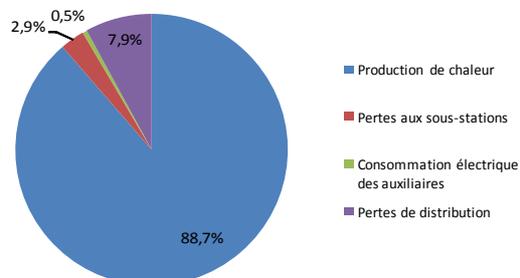
A variation équivalente de densité thermique (+/-30%), la diminution de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur est plus faible (-25,8%) que l'augmentation (+27%). **Suite à une baisse de densité, la consommation diminue moins fortement qu'elle n'augmente avec une hausse équivalente de densité.** L'observation est identique pour l'énergie primaire consommée.

La comparaison de la performance du réseau de chaleur à celle de l'ensemble des systèmes décentralisés permet de constater que sur les 3 simulations, le réseau consomme plus d'énergie finale (une part importante de bâtiments chauffés par des radiateurs électriques au rendement théorique de 100%, explique pour partie ce constat). Cependant, **l'augmentation de la densité thermique à tendance à réduire l'écart entre ces deux solutions à l'avantage du réseau de chaleur.**

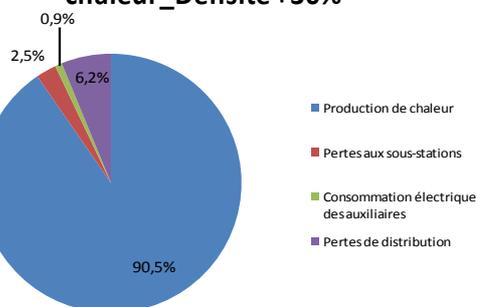
En simulant un doublement de la densité, cet écart se réduit à 7,6%. Il semble qu'en augmentant encore plus fortement la densité, cet écart finisse par ne plus diminuer.

- Les diagrammes suivants présentent plus en détail la répartition de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur:

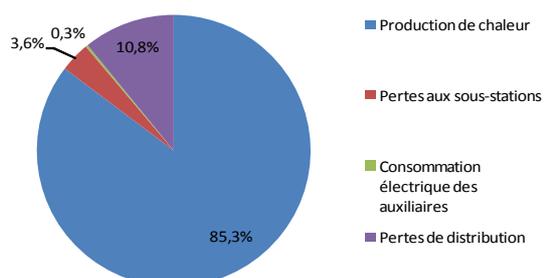
Répartition de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur_Cas initial



Répartition de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur_Densité +30%



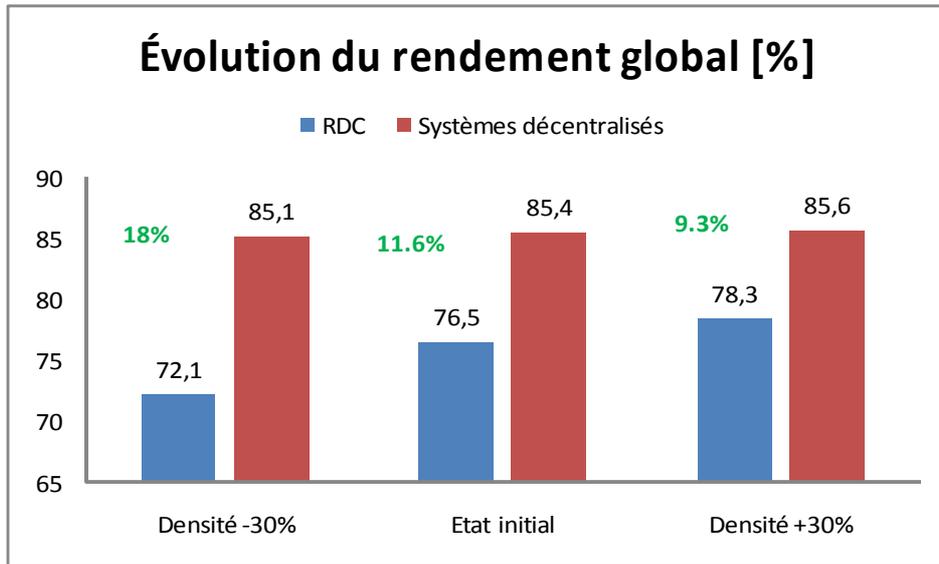
Répartition de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur_Densité -30%



Nous constatons qu'en relatif, les pertes de distribution et les pertes aux sous-stations sont plus importantes lorsque la densité thermique du réseau est plus faible. L'explication vient du fait qu'au final, on dépense plus d'énergie à maintenir en température le réseau de distribution alors que la demande de chaleur diminue. Ce constat est à l'origine de diverses techniques d'optimisation récemment testées permettant d'améliorer significativement les performances énergétiques d'un réseau de chaleur lorsque la densité du quartier qu'il dessert est plutôt faible²¹.

21 Lire : Le point sur « Les techniques d'optimisation des réseaux de chaleur »

3.3.3.b - Effet de la variation de densité sur le rendement global

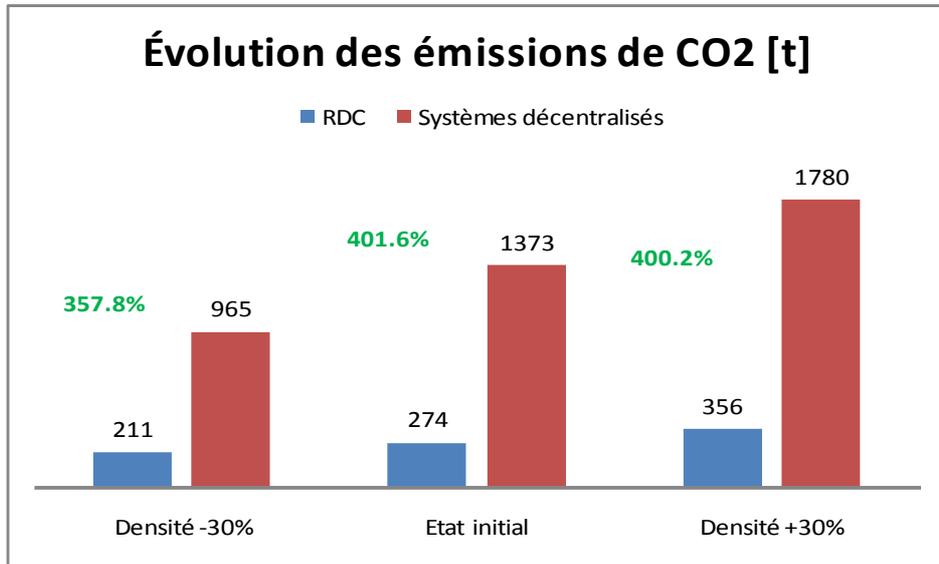


La diminution de la densité thermique dégrade plus fortement le rendement global du réseau (-4,4 points) que ne l'accroît une augmentation de densité équivalente en valeur absolue (+1,8 points). L'explication vient du fait qu'à variation équivalente, la quantité d'énergie finale diminue moins fortement qu'elle augmente avec une augmentation de la densité.

Ce constat suit celui qui a été mis en évidence sur le paramètre « Énergie finale consommée ». Les deux indicateurs étant liés, ce n'est pas surprenant.

Nous pouvons vérifier que l'amélioration de la densité thermique n'a que peu d'impact sur le rendement des systèmes décentralisés : ceux-ci étant dimensionnés pour répondre au pic de besoin. Dans le cas d'un réseau de chaleur, on ne dimensionne pas la chaudière principale au pic de besoin mais au taux de couverture. Ainsi l'augmentation de densité thermique a un rôle majeur dans l'amélioration des performances thermique d'un réseau puisqu'elle permet de faire fonctionner la chaufferie dans les conditions optimums.

3.3.3.c - Effet de la variation de densité sur les émissions de CO₂



A variation de densité thermique équivalente, la quantité de CO₂ émise par le réseau de chaleur s'accroît plus fortement lorsque le quartier se densifie qu'elle diminue lorsque la densité diminue (on remarque qu'il s'agit du constat inverse de celui réalisé pour le paramètre énergie finale consommée). Cet écart s'explique du fait que les consommations électriques des auxiliaires du réseau de chaleur (liées aux pompes de distributions) augmentent plus fortement avec une densification croissante (voir les 3 diagrammes précédents). Par ailleurs, le contenu CO₂ de l'électricité défini dans l'annexe 5 de l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au DPE vente (0,180 kg/kWh) étant plus de dix fois supérieures à celui du bois énergie (0,013 kg/kWh) cela explique une plus forte augmentation de la quantité de CO₂ émise du réseau de chaleur lorsque celui-ci se densifie.

Cependant, le contenu CO₂ du réseau de chaleur reste constant à 0,04 kgCO₂eq/kWh (cette valeur correspond à la meilleure tranche du contenu CO₂ définie dans la RT2012).

La solution d'un réseau de chaleur bois reste très vertueuse en terme d'émission de CO₂. Une économie de près de 1400 t de CO₂ est réalisée, cela représente la quantité de CO₂ émise en moyenne par 672 véhicules par an soit 30% du parc de voitures des 4500 habitants du quartier initial²².

3.3.4 - Conclusion de l'effet de densité sur un réseau de chaleur

Nous pouvons conclure sur ces deux premières simulations que

- l'ensemble des systèmes décentralisés sont plus performants sur le plan énergétique (énergie finale consommée, rendement global) que la solution réseau de chaleur mais que les écarts, en moyenne, restent limités à 11%.
- 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. Cet écart se situe en moyenne aux alentours de 380%
- Quant à l'effet de la variation de la densité, nous constatons que la diminution des besoins de chaleur nuit plus fortement aux performances thermiques d'un réseau qu'une

²² Source : DG «Énergie et transport/Eurostat », 2004

augmentation équivalente de densité ne les améliore. Cet écart s'explique par la part relative plus importante que prennent les pertes de distribution.

