CEREMA Ouest

Les réseaux de chaleur dans les écoquartiers

Approche de la pertinence technique et économique

Source : www.monsaclay.fr

Rédigé par :

Mathias BERRY – octobre 2017

Résumé

Du premier appel à projet de 2009 à la dernière vague de projets labélisés en 2016, la démarche ÉcoQuartier prend de l'ampleur avec aujourd'hui près de 51 projets labélisés et 106 engagés dans la labélisation.

Ce label comprend une charte de 20 engagements relatifs à la démarche, au cadre de vie et usagers, au développement territorial ainsi qu'à l'environnement et climat. Parmi cette dernière thématique, l'engagement 17 vise la sobriété énergétique et la diversification des sources au profit des énergies renouvelables et de récupération.

Les réseaux de chaleur, par leur aisance à mettre en œuvre de grandes quantités d'énergies renouvelables, sont une opportunité pour maximiser l'engagement 17 notamment. Toutefois, certains projets de réseaux de chaleur n'ont pu aboutir dans certains écoquartiers, interrogeant alors la pertinence technique et économique de cette solution.

L'étude cherche à répondre à cette problématique en dissociant l'analyse des réseaux de chaleur créés ex-nihilo dans un écoquartier, de l'analyse des réseaux étendus à un écoquartier ou préexistant sur l'écoquartier. Enfin, des retours d'expériences de collectivités interviewées viennent compléter l'approche scientifique.

Il ressort de ces analyses 4 enseignements principaux :

- Les valeurs actuelles nettes (VAN) des projets étudiés varient sensiblement selon les cas mais sont néanmoins positives. Les taux de rentabilité interne (TRI) sont également encourageant, étant tous supérieurs au taux d'actualisation retenu et les taux d'enrichissement en capital supérieurs à 10%. D'un point de vue économique, ces projets de réseaux de chaleur au sein d'écoquartiers semblent pertinents.
- Le coût actualisé de l'énergie pour l'exploitant des réseaux considérés est légèrement plus élevé que celui des installations de production de chaleur issu du benchmark réalisé par le World Energy Council (WEC). Il en va de même pour le prix moyen de vente de la chaleur de ces réseaux qui surplombe la moyenne française. Toutefois, ces résultats ne sont pas anormaux au regard de la quantité d'énergie livrée, plus faible que la moyenne des installations française.
- La durée d'utilisation équivalente à pleine puissance est plus faible que la moyenne des réseaux français, ce qui traduit un surdimensionnement global du système de production de chaleur.
- La densité thermique des réseaux de chaleur de l'échantillon est supérieure au seuil critique des 1.5MWh/ml mais toutefois très inférieure à la moyenne des réseaux en France. De plus, cette densité ne semble pas directement liée à la densité de logements des écoquartiers ni même à la mixité d'usages de ses bâtiments.

Enfin, les retours d'expériences des collectivités ont mis en avant des difficultés de phasage des opérations de construction avec la mise en service des réseaux, de délégataire proposant des solutions innovantes non éprouvées et de communication entre les différents acteurs. Toutefois, d'autres exemples de collectivités ont montré qu'il était possible, en associant très en amont les parties prenantes, de parvenir à surmonter ces difficultés.

Table des matières

1. Les écoquartiers 1
1.1. Présentation et définition générale 1
1.2. Présentation des bases de données 2
2. Les réseaux de chaleur 3
2.1. Présentation et définition 3
2.2. Modèle économique des réseaux de chaleur 4
2.3. Enjeux 5
2.4. Pourquoi un réseau de chaleur dans un écoquartier ? 6
3. Présentation des réseaux étudiés 8
3.1. Les réseaux créés ex-nihilo 8
3.1.1. Contexte de ces réseaux de chaleur 8
3.1.2. Caractéristiques techniques 9
3.1.3. Acceptabilité des projets et modèles économiques 10
3.2. Les réseaux étendus à des écoquartiers ou existants 10
3.2.1. Contexte de ces réseaux de chaleur 10
3.2.2. Caractéristiques techniques 11
3.2.3. Acceptabilité des projets et modèles économiques 12
3.3. Les difficultés rencontrées lors de l'étude 12
4. Analyses des réseaux de chaleur présentés 14
4.1. Présentation de la méthodologie de l'analyse des données 14
4.1.1. Indicateurs économiques 14
4.1.2. Indicateurs techniques 17
4.2. Analyse des réseaux créés ex-nihilo 19
4.2.1. Présentation et interprétation des indicateurs économiques 19
4.2.2. Présentation et interprétation des indicateurs techniques 24
4.3. Analyse du réseau étendu ou pré-existant 28
4.3.1. Présentation et interprétation des indicateurs économiques 28
4.3.2. Présentation et interprétation des indicateurs techniques 31
4.4. Synthèse des analyses portées sur les réseaux de chaleur créés ex-nihilo et étendus ou existants ? 34
5. Retours d'expériences 36
5.1. La puissance souscrite par les bâtiments 36
5.2. La production de froid associée 37

5.3. L'innovation dans la production de chaleur....37
5.4. Les retards de livraison des bâtiments....38
5.5. La communication et l'information autour des réseaux de chaleur....38
5.6. Les contrats et aspects financiers....39
6. Conclusion....40
Bibliographie....42

1. Les écoquartiers

1.1. Présentation et définition générale

Le label ÉcoQuartier[1], porté par le Ministère de la cohésion des territoires (MCT), vise à favoriser l'émergence d'une nouvelle façon de concevoir, de construire et de gérer la ville durablement. Il concerne tous les types de projets qu'ils soient neufs ou de renouvellement, en agglomération ou en milieu rural.

Un écoquartier est tout d'abord un projet d'aménagement intégrant les enjeux de développement durable d'un territoire, d'une ville, d'un quartier. Il s'attache à garantir la participation du plus grand nombre d'acteurs et mobilise ainsi des citoyens jusqu'aux élus, afin de garantir la qualité et la durabilité du projet. Il veille également à offrir aux habitants et usagers de l'espace public ou privé un cadre de vie sain et sûr favorisant le lien social. Un autre objectif visé pour l'écoquartier est le dynamisme économique de ce dernier en cherchant la mixité fonctionnelle et sociale des bâtiments et espaces. Enfin, un écoquartier se veut exemplaire en termes de sobriété énergétique en développant des alternatives aux véhicules particuliers, ainsi qu'en diminuant toutes les sources de consommations d'énergie. Cette sobriété énergétique est renforcée par le recours maximal aux énergies renouvelables et de récupération, participant ainsi à la transition énergétique du territoire.

Un écoquartier vise donc à faire émerger de nouveaux modes de vie fondés sur la prise en compte des ressources locales et sur l'adaptation au changement climatique. Ce n'est pas une norme (il n'existe pas de modèle unique) mais une démarche, dont la qualité repose sur un socle d'engagements garantissant l'intégration des problématiques de développement durable. Il convient de considérer ce label comme un outil permettant de contextualiser et de s'adapter à tout type de territoire.