3.4 - Simulation 2 : effets de la mixité d'usage

Les simulations qui suivent ont pour objectif d'étudier l'effet de la mixité d'usage sur la performance énergétique et environnementale du réseau de chaleur. Les résultats pour les systèmes décentralisés sont aussi présentés.

La mixité d'usage se caractérise, en terme énergétique pour le réseau, par un effet de foisonnement des besoins. Ce foisonnement se caractérise suivant deux paramètres :

- 1) l'intermittence
- 2) l'amplitude des pics de besoins de chaleur

A l'échelle du quartier, ces deux paramètres sont directement liés à l'intermittence individuelle de chacun des bâtiments et à la variété des courbes d'intermittences représentées dans le quartier :

- un quartier composé à 100% de bâtiments dont la consommation serait la même toute l'année serait très faiblement intermittent, bien que sa mixité soit nulle
- un quartier composé de 10 types de bâtiments différents, mais dont les pics de consommation seraient synchrones, de courte durée et élevés, serait très fortement intermittent, bien que sa mixité soit forte (toutefois, il est peu probable que des bâtiments d'usage vraiment différent aient des pics de besoins synchrones)²³.

3.4.1 - Quartier à mixité d'usage importante

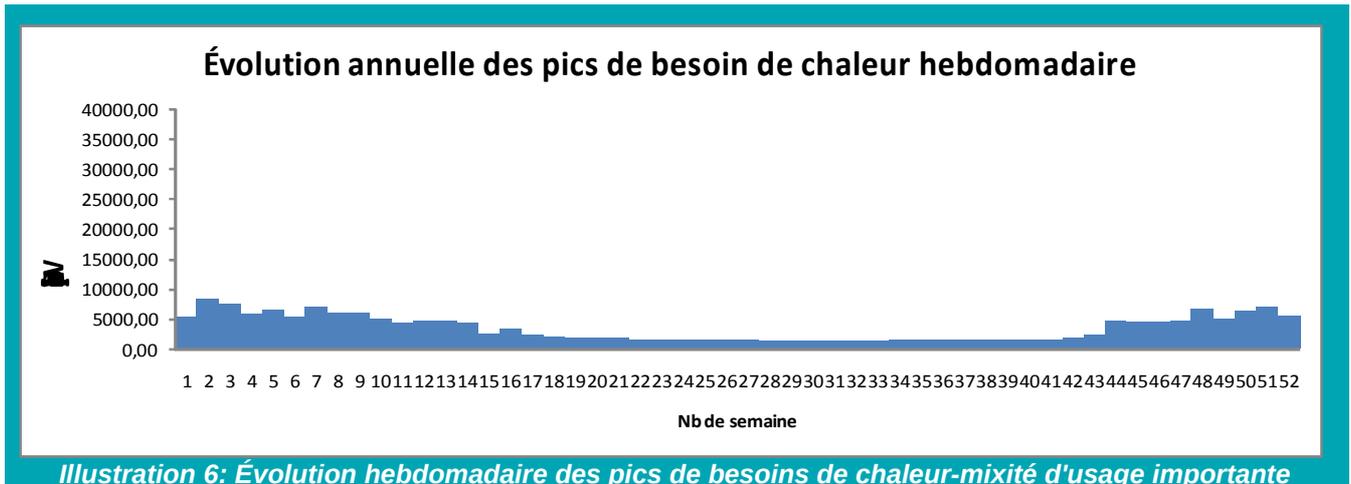
Il s'agit ici d'étudier la performance énergétique d'un réseau de chaleur qui desservirait, à densité thermique globale constante, une grande variété de bâtiments d'usage différent. Par rapport au quartier initial, un nombre important de bâtiments de bureaux ont été rajoutés :

Quartier Bottière-Chenaie	Nouvelles surfaces	Système de chauffage
Logement collectif neuf :140 000m ²	Logement collectif neuf 120000 m ² (-14%%)	Chaudière gaz
300 Maison individuelle : 20 000m ²	150 Maisons individuelles : 10000m ² (-50%)	Électrique
Médiathèque 2000 m ²	Médiathèque 2000 m ² (=)	Électrique
Enseignement scolaire 4000m ²	Enseignement scolaire 8000m ² (+100%)	Chaudière gaz
Gymnase 1850m ²	Gymnase 1850m ² (+170%)	Chaudière gaz
6 commerces, 7350 m ²	13 commerces, 18000m ² (+145%)	Électrique
Restaurant 300m ²	Restaurant 100m ² (+233%)	Électrique
-	Bureaux : 40 000m ² (+)	Électrique

²³ Voir le schéma de principe du foisonnement, page 11

-	3 Hôtels : 6000 m ² (+)	Chaudière gaz
---	------------------------------------	---------------

Le graphique suivant a été établi en représentant, sur chacune des 52 semaines de l'année, la valeur de besoin horaire la plus élevée constatée dans la semaine, pour le quartier pris dans son ensemble. Une courbe « lisse » (avec peu de creux et pics) indique un quartier d'intermittence inter-hebdomadaire faible. Une courbe « accidentée » indique au contraire un quartier d'intermittence inter-hebdomadaire élevée



En complément de cette mesure et représentation de l'intermittence inter-hebdomadaire à l'échelle de l'année, nous avons également mesuré l'intermittence inter-horaire, à l'échelle de la semaine. Pour cela, nous calculons les besoins du quartier, heure par heure, sur une semaine de référence*²⁴ en hiver. Nous obtenons une quantité totale d'énergie utile sur le quartier, pour la semaine (en W.h). Nous obtenons également un pic de puissance appelée (en W) : il s'agit en fait de la valeur numérique de besoin horaire la plus élevée sur la semaine (en W.h). Ce pic de puissance dimensionne le système de chauffage ; on fait l'hypothèse qu'on installe un système de puissance égale à ce pic.

On peut ainsi calculer une durée de fonctionnement (voir définition au 2.3.1.d) du système sur la semaine, en divisant le besoin hebdomadaire par la puissance installée. On constate que dans ce quartier « à mixité d'usage important », la durée de fonctionnement sur la semaine de référence est de 45 heures.

Les résultats sont les suivants :

	Réseau de chaleur	Systèmes décentralisés	Écart [%]
Énergie produite par l'ensemble des chaudières [MWh]	5239	5239	-
Énergie finale consommée [MWh]	7089	6177	-12,9
Énergie primaire	7349	8052	9,6

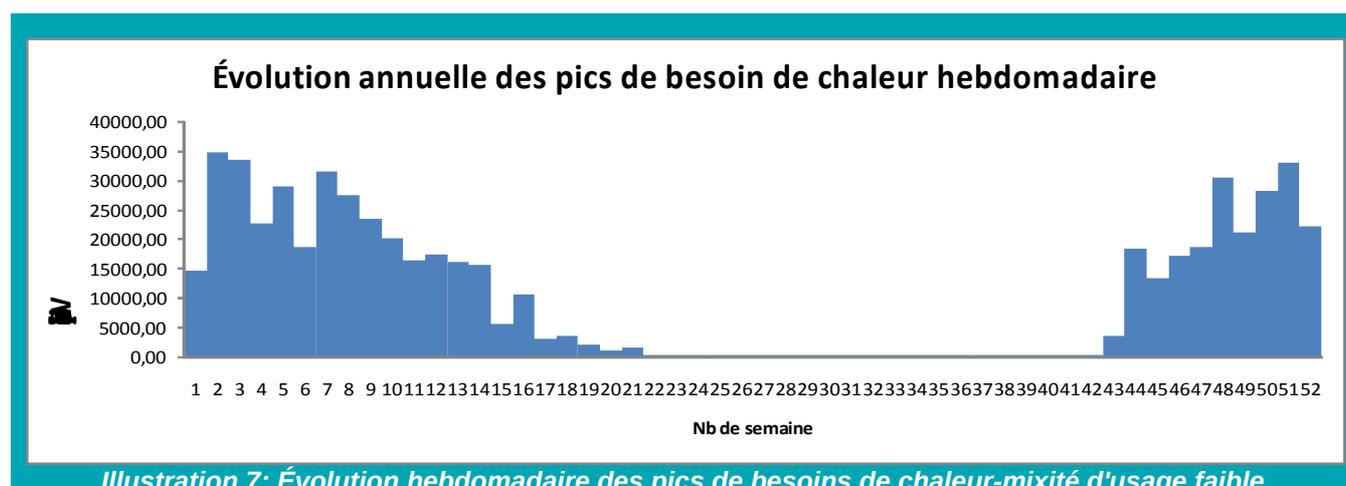
²⁴ La semaine de référence considérée en est fait la moyenne des 3 premières semaines de l'année. Nous calculons, heure par heure, la moyenne des consommations sur les 3 mêmes tranches horaires des 3 semaines consécutives, puis nous reconstituons un profil hebdomadaire heure par heure, avec ces valeurs moyennes.

consommée [MWh]			
Densité thermique [MWh/an]	1,77		
Rendement global (%)	73,9	84,8	14,7
Facteur de ressource primaire	1,45	1,75	24,6
Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance [h]	635	928	46,1
Part d'énergie renouvelable [%]	86,6	6,8	92,2
Tonne de CO ₂ (t)	369	1381	274,8
Contenu CO ₂ [kgCO ₂ /kWh]	0,052	0,224	330,1

3.4.2 - Quartier à mixité d'usage faible

Il s'agit ici d'étudier la performance énergétique d'un réseau de chaleur qui desservirait, à densité thermique globale constante, un quartier représenté par un nombre limité de bâtiments à usage différent. Afin d'étudier un quartier qui ne soit pas totalement fictif, nous n'avons pas étudié la performance d'un réseau de chaleur qui alimenterait un quartier avec un seul type de bâtiments mais plutôt un quartier avec des bâtiments à usages similaires : bureaux, commerces..

Quartier Bottière-Chenaie	Nouvelles surfaces	Système de chauffage
Logement collectif neuf :140 000m ²	-	-
300 Maison individuelle : 20 000m ²	-	-
Médiathèque 2000 m ²	Médiathèque 2000 m ² (=)	Électrique
Enseignement scolaire 4000m ²	Enseignement scolaire 25 000m ² (+525%)	Chaudière gaz
Gymnase 1850m ²	Gymnases 20 000 m ² (+981%)	Chaudière gaz
6 commerces, 7350 m ²	200 commerces, 200 000 m ² (+2621%)	Électrique
Restaurant 300m ²	-	-
-	50 bâtiments de bureaux, 250 000 m ² au total(+)	Électrique



Comme dans le cas précédent, on examine également l'échelle infra-hebdomadaire afin d'avoir un indicateur de l'intermittence inter-horaire. La durée de fonctionnement mesurée, suivant les mêmes hypothèses que précédemment, est de 14,8 heures. Cet écart d'environ -67% par rapport au cas « mixité importante » confirme que le quartier est ici effectivement beaucoup plus intermittent, y compris à l'échelle inter-horaire.

Les résultats sont les suivants :

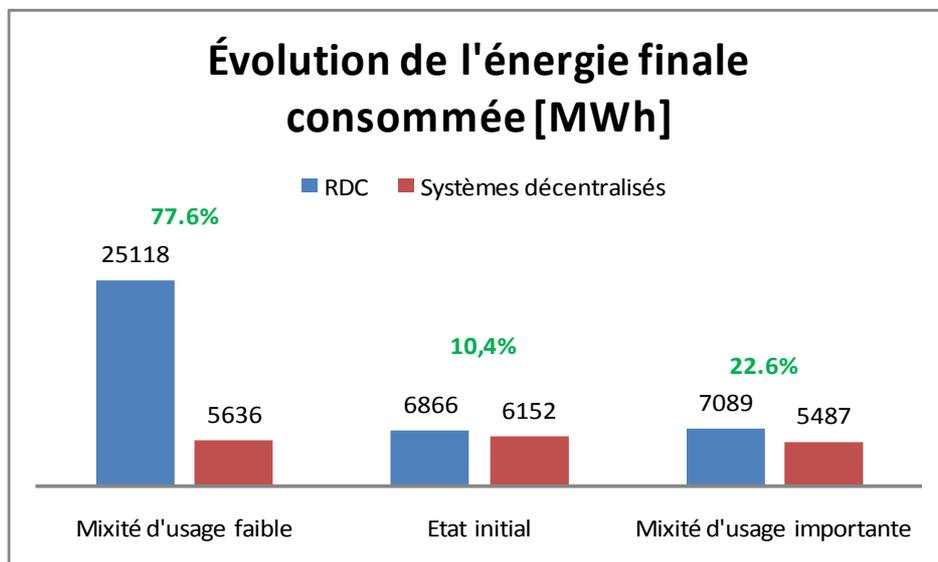
	Réseau de chaleur	Systèmes décentralisés	Écart [%]
Énergie produite par l'ensemble des chaudières [MWh]	5239	5233	-0,1
Énergie finale consommée [MWh]	25118	5636	-77,6
Énergie primaire consommée [MWh]	51442	12543	-75,6
Densité thermique [MWh/an]	1,77		
Rendement global (%)	20,9	92,9	345,2
Facteur de ressource primaire	9,82	2,47	74,8
Durée d'utilisation équivalente à pleine puissance [h]	131	142	7,9
Part d'énergie renouvelable [%]	49,6	27,4	-44,8
Tonne de CO ₂ (t)	3830	1083	-71,7
Contenu CO ₂ [kgCO ₂ /kWh]	0,152	0,192	26

3.4.3 - Comparaison et interprétations

Les histogrammes pour les paramètres les plus intéressants sont présentés ci-après (les autres graphiques sont disponibles en ANNEXES). Tout comme l'effet de densité, les résultats de l'effet de l'évolution de la mixité d'un quartier sur les performances énergétiques et environnementales d'un réseau de chaleur sont présentés pour les 3 simulations sous la forme d'histogrammes.

Afin de comparer la pertinence d'un réseau de chaleur vis à vis des systèmes décentralisés, les résultats de ceux-ci sont aussi présentés afin d'interpréter les écarts obtenus. Les écarts sont représentés par des valeurs en pourcentages (valeurs écrites en vert).

3.4.3.a - Effet de la variation de mixité sur l'énergie finale consommée



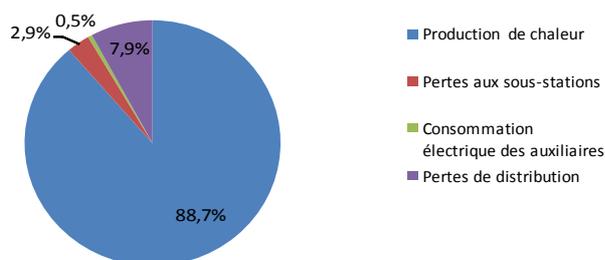
A densité thermique constante (1,77 Mwh/m.an) nous constatons que le réseau de chaleur qui alimente le quartier avec une mixité d'usage faible consomme énormément par rapport aux autres configurations de quartiers.

L'illustration 7 nous montre que les besoins maximums en chaleur sont très élevés et concentrés durant la période hivernale (aucun besoin de chaleur en été). En effet, les bâtiments de commerce et de bureaux ont des pics de besoins très importants sur des plages horaires similaires : nous nous retrouvons dans une configuration où exploiter un réseau de chaleur est difficile puisque cela implique d'installer des chaufferies avec des puissances nominales très élevées (les pics de besoins n'étant pas désynchronisés, ils s'ajoutent sur la même tranche horaire) pour un usage fortement intermittent et un puisage très réduit de la chaleur en dehors des pics de demandes.

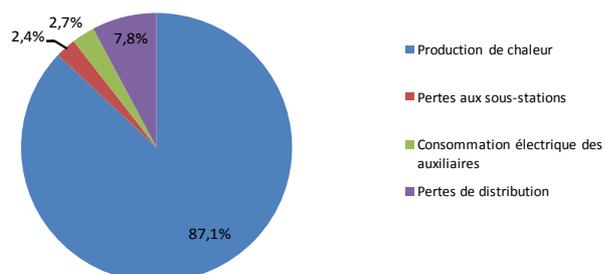
Nous remarquons aussi que le dimensionnement de la chaufferie (plusieurs MW en puissance nominale) pour répondre aux pics de besoins impacte considérablement les consommations électriques des auxiliaires de distribution : à longueur de réseau constante, les pompes doivent être fortement surdimensionnées afin de pouvoir compenser les pertes de charges dues aux forts pics auquel est soumis le réseau. Ce constat est présenté sur les diagrammes suivants.

Cependant, dans la pratique, des techniques d'optimisation peuvent être employées permettant notamment de moduler les vitesses de rotations des pompes afin de limiter leur consommation²⁵.

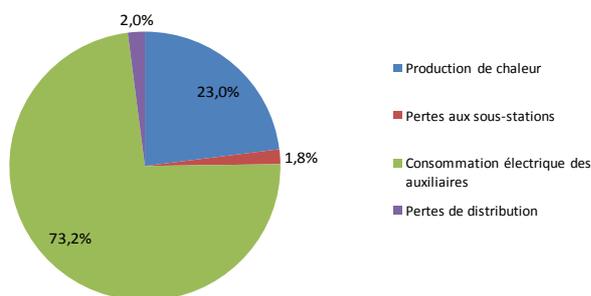
Répartition de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur_Cas initial



Répartition de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur_Mixité d'usage importante

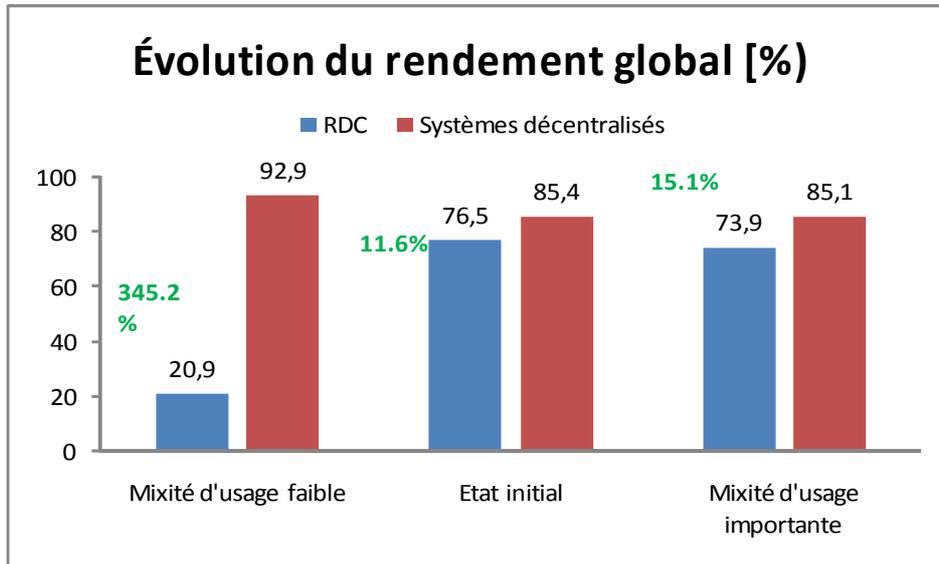


Répartition de l'énergie finale consommée par le réseau de chaleur_Mixité d'usage faible



²⁵ Lire : Le point sur « Les techniques d'optimisation des réseaux de chaleur »