Afin de promouvoir ces principes, l'État a lancé en 2008 la démarche ÉcoQuartier, concrétisée en décembre 2012 par la création du label national ÉcoQuartier. Le label ÉcoQuartier repose sur 20 engagements rassemblés dans la Charte ÉcoQuartier. Ces 20 engagements sont regroupés en 4 catégories (CEREMA 2016):

- Démarche et processus : faire du projet autrement
- Cadre de vie et usages : améliorer le quotidien
- Développement territorial : dynamiser le territoire
- Environnement et climat : préserver les ressources et s'adapter aux changements climatiques

1 Présentation de la démarche écoquartier, site du Ministère, consulté en avril 2017

Le label ÉcoQuartier incite à l'amélioration continue. En effet, quatre étapes sont nécessaires avant l'obtention dudit label et permettent un suivi temporel du projet afin de le faire évoluer en accord avec les engagements initiaux. Les quatre étapes de la démarche sont définies sur le site du Ministère de la cohésion des territoires (MCT 2016).

1.2. Présentation des bases de données

Cette étude se base sur les données issues de la librairie des opérations d'aménagement (LOAD)[2] servant de support à la démarche ÉcoQuartier (du dépôt du dossier de candidature à l'expertise, jusqu'à la labellisation) ainsi que sur les données récoltées lors d'entretiens auprès des collectivités concernées.

Les cas étudiés dans ce rapport ont été sélectionnés parmi les 154 écoquartiers référencés dans la base de donnée LOAD comme « labellisés » ou « engagés labellisés ». Les critères de sélection retenus sont :

- Présence d'un réseau de chaleur comme source de chaleur pour l'écoquartier
- Taille de l'écoquartier
- Type de réseau de chaleur (neuf, existant, étendu)
- Bouquet énergétique du réseau de chaleur (biomasse, géothermie, gaz, etc..)

L'objectif était d'obtenir un panel d'écoquartiers varié afin que les retours d'expériences sur la mise œuvre de réseaux de chaleur soient représentatifs des problématiques rencontrées par les collectivités.

Les cas sélectionnés sont au nombre de quatorze. Pour chaque écoquartier sélectionné, les collectivités compétentes en matière de réseaux de chaleur ont été contactées, parfois avec la participation d'aménageurs ou d'exploitants. Les données n'étant pas homogènes dans leur niveau de détail, c'est au final huit cas qui seront exploités sans remettre en cause la diversité d'écoquartiers souhaitée. Parmi ces huit cas, cinq feront l'objet d'une analyse plus approfondie.

2 Base de données LOAD, administrée par le CEREMA jusqu'au 01/02/2017, consultée en février 2017

2. Les réseaux de chaleur

2.1. Présentation et définition

Un réseau de chaleur est un système de distribution de chaleur produite de façon centralisée, permettant de desservir plusieurs usagers. Il comprend une ou plusieurs unités de production de chaleur, un réseau de distribution primaire dans lequel la chaleur est transportée par un fluide caloporteur, et un ensemble de sous-stations d'échange, à partir desquelles les bâtiments sont desservis par un réseau de distribution secondaire, comme le montre la figure 1.

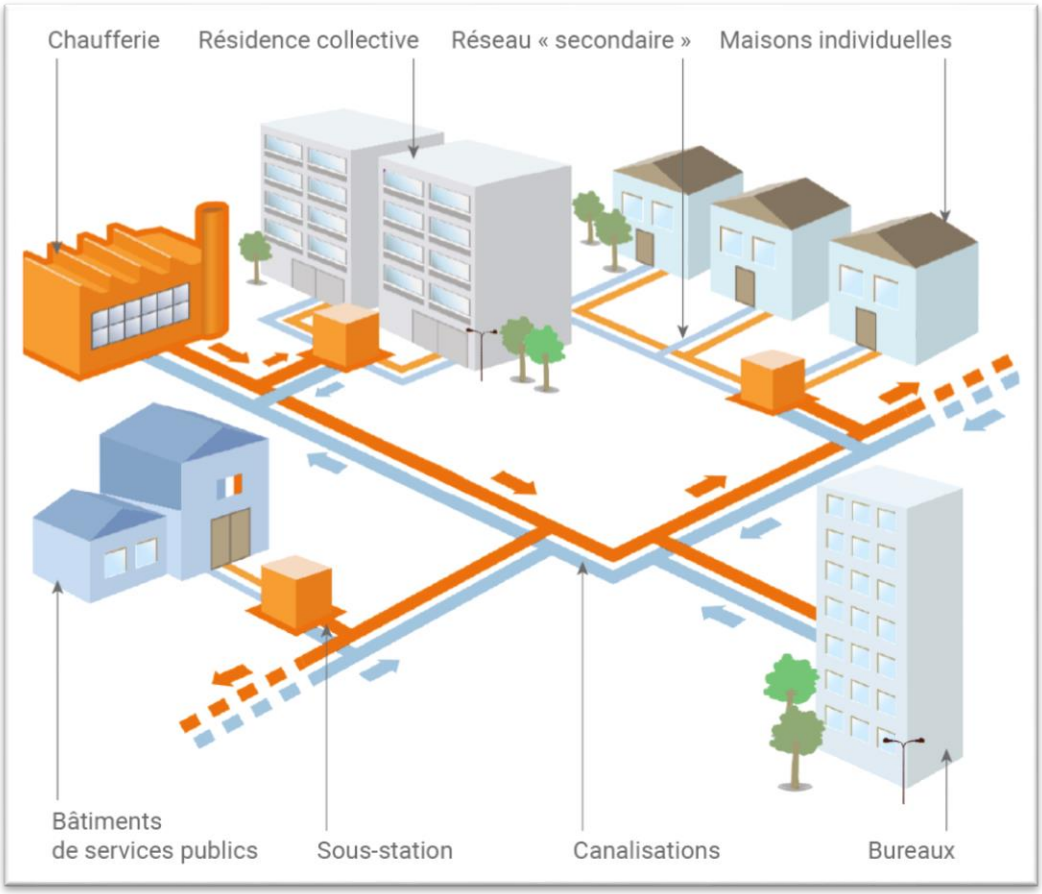


Figure 1: Présentation d'un réseau de chaleur (Source : Cerema)

Tout réseau de chaleur comporte les principaux éléments suivants [3]:

- **L'unité de production** de chaleur qui peut être, par exemple, une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM), une chaufferie alimentée par un combustible (fioul, gaz, bois…), une centrale de géothermie profonde, etc. Généralement un réseau comporte une unité principale qui fonctionne en continu et une unité d'appoint utilisée en renfort pendant les heures de pointe, ou en remplacement lorsque cela est nécessaire.
- **Le réseau de distribution primaire** composé de canalisations dans lesquelles la chaleur est transportée par un fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude). Un circuit aller (en rouge sur le schéma) transporte le fluide chaud issu de l'unité de production. Un circuit retour (bleu) ramène le fluide, qui s'est délesté de ses calories au niveau de la sous-station d'échange. Le fluide est alors à nouveau chauffé par la chaufferie centrale, puis renvoyé dans le circuit. La conception du réseau vise à assurer une densité thermique (nombre de bâtiments raccordés par kilomètre de conduite posée) aussi élevée que possible, afin de permettre la viabilité économique du réseau (coût d'investissement fortement lié au linéaire de conduite ; recettes liées au nombre d'usagers).
- **Les sous-stations d'échange**, situées en pied d'immeuble, 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. Le réseau secondaire ne fait pas partie du réseau de chaleur au sens juridique, car il n'est pas géré par le responsable du réseau de chaleur mais par le responsable de l'immeuble.