3.4.3.b - Effet de la variation de mixité sur le rendement global

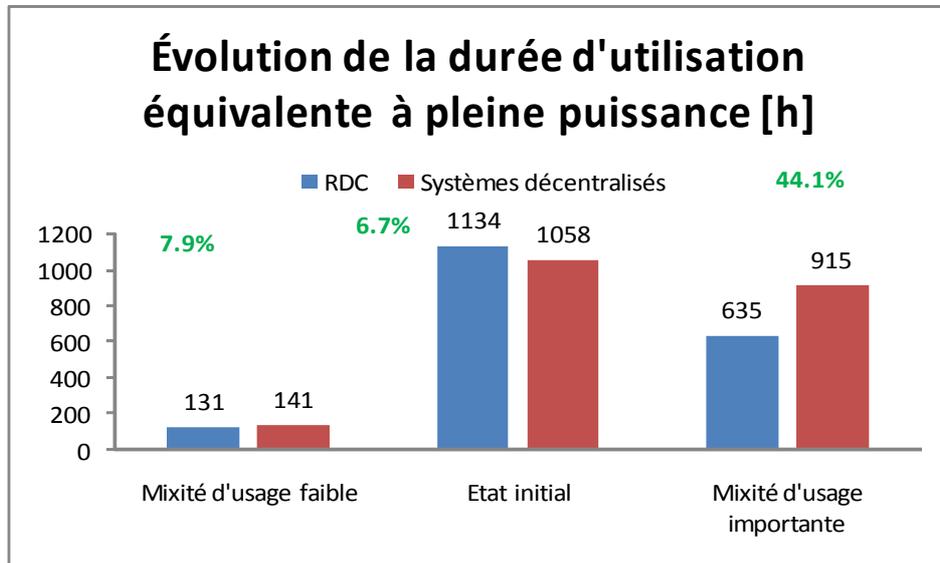


A densité thermique constante, une mixité d'usage faible dégrade fortement la performance d'un réseau de chaleur comparativement aux systèmes décentralisés (le constat est similaire l'analyse des énergies finales consommées) mais aussi qu'une mixité relativement importante d'un quartier alimenté par un réseau de chaleur n'améliore pas systématiquement la performance globale de celui-ci. Les explications sont les suivantes :

- afin d'augmenter la mixité, des logements collectifs (majoritaire dans la configuration initiale du quartier Bottière-Chenaie), ont été supprimés au profit de bâtiments de bureaux et de commerce plus intermittents;
- l'outil de simulation ne permet pas de simuler tous les profils de bâtiments existants, notamment les bâtiments faiblement intermittents et ayant des besoins de chaleur important tout au long de l'année tels que les piscines, hôpitaux ou bien les EPHAD.

Cependant **nous déduisons de l'étude, qu'une mixité d'usage faible peut selon la typologie des bâtiments nuire fortement à la performance énergétique d'un réseau de chaleur et qu'une mixité d'usage importante n'est pas forcément synonyme de performances énergétiques améliorées mais contribue à rendre le réseau de chaleur compétitif vis à vis d'un ensemble de systèmes décentralisés. Cette compétitivité sera d'autant plus renforcée que les bâtiments supplémentaires raccordés seront faiblement intermittent et ayant des besoins de chaleur élevés.**

3.4.3.c - Effet de la variation de mixité sur la durée d'utilisation équivalente à pleine puissance



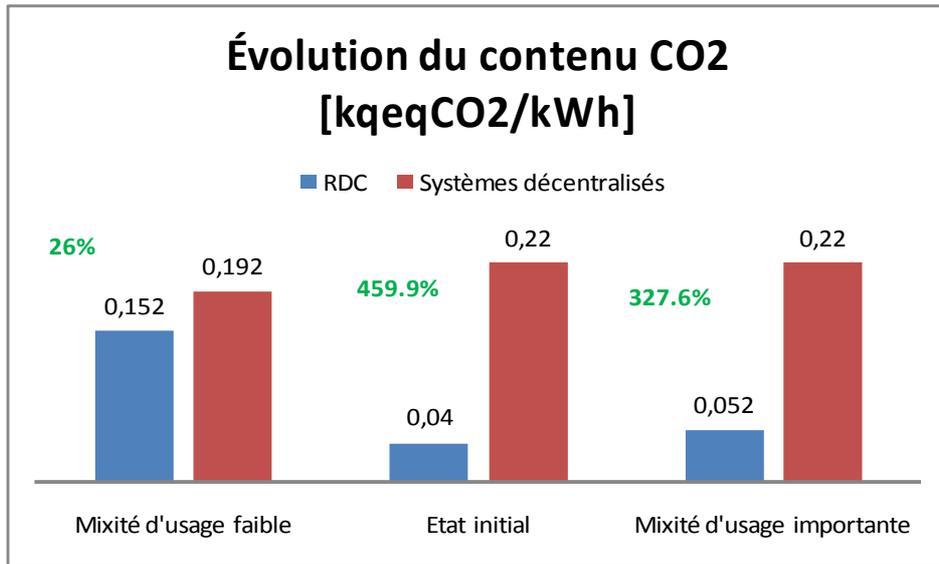
Nous avons pu constater avec les deux précédents paragraphes qu'un quartier dont la mixité d'usage est faible dégrade fortement les conditions nominales d'utilisation des chaudières du réseau. Ce constat est confirmé avec le paramètre « durée d'utilisation équivalente à pleine puissance ». Par ailleurs, ce constat se vérifie aussi pour l'ensemble des solutions décentralisées. L'explication est principalement due au surdimensionnement des systèmes de génération de chaleur lié à la présence des bâtiments de bureaux et de commerces (plus importants dans le quartier avec une mixité faible) : ceux-ci connaissent des pics de besoins importants concentrés et des besoins relativement faibles le reste du temps. Ceci conduit à des surinvestissements de puissance qui sont très pénalisant économiquement surtout pour les systèmes à énergies renouvelables (coût au Watt installé plus important).

Il est à noter, dans le cas de la mixité d'usage importante, que la moyenne pondérée de ce paramètre pour l'ensemble des systèmes décentralisés (915h) est nettement meilleure que la valeur pour le réseau de chaleur (635h). Cela tient au fait que la plupart des bâtiments qui ont vu leur surface augmenter dans le cas de la définition du quartier avec une mixité importante étaient des bâtiments de type tertiaires équipés de systèmes électriques : quelle que soit leur charge, les systèmes électriques fonctionnent toujours dans des conditions nominales. Par ailleurs lorsque l'on compare la somme des puissances maximum appelées entre le réseau de chaleur et les systèmes décentralisés nous constatons que

- mixité importante : RDC : 8252 kW; systèmes décentralisés : 10539 kW
- mixité faible : RDC : 39850 kW; systèmes décentralisés : 42551 kW

Ainsi le principe de foisonnement est vérifié : quel que soit le type de quartier, avec un réseau de chaleur il y a écrêtage des pics de besoins.

3.4.3.d - Effet de la variation de mixité sur le contenu CO₂



Concernant les quantités de CO₂ émises pour chaque simulation nous constatons que la variation de la mixité a pour effet d'augmenter dans les deux cas le contenu CO₂ du réseau de chaleur. Les explications sont les suivantes :

- Mixité d'usage faible: Les consommations électriques des pompes ont considérablement augmenté et l'appoint gaz a été fortement sollicité pour répondre aux appels de puissance lors des pics très importants. Au final, la part relative du bois vis à vis de ces deux autres énergies a diminué ce qui explique un contenu CO₂ plus élevé,
- Mixité d'usage importante : le mix énergétique a été modifié en faveur du gaz naturel. Les bâtiments rajoutés majoritairement (bureaux et commerces) ont des pics de besoins de chaleur intense nécessitant la mise en route de l'appoint gaz plus régulièrement.

Dans tous les cas, **quelle que soit la mixité retenue, le réseau de chaleur reste la solution la plus vertueuse en terme d'émission de CO₂.**

3.4.4 - Conclusion de l'effet de la mixité sur un réseau de chaleur

Nous pouvons conclure sur ces deux simulation que :

- Une mixité d'usage faible détériore fortement les performances énergétiques et environnementales d'un réseau de chaleur d'autant plus fortement que les bâtiments raccordés sont à usage de bureaux ou de commerce,
- Une mixité d'usage importante n'améliore pas systématiquement les performances du réseau de chaleur mais contribue tout de même à rendre compétitif un réseau vis à vis d'un ensemble de systèmes décentralisés,
- Quel que soit le type de configuration du quartier, un réseau de chaleur bois reste la solution la plus vertueuse en terme de GES.

3.5 - Simulation 3 : effets de l'amélioration du réseau de chaleur par diminution de la température de fonctionnement

Cette partie consiste à évaluer l'impact d'une amélioration technique du réseau de chaleur sur ses performances énergétiques et environnementales. L'amélioration étudiée concerne le **passage d'un réseau moyenne température à un réseau basse température**.

3.5.1 - Le réseau basse température

Le réseau basse température²⁶ est peu répandu en France. Aujourd'hui, on en trouve essentiellement dans les quartiers neufs (notamment écoquartiers). Il se caractérise par un régime de température de 70°C/35°C avec des tubes sur-isolés .