2.2. Modèle économique des réseaux de chaleur

La fourniture de chaleur par des réseaux fait l'objet d'une facturation binomiale[4] constituée d'un terme R1 basé sur le prix de l'énergie consommée (part variable) et d'un terme R2 basé sur la puissance souscrite auprès du réseau (part fixe), tous deux détaillés dans la partie 4.1.1. À cela s'ajoute généralement des frais de raccordement, payés par les abonnés, afin de couvrir les coûts des travaux de raccordement entre les sous-stations et les bâtiments, appelé réseau secondaire.

Ces différentes recettes au profit des exploitants servent à couvrir de nombreuses charges et investissements durant la durée de vie des réseaux de chaleur. Le premier poste de dépense concerne l'achat et la pose des tuyaux constituant le réseau primaire de distribution. Le second concerne la construction des chaufferies comprenant les différentes chaudières, puis les sous-stations, ainsi que les différentes études d'opportunité et de faisabilité.

[3] Pour plus de détails : http://reseaux-chaleur.cerema.fr/constitution-dun-reseau-de-chaleur

[4] Pour plus de détails : http://reseaux-chaleur.cerema.fr/prix-de-la-chaleur-et-facturation

Dans un projet de réseau de chaleur, comme pour tout projet énergétique, la première phase consiste à réaliser différentes études afin de déterminer la solution technico-économique la plus avantageuse. Dans un deuxième temps vient la construction d'une partie du réseau et de la première chaudière et sous-stations, afin de permettre le raccordement des premiers bâtiments. Ces différentes étapes et travaux représentent la majeure partie de l'investissement nécessaire à la construction du réseau de chaleur final. C'est à ce moment que l'équilibre financier est le plus délicat car de lourds investissements ont été réalisés pour quelques bâtiments raccordés et donc de faibles recettes. Des retards de livraison de bâtiments durant cette période sont particulièrement néfastes au bon développement du réseau car ils retardent la perception de recettes.

Enfin, le réseau peut s'étendre au fil des raccordements de bâtiments et de la mise en service de nouvelles chaudières/chaufferies, si nécessaire, permettant d'atteindre une situation financière plus stable.

2.3. Enjeux

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte définit des objectifs ambitieux pour le développement des énergies renouvelables : augmenter la part des énergies renouvelables, qui était de près de 15% en 2014, à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % de cette consommation en 2030. **A l'horizon 2030, les énergies renouvelables devront représenter 38 % de la consommation finale de chaleur**. Pour 2023, cette augmentation de la part des renouvelables dans la production de chaleur représente 51 % par rapport à 2014. Le développement des réseaux de chaleur participe à l'atteinte de ces objectifs. En effet, l'un des principaux moyens de mobiliser massivement d'importants gisements d'énergies renouvelables tels que la biomasse, la géothermie profonde, ainsi que les énergies de récupération issues du traitement des déchets ou de l'industrie, est le recours aux réseaux de chaleur.

Le premier secteur de consommation d'énergie finale en France en 2015 est le résidentiel-tertiaire, qui représente 45 % de la consommation finale, soit environ 65 Mtep d'après les données issues du bilan énergétique de la France 2015 du SOeS (GUGGEMOS 2017). Environ 60 % de cette énergie est utilisée pour des besoins de chauffage et refroidissement, soit 39 Mtep. Enfin, ce secteur représente 15,8 % des émissions de gaz à effet de serre en France en 2014. Le résidentiel-tertiaire représente donc un potentiel important pour le développement des réseaux de chaleur au regard des 1,9Mtep livrés en 2015 (SNCU 2015).

Pour atteindre l'objectif du « facteur 4 » inscrit dans la LTECV, la réduction des besoins de chaleur dans les bâtiments est inévitable et passe par le niveau « bâtiment basse consommation » dans toutes les constructions neuves depuis 2013 et par la rénovation thermique de 300 000 logements par an à compter de 2014 et 500 000 à compter de 2017 (objectifs du plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH)).

Le catalogue « Climat, Air et Energie » 2015 de l'ADEME fait état du parc résidentiel français. 54 % des 28 millions de logements en France en 2013 ont été construits avant 1975, date de la première réglementation thermique. Cela représente donc 15,12 millions de logements à rénover en priorité. Or, l'objectif de 500 000 logements rénovés par an à compter de 2017[5], affiché par le Ministère de la cohésion des territoires, n'a par le passé jamais été atteint. Il faut donc trouver des solutions pour satisfaire les besoins énergétiques des bâtiments anciens non rénovés, tout en réduisant leur empreinte carbone.

La généralisation des systèmes décentralisés (un par logement ou par immeuble) de production de chaleur renouvelable (géothermie superficielle, chaudière bois, chauffe-eau solaire, pompe à chaleur…) est une solution intéressante dans le secteur résidentiel pavillonnaire. Mais ces dispositifs deviennent plus difficiles à mettre en œuvre dans le collectif (où réside 44% de la population (donnée INSEE 1er janvier 2016)) ou le tertiaire en zone dense, car ils sont consommateurs de surface au sol ou sur les bâtiments (géothermie, solaire, pompes à chaleur) ou nécessitent des espaces de stockage du combustible (bois) importants.

Le réseau de chaleur permet de « centraliser » ces besoins pour mieux les traiter, de mutualiser les coûts d'investissement et finalement d'accéder à des gisements d'énergies qui ne pourraient pas être exploités par des systèmes individuels.

2.4. Pourquoi un réseau de chaleur dans un écoquartier ?

Dans les écoquartiers, la question de la production de chaleur par un réseau est controversée. Certaines études préalables démontrent que cette solution n'est pas économiquement intéressante alors que d'autres plébiscitent un tel aménagement.

Dans le premier cas, l'argument développé porte sur la consommation moindre des bâtiments neufs ou rénovés : il serait plus difficile d'amortir l'investissement qu'un réseau de chaleur représente.

Dans le second cas, l'argument mis en avant est le développement de la part d'énergies renouvelables. K.Beddiar précise dans son ouvrage solutions énergétiques dans les écoquartiers, 2015 *« l'intérêt de recourir à un réseau de chaleur est de mutualiser les investissements, de réaliser des économies d'échelle et d'utiliser les ressources locales. ».*

Le douzième engagement de la charte ÉcoQuartier va en ce sens puisqu'il vise à favoriser la diversité des fonctions au sein de l'écoquartier. Il en découle un indicateur de suivi portant sur la mixité fonctionnelle (pourcentage de surfaces de bureaux, de logements, de commerces et d'équipements publics).

5 *Annonce faite en novembre 2013 par la Ministre de l'Égalité des territoires et du Logement dans un communiqué de presse.*

La diversité d'usages souhaitée entraîne, à l'échelle du quartier, des profils de besoins de chaleur bien différents. Ainsi pour optimiser la production globale de chaleur le recours à un réseau semble opportun.

De plus, il est communément admis par les experts nationaux sur les réseaux de chaleur (ADEME, AMORCE, SNCU, Cerema, etc.) que l'un des critères décisifs dans le choix d'investissement pour un réseau de chaleur est la densité thermique. Or l'engagement six de la charte insiste sur le travail de lutte contre l'étalement urbain par une densification urbaine, ce qui est favorable à la densité thermique des réseaux.

Enfin, la réglementation permet de mettre en œuvre cet argument. L'article L300-1 du code de l'urbanisme mentionne que « toute action ou opération d'aménagement faisant l'objet d'une évaluation environnementale doit faire l'objet d'une étude de faisabilité sur le potentiel de développement en énergies renouvelables de la zone, **en particulier sur l'opportunité de la création ou du raccordement à un réseau de chaleur ou de froid ayant recours aux énergies renouvelables et de récupération** ». Or les opérations d'écoquartier peuvent généralement être soumises à l'évaluation environnementale, car le terrain d'assiette couvre une superficie supérieure ou égale à 10 hectares (Annexe à l'article R122-2 du code de l'environnement).

Il apparait utile d'approfondir le caractère favorable ou défavorable des écoquartiers pour le développement des réseaux de chaleur. L'analyse reposera sur les types de réseaux suivants :

- Les réseaux de chaleur créés ex-nihilo pour l'écoquartier
- Les réseaux de chaleur étendus à un écoquartier
- Les réseaux de chaleur existants préalablement à l'écoquartier.

Ces catégories se distinguent par le degré d'amortissement nécessaire des investissements ; l'une devant amortir la totalité des investissements sur les recettes générées par l'écoquartier, les deux autres ayant la possibilité d'amortir l'extension ou la rénovation sur un périmètre plus large déjà rémunérateur.

3. Présentation des réseaux étudiés

3.1. Les réseaux créés ex-nihilo

3.1.1. Contexte de ces réseaux de chaleur

Parmi les cinq cas faisant l'objet d'une analyse plus approfondie, trois écoquartiers possèdent un réseau de chaleur créé ex-nihilo. Pour ces trois cas, le démarrage des réflexions sur l'opportunité d'un réseau de chaleur date de 2004 à 2008, correspondant à la phase d'avant-projet des écoquartiers.

Les réseaux concernés sont en service depuis plusieurs années malgré des retards courants de livraison de bâtiments des écoquartiers. Toutefois, tous ne sont pas impactés de la même manière par ces retards de livraison et seul un cas a réellement été en difficulté sur l'équilibre financier de son réseau dû à des retards excessifs (plus d'un an pour certains bâtiments de l'écoquartier 1).

Pour chacun de ces aménagements, les collectivités ont été attentives au respect des objectifs de mixité sociale, voir plus ambitieuses pour répondre au mieux à l'engagement sept de la charte EcoQuartier : « mettre en œuvre les conditions du vivre ensemble et de la solidarité ». Ainsi, 25 à 33% des logements proposés dans ces écoquartiers sont à vocation sociale alors que la loi n°2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains fixe une obligation comprise entre 20 et 25% selon les communes.

Ces trois écoquartiers s'étendent sur 1.2Ha, 9Ha et 32.6Ha, et comporte 100, 1000 et 2717 logements soit une densité de logement de 83, 111 et 83 logements par hectare. Les surfaces hors œuvre nettes (SHON)[6], représentent 8 000, 134 000 et 300 000 m². Chacun d'entre eux se situe géographiquement dans une des trois grandes zones climatiques H1, H2 et H3 exposées sur la figure 2.

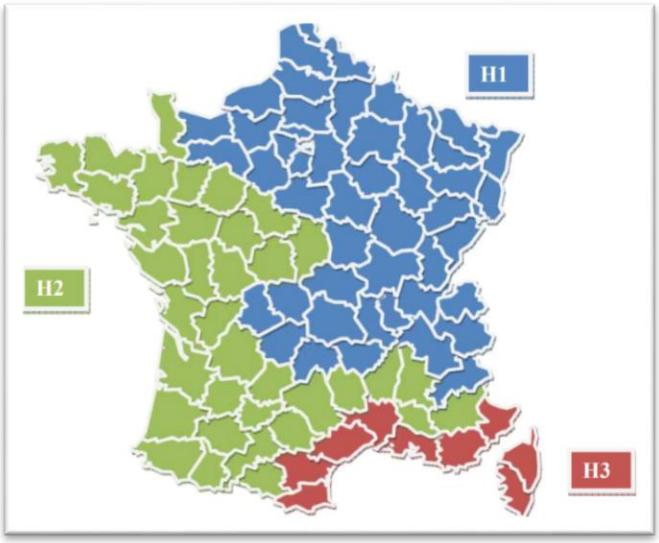
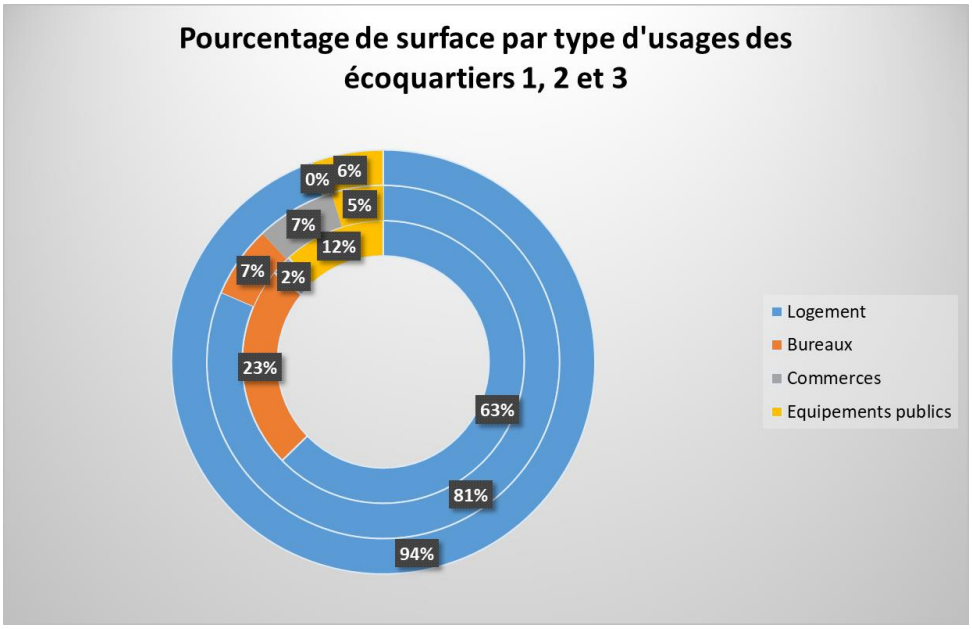


Figure 2: Zones climatiques RT2012

6 *Définition de la SHON : « surface de plancher hors œuvre brute d'une construction est égale à la somme des surfaces de plancher de chaque niveau de la construction », code de l'urbanisme.*

Enfin, les écoquartiers 1 et 2 présentent une mixité de surfaces par type d'usages plus importante que l'écoquartier 3 qui se compose à 94% de logements. Le graphique 1 illustre cette mixité (de l'intérieur vers l'extérieur sont présentés les écoquartiers 1, 2 et 3).



Graphique 1: Pourcentage de surface par type d'usages des écoquartiers 1, 2 et 3

3.1.2. Caractéristiques techniques

La première caractéristique qui différencie ces trois cas est le mode de gestion. Le réseau de chaleur de l'écoquartier 1 est géré par une délégation de service public, celui de l'écoquartier 2 par une gestion privée et celui de l'écoquartier 3 en régie. La durée des contrats diffère également d'un réseau de chaleur à l'autre. La durée du contrat pour le réseau de chaleur 2 est de 18 ans, celle du réseau 1 de 25 ans et celle du réseau 3 est d'environ 30 ans.