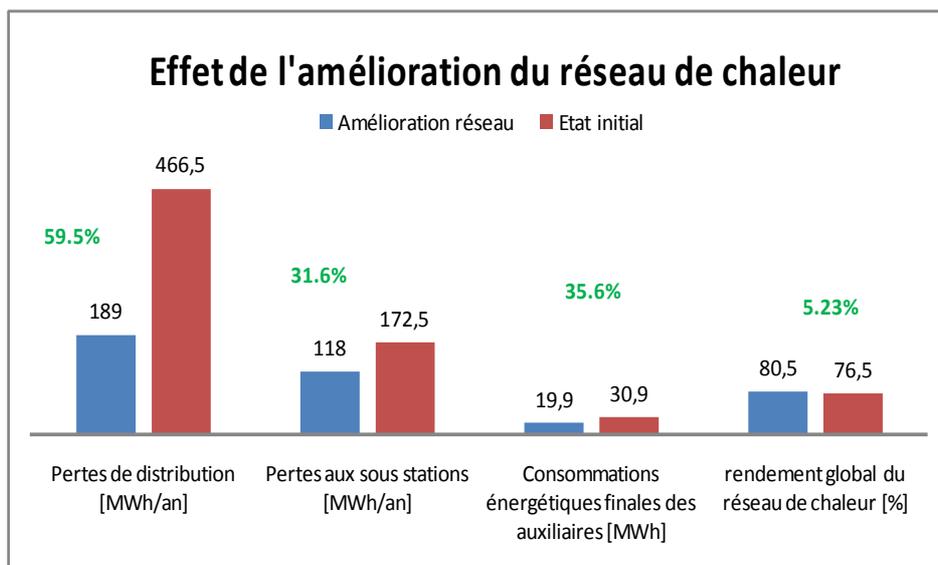
Cet abaissement de la température du fluide caloporteur a pour effet de réduire les valeurs des ratios de dissipation linéique des tubes, qui sont alors les suivants :

- 5,1 W/m pour le réseau primaire
- 2,2 W/m pour le réseau secondaire

3.5.2 - Comparaison et interprétation

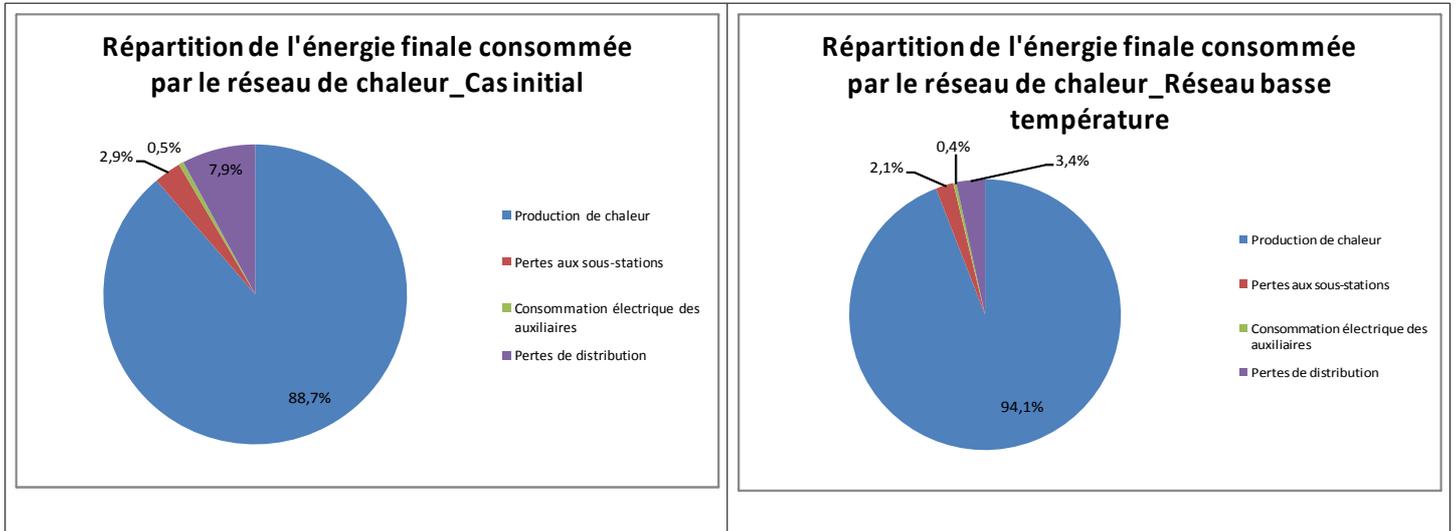
Les histogrammes suivants présentent les principaux résultats de l'effet de l'amélioration du réseau de chaleur sur ses performances énergétiques et environnementales par rapport à la solution de base (réseau moyenne température). Les écarts sont indiqués, en vert, par des pourcentages.

3.5.2.a - Effet de l'amélioration du réseau de chaleur sur ses performances énergétiques



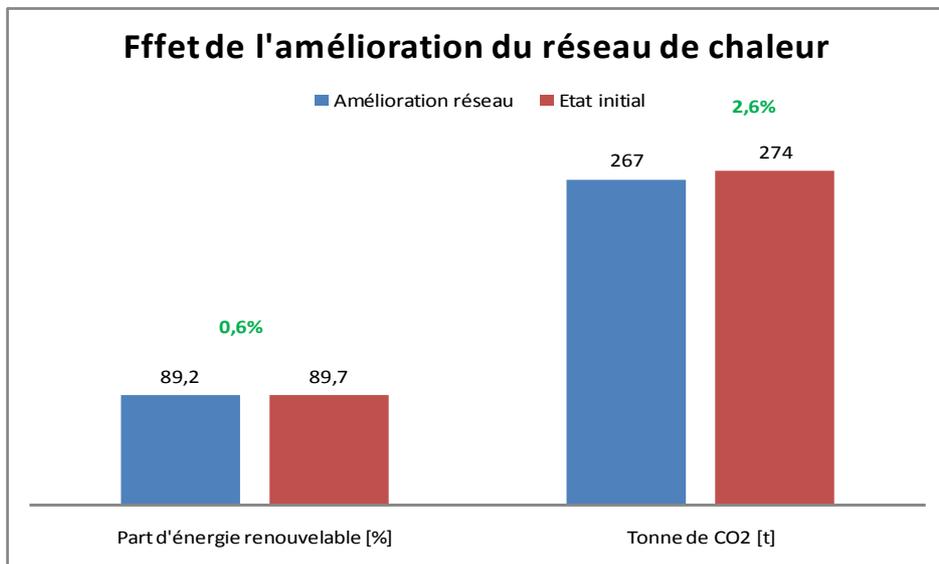
26 Pour en savoir plus : lire la fiche « Techniques d'optimisation des réseaux de chaleur » : <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/techniques-d-optimisation-des-a867.html>

Nous constatons une diminution de l'ordre de 60% des pertes de distribution, une diminution de 32% des pertes aux sous-stations et enfin une diminution de 36% des consommations électriques finales des auxiliaires de distribution.



En passant en réseau basse température, la part relative totale des consommations liées au fonctionnement du réseau diminue de 11,3% à 5,9%.

3.5.2.b - Effet de l'amélioration du réseau de chaleur sur ses performances environnementales



Un passage à un réseau basse température a un impact limité sur la quantité de CO2 émise. La diminution des émissions est due à la diminution des consommations liées au réseau. Par ailleurs, la part d'énergie renouvelable diminue au final : le contenu CO2 des pertes de distributions est celui du bois-énergie (le bois énergie étant la principale source d'énergie). Ainsi la quantité de chaleur fournie par le bois diminue alors que la quantité de chaleur issue du gaz (pour assurer l'appoint) reste constante. En relatif, il y a donc une diminution de la part bois dans la fourniture d'énergie totale et donc une diminution de la part relative d'énergie renouvelable.

3.5.3 - Conclusion sur l'effet de l'amélioration du réseau de chaleur

Nous pouvons conclure sur cette simulation que :

- la diminution du régime de température permet d'améliorer significativement la performance énergétique du réseau de chaleur : les pertes associées au fonctionnement du réseau de chaleur ainsi que les consommations auxiliaires diminuent au global de près de 6 points (soit environ 50%), augmentant le rendement global du réseau,
- l'effet sur la performance environnementale du réseau est limité : le nouveau réseau émet certes un peu moins de CO₂ que le réseau initial, mais dans de faibles proportions,
- cette technique d'optimisation permet de faire rapidement des économies et est bien adaptée à un réseau qui dessert des bâtiments neufs puisqu'ils ont des besoins de chaleur limités et ne nécessitant pas des températures de distribution élevées.

4 - Conclusion

Cette étude permet de mettre en évidence les effets de la variation de la typologie d'un quartier au travers de deux principaux paramètres - la densité thermique (quantité de chaleur livrée/superficie totale du quartier) et la mixité d'usage (représentation de bâtiments à usage différent)- sur la pertinence énergétique et environnementale du réseau de chaleur qui dessert ce quartier. Les résultats confirment les tendances d'une approche par déduction et permettent de quantifier plus précisément les effets des différents paramètres.

Les simulations des consommations des bâtiments du quartier avec un ensemble de systèmes décentralisés les plus couramment employés (chaudière gaz en pied d'immeuble, convecteur électrique) suivant l'usage des bâtiments ont été réalisées afin de les comparer aux réseaux de chaleur. De ces simulations, il peut être retenu que :

- les performances en énergie finale des systèmes décentralisés sont dans chaque simulation supérieures aux performances du réseau de chaleur. Cependant cet écart reste limité (11%) et tend à se réduire au profit du réseau de chaleur quand la densité et la mixité augmentent ;
- en énergie primaire, le réseau de chaleur est le moins consommateur ; l'écart se creuse lorsque le quartier devient « plus favorable », c'est-à-dire plus dense et plus mixte ;
- les performances environnementales du réseau de chaleur sont dans chaque simulation nettement supérieures à celles de l'ensemble des systèmes décentralisés en raison du type d'énergies mobilisables par le réseau qui ne peuvent pas l'être massivement via des systèmes individuels en zone urbaine ;
- à variation équivalente, une diminution de la densité a des effets plus néfastes sur la performance énergétique d'un réseau de chaleur que l'augmentation a d'effets positifs ;
- une mixité d'usage élevée avec des bâtiments à faible intermittence (cas initial) permet d'augmenter la durée de fonctionnement à puissance nominale équivalente dans le cas d'un réseau de chaleur vis à vis des systèmes décentralisés. Cette notion est très importante car les coûts des systèmes de chauffage varient fortement avec la puissance installée²⁷ ;
- une mixité d'usage faible peut nuire fortement aux performances énergétiques d'un réseau de chaleur surtout quand les bâtiments raccordés sont des bâtiments de bureaux ou des commerces (intermittence forte) ;
- une diminution du régime de température d'un réseau de chaleur est une technique d'optimisation pertinente puisqu'elle permet de diminuer significativement les pertes liées au fonctionnement d'un réseau et les consommations de ses auxiliaires. De plus cette solution est bien adaptée à des quartiers neufs car les bâtiments construits n'ont pas besoin de température élevées pour le chauffage ou la production d'ECS.