Une autre divergence entre ces réseaux est constatée sur la longueur qui est de 800 mètres pour le réseau 3, 4 kilomètres pour le réseau 1 et 6 kilomètres pour le réseau 3. Ceci entraîne un écart entre les densités thermiques allant de 1,1MWh/ml pour le réseau 3 à 2,8MWh/ml pour le réseau 2 en passant par 2.1MWh/ml pour le réseau 1.

Une des similitudes notable entre ces cas est le contenu $CO2$[7] de ces réseaux qui est environ de 95g/kWh. Les solutions d'approvisionnement énergétique fonctionnent pour ces réseaux sur un appoint gaz dont la part s'élève environ à 25%. La part restante est renouvelable et comprend de la biomasse pour deux écoquartiers et de la géothermie pour le troisième. Le mix énergétique comporte donc 75 % d'énergies renouvelables pour ces trois réseaux.

7 Le contenu CO2 du gaz est de 234g/kWh, celui de l'électricité de 180g/kWh, celui du fioul de 300g/kWh et celui du charbon de 384g/kWh.

3.1.3. Acceptabilité des projets et modèles économiques

Ces réseaux de chaleur bénéficient d'une bonne acceptabilité des riverains, mais plus mitigée de la part des promoteurs ou bailleurs. Les exploitants ont mis en place des campagnes d'informations visant les différentes parties prenantes des écoquartiers (riverains, bailleurs, promoteurs). Le but était de faire comprendre à ces derniers le fonctionnement des réseaux de chaleur, le mode de facturation et la plus-value apportée par les réseaux en termes d'énergies renouvelables, afin de recueillir une meilleure acceptabilité des réseaux et faciliter leur développement.

D'un point de vue économique, la production de chaleur de ces réseaux fait l'objet d'une facturation binomiale, constituée d'un terme R1 basé sur le prix de l'énergie consommée et d'un terme R2 basé sur la puissance souscrite auprès du réseau. Seul le réseau de chaleur 1 a mis en place la facturation directe des droits de raccordement. Les deux autres ont, soit pris à leur charge ces coûts, soit les ont indirectement refacturés en introduisant un R2 dégressif en fonction de la puissance souscrite. Enfin, les aides à l'investissement perçues par ces réseaux de chaleur s'échelonnent de 35 % à 50 % environ du montant global de l'opération.

3.2. Les réseaux étendus à des écoquartiers ou existants

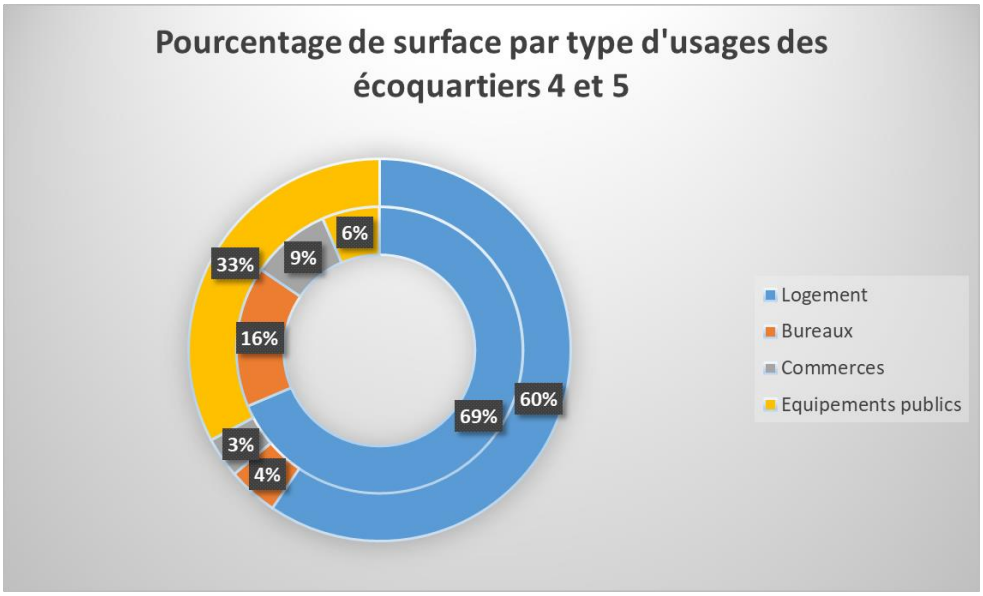
3.2.1. Contexte de ces réseaux de chaleur

Parmi les cinq cas faisant l'objet d'une analyse plus approfondie, deux écoquartiers entrent dans la catégorie « étendus ou existants » ; l'écoquartier 4 étant alimenté par une extension d'un réseau de chaleur et l'écoquartier 5 ayant été construit sur un réseau de chaleur déjà existant. Le démarrage des réflexions sur l'opportunité de ces réseaux de chaleur date de 2007, correspondant à la phase d'avant-projet des écoquartiers.

Comme pour les réseaux créés ex-nihilo, les installations de production pour ces deux écoquartiers sont en service depuis plusieurs années et déplorent également des retards de livraison de bâtiments de quelques mois. Cela a entrainé des difficultés financières à la mise en service de l'extension du réseau 4.

Du point de vue de la mixité sociale, les deux cas étudiés ont veillé au respect des objectifs fixés par la loi ainsi qu'à l'engagement sept pris dans la charte EcoQuartier. Ainsi, jusqu'à 50 % des logements proposés sont à vocation sociale.

Ces deux écoquartiers s'étendent sur 23.9Ha pour le cas 4 et sur 120Ha pour le cas 5. Ils comprennent respectivement 2022 et 5300 logements, soit une densité de logement de 85 et 44 logements par hectare. Les surfaces hors œuvre nettes (SHON) représentent environ 200 000 m². Les deux cas se situent géographiquement dans la zone climatique H1.



Graphique 2: Pourcentage de surface par type d'usages des écoquartiers 4 et 5

Enfin, l'écoquartier 5 présente une mixité de surfaces par type d'usages plus importante que l'écoquartier 4, essentiellement due à la part d'équipements publics installés. Le graphique 2 illustre cette mixité (de l'intérieur vers l'extérieur sont présentés les écoquartiers 4 et 5).

3.2.2. Caractéristiques techniques

Bien que le mode de gestion de cet échantillon soit le même, à savoir une délégation de service public, la durée des contrats est bien différente allant de 12 ans pour le réseau de chaleur de l'écoquartier 5 à 20 ans pour celui de l'écoquartier 4. Une autre différence entre ces cas concerne la longueur du réseau qui s'étend sur 2,5 kilomètres pour le réseau 5 et sur 6,8 kilomètres pour le réseau 4, mais qui entraîne des densités thermiques comparables de 4,9MWh/ml pour le réseau 4 et de 4,6MWh/ml pour le réseau 5.

Le contenu CO2 de ces deux réseaux est d'environ de 70g/kWh. Ce faible contenu CO2 s'explique par le mix énergétique de ces réseaux. L'un produit principalement de l'énergie à partir de chaudières biomasses bois avec appoint gaz tandis que l'autre produit à parts égales de la chaleur à partir du fleuve et d'une usine d'incinération des ordures ménagères avec un appoint vapeur apporté par une extension du réseau de chaleur voisin. La part des énergies renouvelables dans ces deux réseaux est d'environ 70 %.