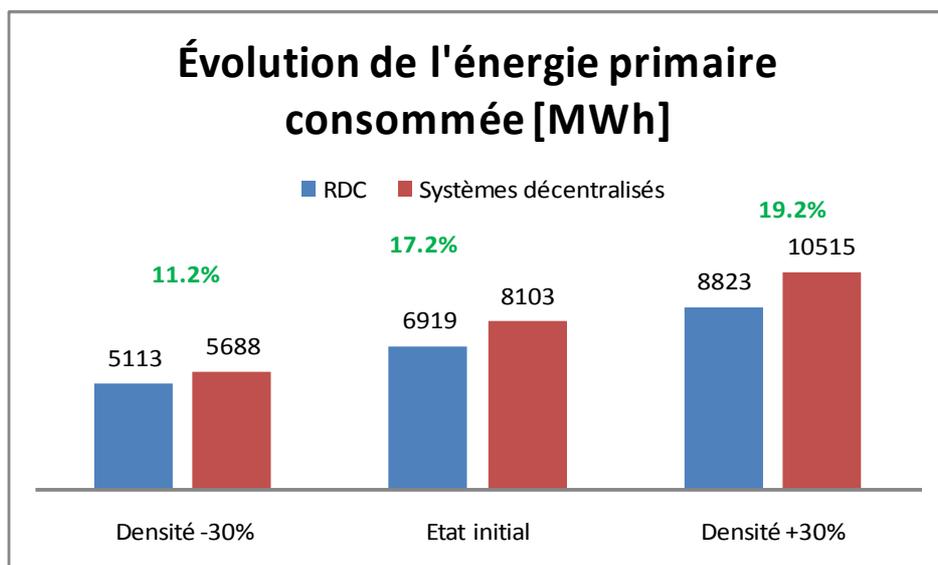
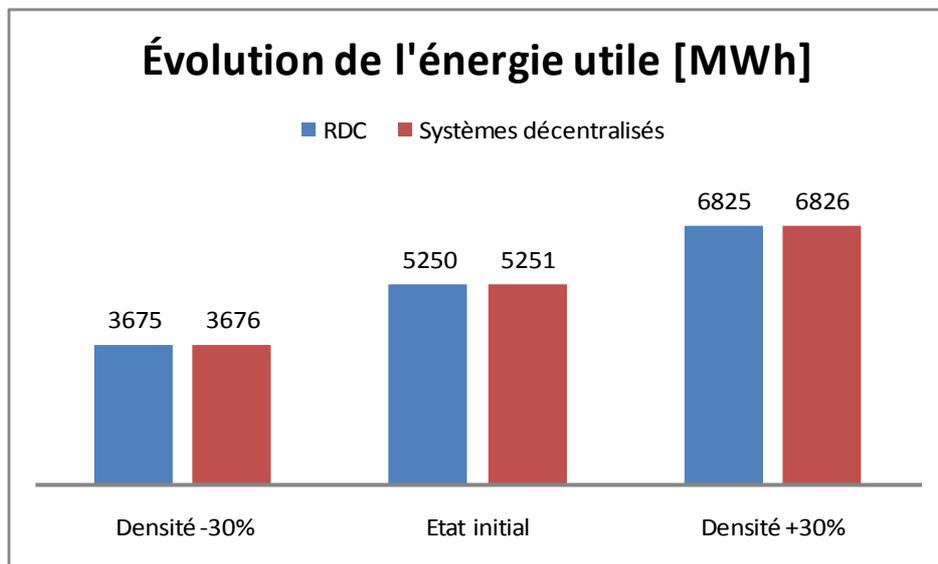
L'étude se limite cependant à l'analyse de paramètres énergétiques et environnementaux. Une analyse économique globale sur le long termes permettrait de comparer plus finement les coûts relatifs à l'investissement et au fonctionnement d'un réseau de chaleur et de ceux des systèmes décentralisés. Il serait également intéressant d'analyser l'impact de l'effet de

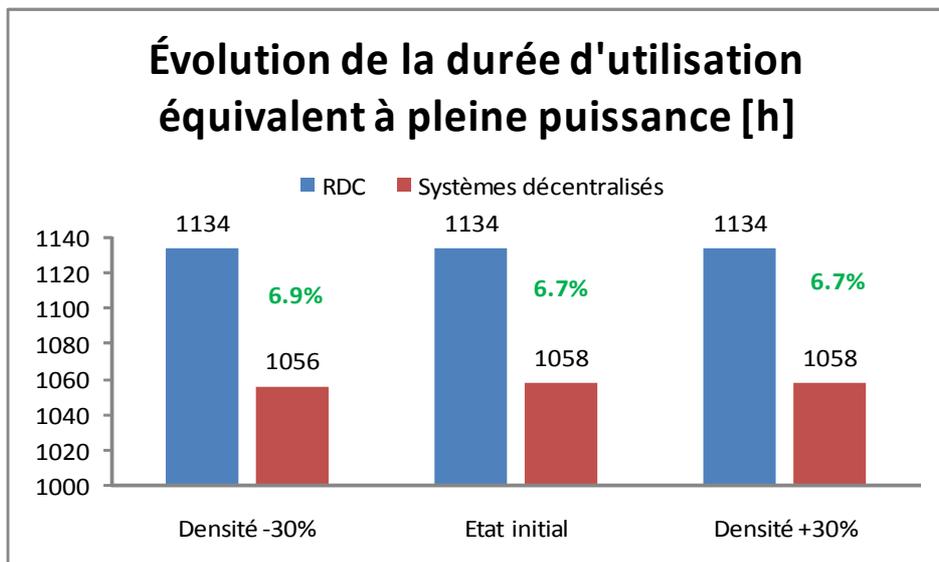
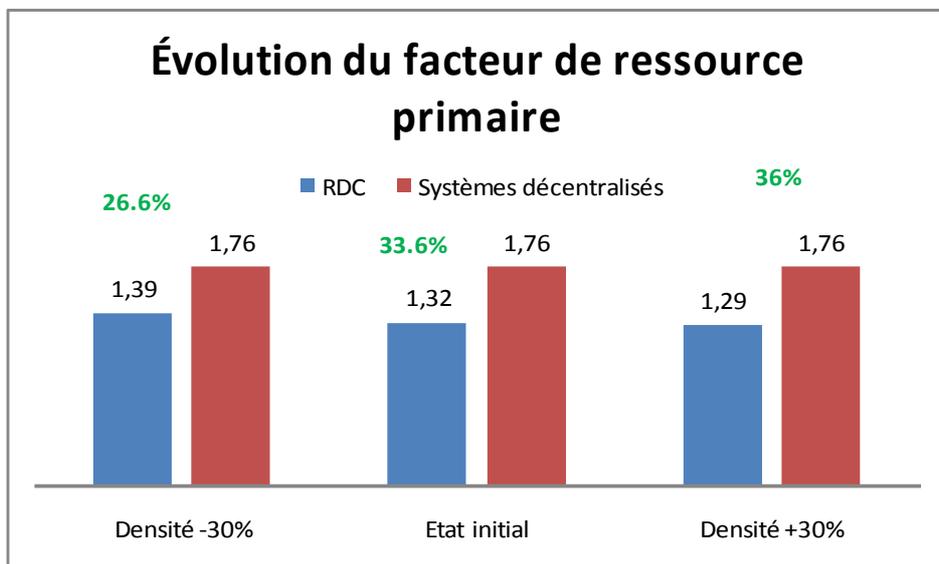
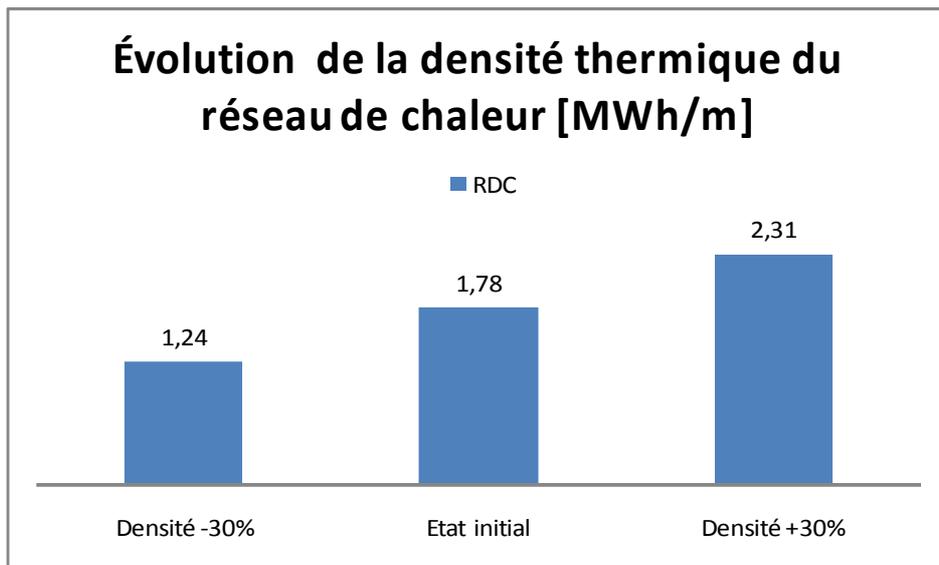
²⁷ En ordre de grandeur très simpliste, on peut considérer que chaque mégawatt supplémentaire de puissance bois installée représente un surcoût d'investissement d'un million d'euros (tout compris : chaufferie et réseau). Pour en savoir plus, voir l'article « Ordres de grandeur des coûts des réseaux de chaleur » :