3.2.3. Acceptabilité des projets et modèles économiques

Ces deux réseaux de chaleur ont en commun une acceptabilité moyenne par les riverains, mais plutôt bonne de la part des promoteurs ou bailleurs. Pour permettre, notamment aux riverains, de comprendre le fonctionnement des réseaux de chaleur, des actions de communication et de sensibilisation ont été réalisées par les aménageurs et/ou exploitants. Dans le cas 4, la collectivité a également organisé une rencontre entre les nouveaux arrivants et une association de quartier pour sensibiliser les futurs riverains aux problématiques des réseaux de chaleur. Pour le second cas, une lettre d'information a été transmise aux résidents ainsi qu'une enquête de satisfaction tous les 2 à 3 ans, utilisée pour adapter leur mode de communication.

D'un point de vue économique, les deux réseaux appliquent une facturation binomiale constituée d'un terme R1 basé sur le prix de l'énergie consommée et d'un terme R2 basé sur la puissance souscrite auprès du réseau. Seul le réseau 4 s'étant étendu vers un écoquartier a mis en place une facturation des droits de raccordement. Le second, étant déjà raccordé à certains bâtiments, n'a pas facturé de droits de raccordement aux nouveaux abonnés. Ce dernier cas n'a par ailleurs reçu aucune aide pour l'évolution de son réseau, alors que le premier a perçu environ 8 % d'aides à l'investissement.

3.3. Les difficultés rencontrées lors de l'étude

La principale difficulté a été d'obtenir le niveau de détail nécessaire au bon déroulement de l'étude. Différents cas de figures ont été rencontrés :

- la collectivité ne possédait aucune information détaillée, ayant délégué la gestion de l'écoquartier à un aménageur ;
- s'agissant d'un aménagement privé avec un réseau de chaleur privé, la collectivité possédait quelques informations et laissait le soin de questionner l'exploitant pour obtenir les données complémentaires ;
- la collectivité possédait toutes les informations demandées, contrat de délégation de service public à l'appui.

Hormis le fait que la collectivité puisse avoir ou non le niveau d'information, le problème principal provient du type de réseau de chaleur alimentant l'écoquartier. Lorsque ce dernier est alimenté par l'extension d'un réseau de chaleur, le niveau de détail est généralement indisponible. Bien que l'exploitant ait l'obligation de fournir un bilan annuel du réseau de chaleur, dans ce cas les consommations, les produits de la facturation ainsi que les charges d'exploitation sont agrégés et empêchent d'identifier rapidement la part que représente l'écoquartier.

Cela s'explique par le fait que ce type de réseau de chaleur est généralement de taille importante et l'abonné que représente l'écoquartier, impacte peu le fonctionnement du réseau (ainsi que son équilibre financier). De ce fait, les charges et produits relatifs à l'écoquartier ne sont pas connus avec précision. Cela rend donc l'analyse des données plus complexe.

Enfin, après analyse de certains contrats, les formules de révision des prix du terme R2 de la facture sont apparues complexes, comme l'illustre la figure 3. Ces formules étant à appliquer mensuellement sur la durée du contrat, la manière d'intégrer la révision du prix dans les différents calculs économiques pose alors question. Par souci de simplification, la révision des termes R1 et R2 n'a donc pas été intégrée.

$$R2 = R2_0 \times [0.35 + 0.65 \times (0.85 \times (0.50 \times ICHT\text{-}IME/ICHT\text{-}IME_0 + 0.50 \times BT40/BT40_0) + 0.15 \times EI/EI_0]$$

avec :

- R20 la valeur du terme R2 à la date de référence,
- ICHT-IME la dernière valeur connue au dernier jour du mois facturé de l'indice synthétique « salaires, revenus et charges sociales – coût de la main d'œuvre et du travail – indices du coût horaire du travail révisé – tous salariés – indices mensuels – industries mécaniques et électriques »(NAF 25-30 32-33),
- ICHT-IME0 la valeur connue à la date de référence de l'indice synthétique « salaires, revenus et charges sociales – coût de la main d'œuvre et du travail – indices du coût horaire du travail révisé – tous salariés – indices mensuels – industries mécaniques et électriques »(NAF 25-30 32-33),
- BT40 la valeur connue au dernier jour du mois facturé de l'indice relatif au chauffage central (sauf chauffage électrique),
- BT400 la valeur connue à la date de référence de l'indice relatif au chauffage central (sauf chauffage électrique),
- El la valeur connue au jour de facturation de l'indice de prix de production de l'industrie française pour le marché français – prix de marché – CPF 35.1 – electricité tarif vert A (FMOD351002),
- El0 la valeur de l'indice El à la date de référence.

Figure 3: Exemple d'un calcul de révision du terme R2 issu du contrat du réseau de chaleur 1

4. Analyses des réseaux de chaleur présentés

4.1. Présentation de la méthodologie de l'analyse des données

4.1.1. Indicateurs économiques

Les indicateurs économiques retenus pour les besoins de l'étude sont :

- la Valeur Actuelle Nette (VAN)
- le Taux de Rendement Interne (TRI)
- le taux d'enrichissement en capital
- le coût de l'énergie

La VAN et le TRI ont été choisis car ils sont les plus couramment utilisés dans les choix d'investissement (POPIOLEK 2006). La VAN est définie comme « la somme actualisée des flux financiers pendant les périodes d'investissement et d'exploitation » et le TRI comme le taux d'actualisation annulant la VAN. Le taux d'enrichissement en capital permet de relativiser la création de valeur représentée par la VAN par rapport à l'investissement engagé. Enfin, le coût de l'énergie sera abordé et comparé afin de mettre en avant la différence entre le coût pour l'exploitant et les recettes liées à la facturation de la chaleur.

Le premier indicateur est utile pour avoir une vision de ce que va pouvoir rapporter le projet sur toute sa durée de vie ramenée à l'instant T0, instant de la prise de décision. Pour le calculer, il s'agit de réaliser, la somme actualisée des cash-flows à un taux d'actualisation donné ou calculé :

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{N_e} \frac{B_t - C_t}{(1+a)^t}$$

$avec$:
I_0: $montant\ de\ l'investissement$
N_e: $durée\ de\ vie\ économique$
B_t: $bénéfices\ monétaires\ et\ non\ monétaires$
C_t: $coûts\ monétaires\ et\ effets\ externes\ négatifs$
a: $taux\ d'actualisation$

Dans tout projet, une VAN positive est recherchée car elle traduit une création de valeur. Si un choix doit être opéré entre différents projets, celui qui possède la VAN la plus élevée est à privilégier (dans le cas général).

Afin de calculer ces indicateurs, de nombreuses hypothèses ont été nécessaires compte tenu des données disponibles. Il est important de noter que cette étude met en regard différents projets de réseaux de chaleur. Par conséquent la **VAN** est calculée sur les cash-flows avant application de la taxe sur la valeur ajoutée afin d'effectuer une analyse intrinsèque aux projets. Voici les hypothèses prises :

- L'investissement pris en compte correspond au montant de l'opération d'extension ou de création du réseau de chaleur considéré auquel on déduit la somme des aides perçues ;
- Le cas échéant, les coûts de raccordement des bâtiments au réseau de chaleur sont assimilés à des recettes perçues en année 0 par l'exploitant. Ce choix a été effectué pour simplifier le calcul car ces charges sont versées à l'exploitant au fil des raccordements et tous n'ont pas lieu au démarrage du projet. Néanmoins, dans le panel d'écoquartier étudié, aucun n'a démarré les travaux du réseau de chaleur sans avoir eu au préalable, l'engagement d'un certain nombre de bâtiments sur leur raccordement ;
- La durée de vie de chaque projet est considérée égale à la durée du contrat d'exploitation, car c'est sur cette durée que l'exploitant doit amortir ses investissements. Dans le cas d'une régie, la durée de vie moyenne des équipements a été prise en compte ;
- Au vu de la durée de construction d'un écoquartier, aucun réseau de chaleur de l'échantillon n'a pu fonctionner à plein régime dès la première année. C'est donc une durée moyenne de 8 ans pour la montée en charge, qui a été appliquée à la production d'énergie ainsi qu'à la puissance installée du réseau. Cette montée en charge du réseau a été modélisée linéairement.
- Le taux d'actualisation utilisé correspond au coût moyen pondéré du capital[8] du projet pour financer la part non subventionnée de l'opération. Lorsque ce calcul n'a pas été possible, un taux de 6 % a été appliqué, cette valeur est la moyenne des taux des projets étudiés ; elle semble cohérente avec les valeurs courantes autour de 2012 ;
- Les recettes prises en compte sont les coûts de raccordement et le produit des facturations aux abonnés. La facture se décompose en un terme R1 et un terme R2 qui dépendent respectivement de l'énergie consommée et de la puissance souscrite. Le terme R2 se décompose lui-même en 3 et parfois 4 parties comme suit :
    - R21 : charges d'électricité et consommation auxiliaire
    - R22 : charges relatives aux conduites et à l'entretien courant
    - R23 : charges liées au gros entretien et renouvellement (long terme)
    - R24 : financement des installations
- Les charges d'exploitation ont été calculées soit en faisant la moyenne annuelle au vu des charges totales prévue sur la durée d'exploitation, soit en prenant un montant estimé et en appliquant le coefficient de montée en charge du réseau.

8 *Définition CMPC : Le CMPC est le la moyenne pondérée des taux des deux sources que sont les capitaux propres et l'endettement net.*

Une fois la VAN calculée, le **TRI** de chaque projet a été déterminé en cherchant le taux d'actualisation qui annule la VAN. Pour y parvenir c'est sur le cash-flow avant impôt que cet indicateur a été calculé. Ce second indicateur peut être considéré comme un indicateur de profitabilité[9] du projet en le comparant au taux d'actualisation du projet. Si le TRI est supérieur au taux d'actualisation retenu, alors le projet est dit rentable.

Le **taux d'enrichissement en capital** se calcule en faisant le rapport entre la VAN, et l'investissement initial moins les subventions.

Enfin le **coût de l'énergie** est calculé en réalisant la somme actualisée, au même taux que pour la VAN, de l'investissement et des charges d'exploitation sur la durée du contrat ou sur la durée de vie moyenne des équipements selon les cas. Si ce dernier indicateur donne le coût actualisé de l'énergie utile pour produire la chaleur, il ne peut être directement comparé au prix moyen de vente de l'énergie qui a également été recalculé car ce prix moyen n'est pas actualisé.

Afin de calculer le **prix moyen de vente de l'énergie**, il est nécessaire d'obtenir les termes R1 et R2 qui la composent. Parfois ces deux termes ont été directement fournis par les interlocuteurs, dans le cas contraire, il est possible de les recalculer en demandant le bouquet énergétique du réseau, le prix de chaque source énergétique, la quantité d'énergie livrée, les différentes charges d'exploitations et la puissance installée. Ainsi la facture se calcule de la manière suivante (AMORCE 2015) :

- Le terme **R1** est le produit de l'énergie livrée par le coût de chaque source d'énergie pondéré de son utilisation. (ex : dans un mix énergétique comprenant 80 % de biomasse et 20 % de gaz, le coût de l'énergie est : coût de la biomasse * 80 % + coût du gaz * 20%) ;
- Le terme **R2** est la somme des charges d'exploitation incluant parfois le financement des installations. Il est calculé en faisant la somme des charges R21, R22, R23 et R24, exprimées généralement en euros par kilowatt, que multiplie la puissance souscrite par l'abonné ;
- Enfin le prix moyen de vente de l'énergie correspond à la somme des termes R1 et R2, exprimés en euros, divisée par l'énergie livrée sur une année. Cela se traduit par une facture à payer en euros par kilowatt-heure par an.

Le prix moyen de vente de l'énergie est un indicateur économique pertinent car il permet de comparer les réseaux les uns aux autres et notamment par rapport à la moyenne française. C'est un des premiers indicateurs qui sera observé en ce qui concerne la compétitivité du réseau. Pour rappel, par mesure de simplification, les termes R1 et R2 n'ont pas été révisés.

9 Définition INSEE : La profitabilité est le rapport entre le profit et la production

4.1.2. Indicateurs techniques

Lorsque l'on parle de réseaux de chaleur, divers indicateurs techniques sont récurrents tels que la densité thermique, la puissance installée, l'énergie livrée ou la durée d'utilisation équivalente à pleine puissance.

La **densité thermique** est calculée en faisant le rapport entre l'énergie délivrée aux sous-stations du réseau et la longueur de ce même réseau. C'est un indicateur important car il conditionne l'obtention du fonds chaleur. En effet, l'ADEME fixe un seuil de 1,5MWh/ml (ADEME, Les Fonds Chaleur en bref - Fiche descriptive réseaux de chaleur 2017) de réseau en dessous duquel elle juge que le réseau ne peut être économiquement viable et ne délivre habituellement pas d'aides.

La **puissance installée** caractérise la somme des puissances des installations de production de chaleur. Un réseau de chaleur est toujours dimensionné, comme toute installation d'énergie renouvelable, sur les pics de consommation afin de pouvoir garantir la continuité d'approvisionnement. C'est pour cette raison qu'un réseau de chaleur possède des chaudières fonctionnant en base afin de délivrer une énergie la plus constante possible, mais également des chaudières d'appoint fonctionnant aux pics afin d'assurer le surplus de demande sur de courtes périodes. Des chaudières de secours prennent quant à elles le relais lors des défaillances des chaudières. Cette puissance totale est dimensionnée par une négociation entre les futurs clients et l'exploitant, qui confrontent leurs calculs de besoin des bâtiments pour s'accorder à priori sur une puissance nécessaire. La puissance installée donne donc une indication sur les pics de charge du réseau de chaleur.

L'énergie livrée représente ici l'énergie fournie par le réseau de chaleur aux différentes sous-stations durant une année à pleine charge (100 % des raccordements prévus).

La **durée d'utilisation équivalente à pleine puissance** est un indicateur qui met en avant le nombre d'heures de fonctionnement des installations de production de chaleur. En réalité certaines installations fonctionnent en continu sans être à pleine puissance. Par mesure de simplification et afin de pouvoir comparer les projets, on norme ces productions en heures équivalentes à pleine charge. Il convient alors de diviser l'énergie délivrée par la puissance installée. Elle sera par la suite appelée durée de fonctionnement.