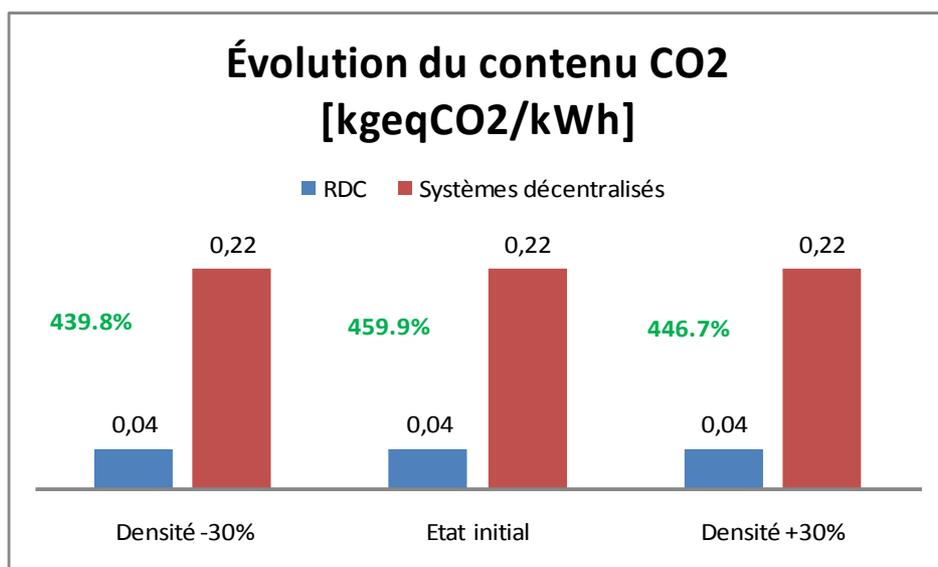
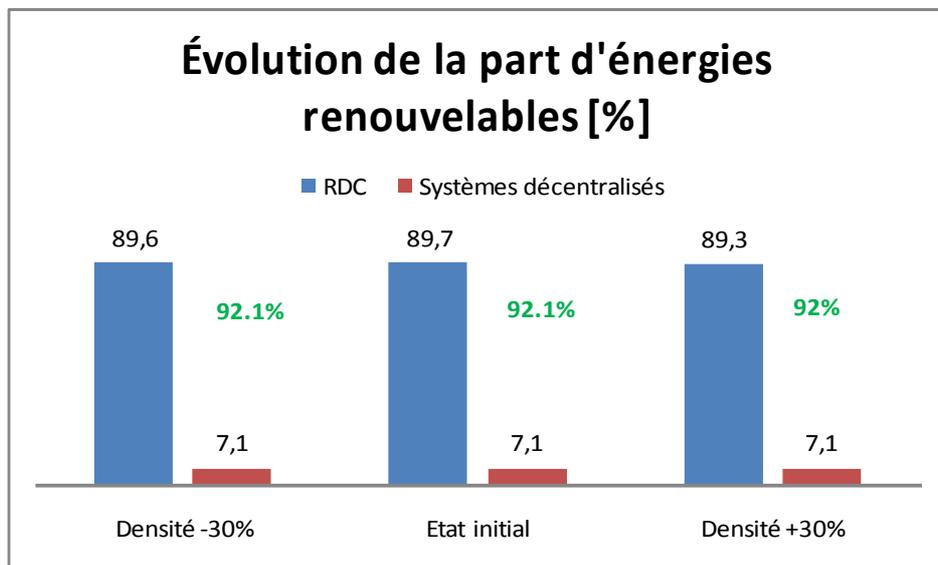
foisonnement (écrêtement des pics de besoins de chaleur, entre autre) sur les coûts d'investissement.

5 - ANNEXES

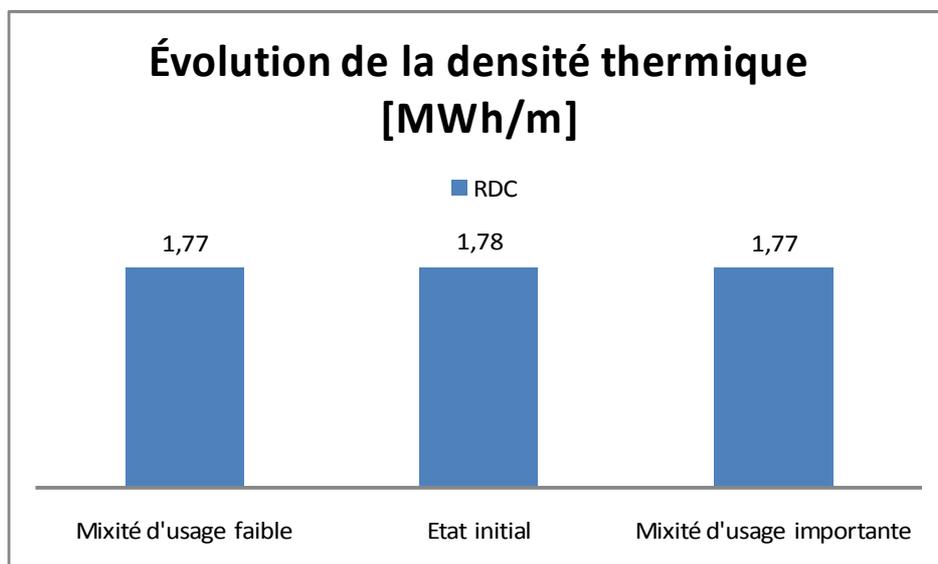
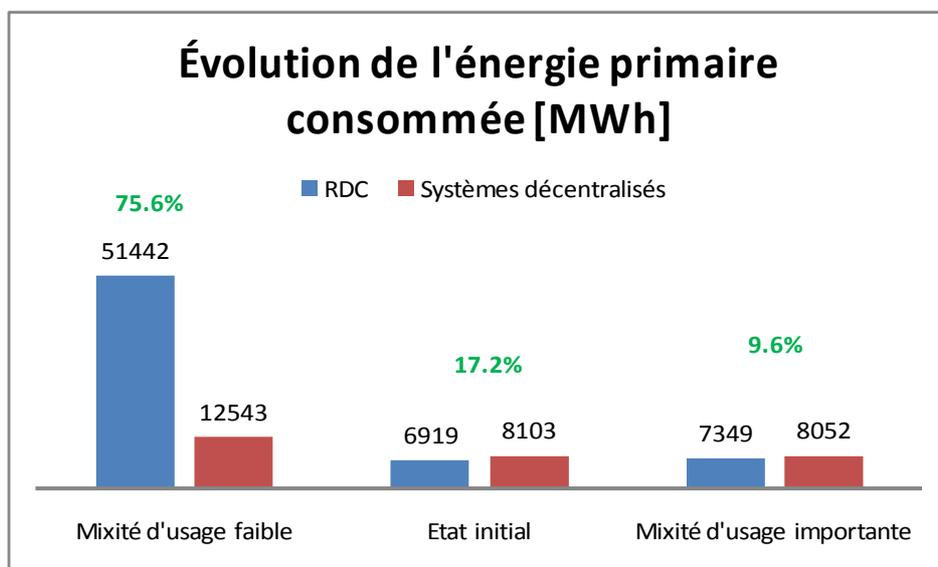
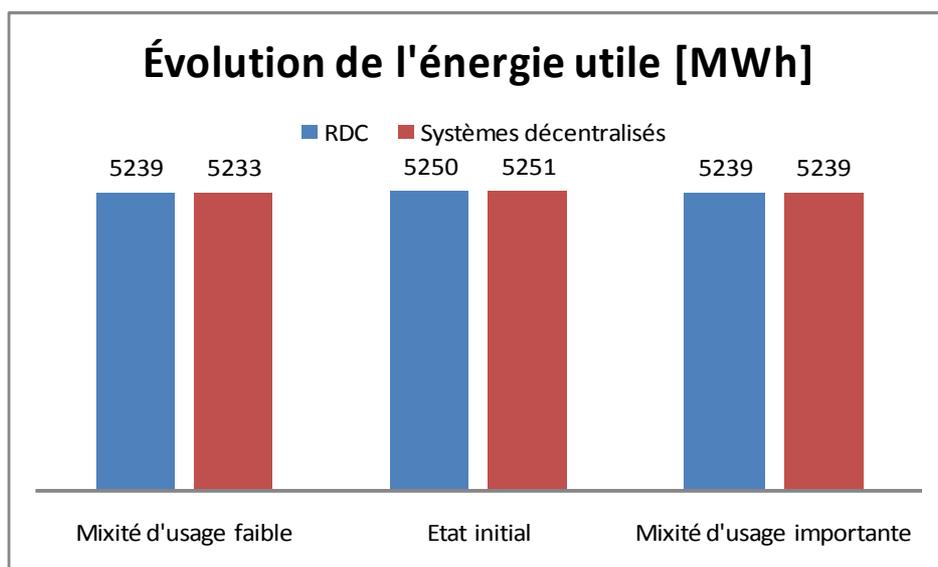
Annexe 1 : Effet de la variation de densité