En ce qui concerne les caractéristiques des écoquartiers, l'analyse porte sur les superficies des bâtiments et de l'écoquartier, la mixité des surfaces pour les différents types d'usages, ainsi que sur la densité de logements.

La **mixité des surfaces** pour les différents types d'usages ainsi que la superficie des bâtiments sont pris en compte simultanément. En effet, ce premier indicateur est exprimé en pourcentage de mètres carrés de SHON, calculé à l'aide des superficies des différentes surfaces de bâtiment par type d'usages. Par usage on entend la destination des locaux, ainsi quatre catégories sont définies : logement, commerces et services, bureaux, équipements publics. Chaque écoquartier sera caractérisé par la superficie des bâtiments en la décomposant par type d'usages. Par mesure de simplification, cette mixité des surfaces pour les différents types d'usages sera appelée mixité d'usages.

La **densité de logements** ainsi que la **superficie de l'écoquartier** peuvent également être considérés parallèlement. La superficie des écoquartiers est mesurée en hectare et la densité de logement est calculée en faisant le rapport entre la superficie de l'écoquartier et le nombre de logements. Toutefois, ce dernier indicateur n'est pas normé et il existe plusieurs méthodes pour le calculer qui ne se trouve jamais détaillées. Par exemple, certains écoquartiers utilisent non pas la superficie totale de l'écoquartier mais la superficie hors zone publique non construite. Dans cette étude il sera donc considéré que la densité de logements sera le simple rapport entre la superficie totale en hectares de l'écoquartier et le nombre de logements total de ce dernier.

Enfin, la **part de logements à vocation sociale**, d'accession aidée et de libre accession est un indicateur qui n'influence pas l'analyse de la pertinence des réseaux de chaleur ; en effet lors des entretiens avec les exploitants/collectivités, tous ont reconnu qu'il n'y avait pas véritablement de lien entre la décision de création d'un réseau de chaleur et la part de logement social au sein de l'écoquartier. C'est un indicateur important pour les écoquartiers mais qui ne joue pas dans la pertinence des réseaux de chaleur comme solution de chauffage au sein de ces aménagements.

4.2. Analyse des réseaux créés ex-nihilo

4.2.1. Présentation et interprétation des indicateurs économiques

- **VAN et TRI**

La VAN et le TRI sont deux indicateurs liés et sont donc analysés parallèlement. Les calculs de ces indicateurs économiques ont abouti aux résultats présentés dans le tableau 1 pour les trois réseaux de chaleur créés ex-nihilo au sein des écoquartiers étudiés.

	Ecoquartier 1	Ecoquartier 2	Ecoquartier 3
Durée de vie projet	25 ans	18 ans	30 ans
VAN	607 639	473 826	131 774
TRI	8,45%	7,70%	4,64%
Taux d'actualisation	6,00%	6,00%	1,92%

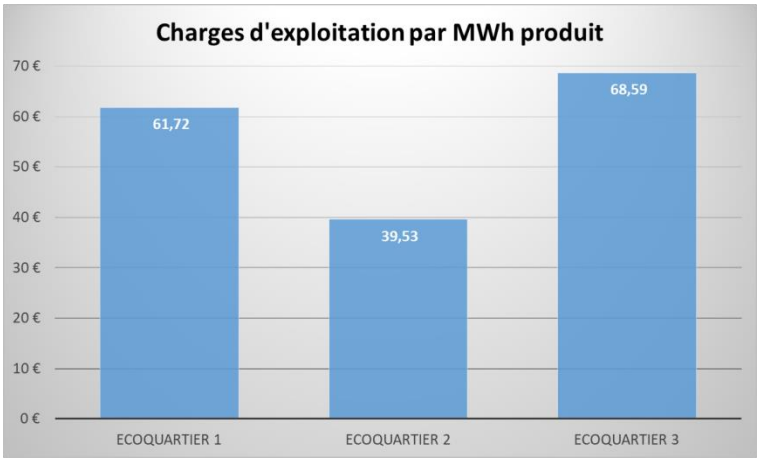
Tableau 1: Résultats des VAN et TRI des projets de réseaux de chaleur des écoquartiers 1, 2 et 3

Au vu de ces résultats, les trois écoquartiers paraissent économiquement viables, en effet les VAN sont positives et les TRI supérieurs aux taux d'actualisation. Le taux d'actualisation du réseau de chaleur de l'écoquartier 3 est très faible et s'explique par la part importante de fonds propre utilisée pour ce projet.

Les trois projets de réseaux de chaleur créent de la valeur. Toutefois, ils ne sont pas tous aussi profitables et cela s'explique par différentes variables comprises dans le calcul de la VAN. En effet, les collectivités n'optent pas toutes pour les mêmes modalités de facturation et des différences notables apparaissent sur le niveau des droits de raccordement, les charges d'exploitation, la durée des contrats et la tarification aux abonnés.

Si l'écoquartier 1 facture directement des droits de raccordements aux futurs abonnés, les deux autres ont choisi de répercuter ce coût dans la facture des abonnés, voire de ne pas le facturer. Le dénominateur de la VAN (voir formule présentée partie 4.1.1) étant croissant, l'impact des cash-flows sur la VAN est de plus en plus minoré. Donc toutes dépenses ou recettes comptabilisées à t=0 influencera davantage la VAN que ces mêmes dépenses ou recettes comptabilisées à t=10 par exemple. Donc le fait de facturer des droits de raccordement à t=0 augmente significativement la VAN comparé à un paiement différé de ce droit lorsqu'il est inclus dans le tarif de vente de la chaleur.

Les charges d'exploitation, présentées dans le graphique 3, sont également très inégales selon les technologies utilisées et bien que le réseau de chaleur de l'écoquartier 1 affiche des charges d'exploitations rapportées à une unité d'énergie livrée proche de celui de l'écoquartier 3. Le deuxième cas démontre qu'il n'y a pas de lien direct entre les charges d'exploitation et l'énergie livrée dans ce type d'écoquartier.



Graphique 3: Charges d'exploitation des réseaux de chaleur 1, 2 et 3 par mégawatt-heure produit

La durée des contrats joue un rôle capital car elle détermine la durée de vie du projet ainsi, bien que l'écoquartier 1 semble plus intéressant, il est important de noter que la durée du contrat est de 25 ans dans ce cas contre seulement 18 ans pour l'écoquartier 2.

Enfin, la tarification aux abonnés étant la principale source de recettes, elle est également essentielle dans le calcul de la VAN et du TRI. Elle sera détaillée à la fin de cette partie.

- **Taux d'enrichissement en capital**

La VAN et le TRI sont des indicateurs incontournables mais qu'il faut toutefois relativiser. En effet, des trois cas analysés, le troisième semble moins intéressant car créant moins de valeur que les autres et ce, sur une durée de vie plus longue (30 ans). Mais si l'on rapporte la valeur créée à l'investissement initial (I) en calculant le taux d'enrichissement en capital, les rapports s'inversent.

Le tableau de résultat suivant met en avant un rapport VAN/I qui bénéficie davantage à l'écoquartier 3 qu'aux deux autres ; l'écoquartier 1 restant toujours plus intéressant que l'écoquartier 2.

	Ecoquartier 1	Ecoquartier 2	Ecoquartier 3
Taux d'enrichissement en capital	12%	10%	22%