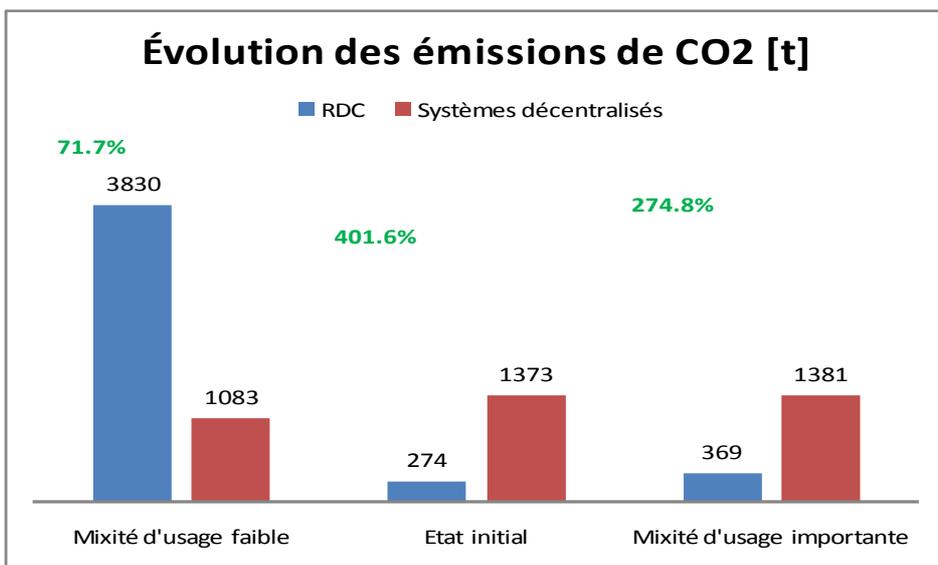
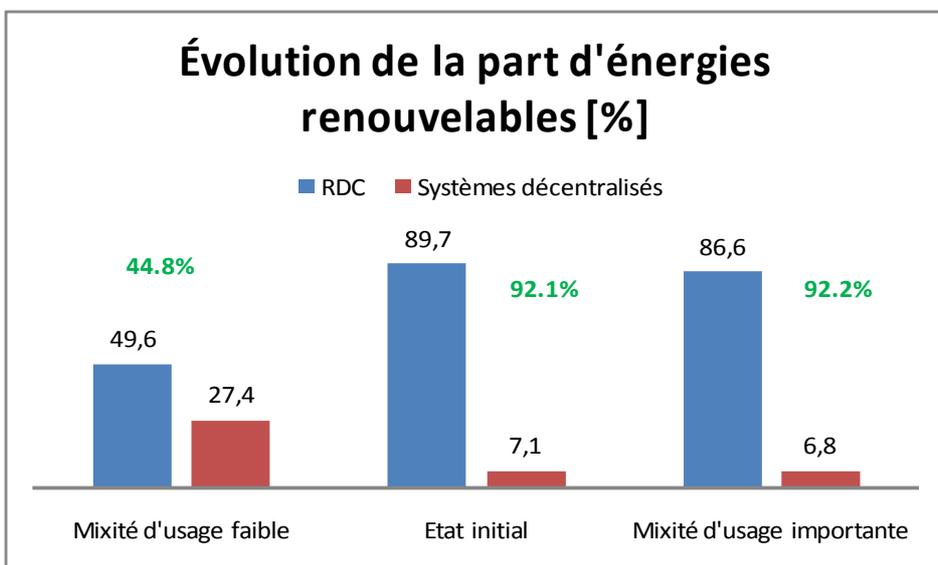
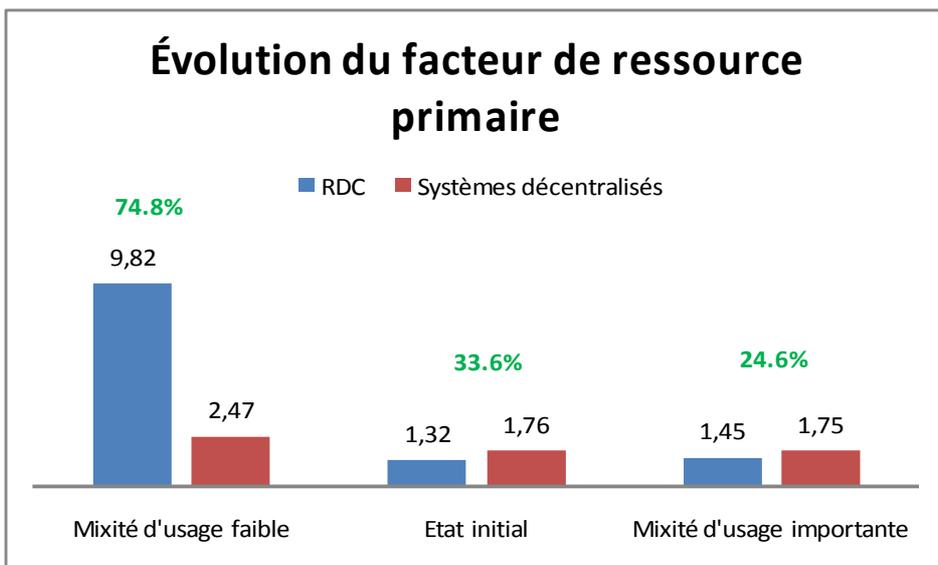




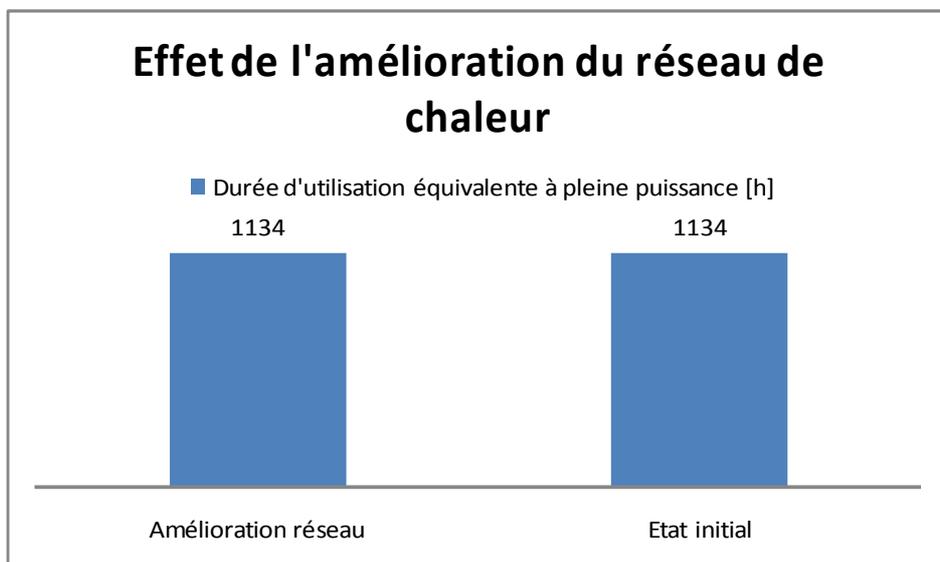
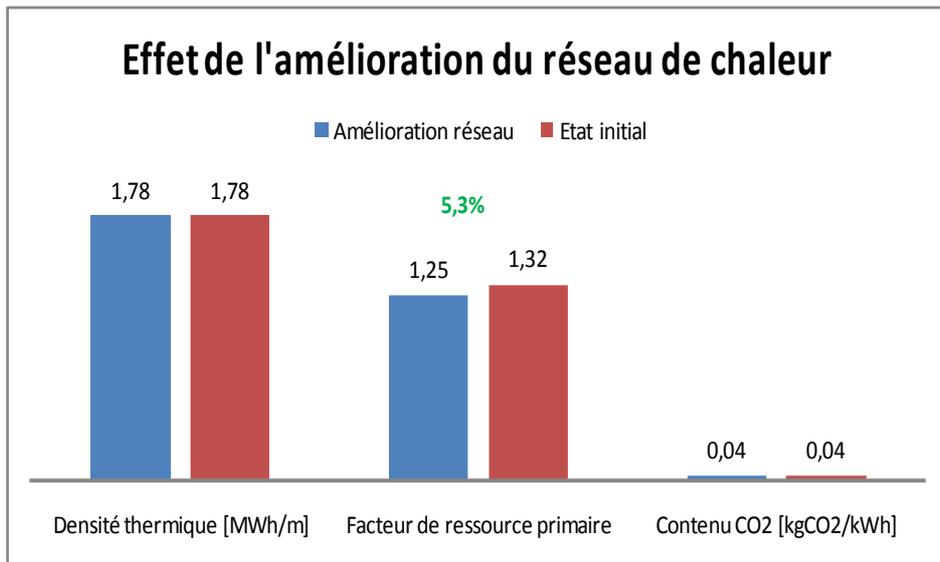
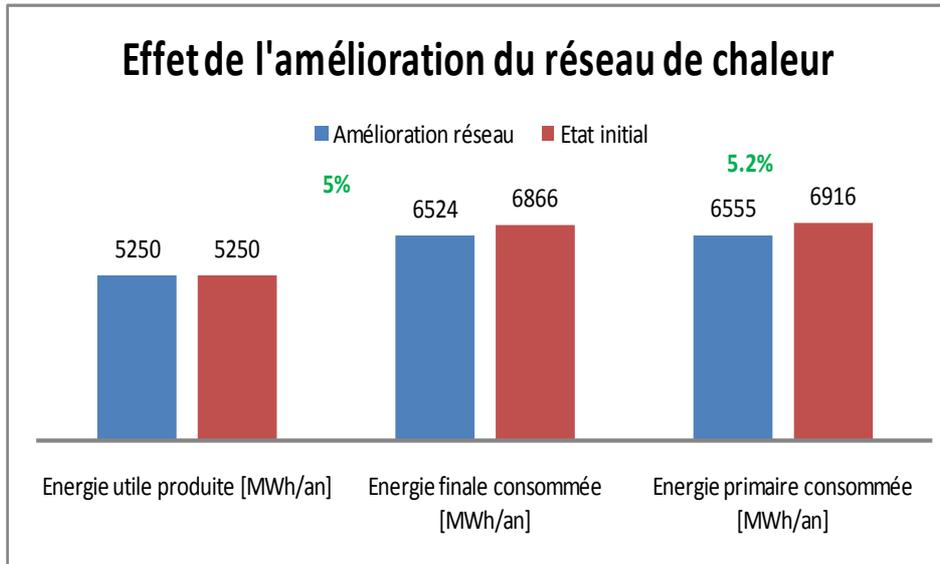


Annexe 2 : effet de la variation de la mixité





Annexe 3 : effet de l'amélioration du réseau de chaleur



Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest

MAN – rue René Viviani

BP 46223

44262 NANTES cedex 2

Tél. : 02 40 12 83 01

Fax : 02 40 12 84 44

CETE-Ouest@developpement-durable.gouv.fr

www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr

Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest

MAN – rue René Viviani

BP 46223

44262 NANTES cedex 2

Tél. : 02 40 12 83 01

Fax : 02 40 12 84 44

CETE-Ouest@developpement-durable.gouv.fr

www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr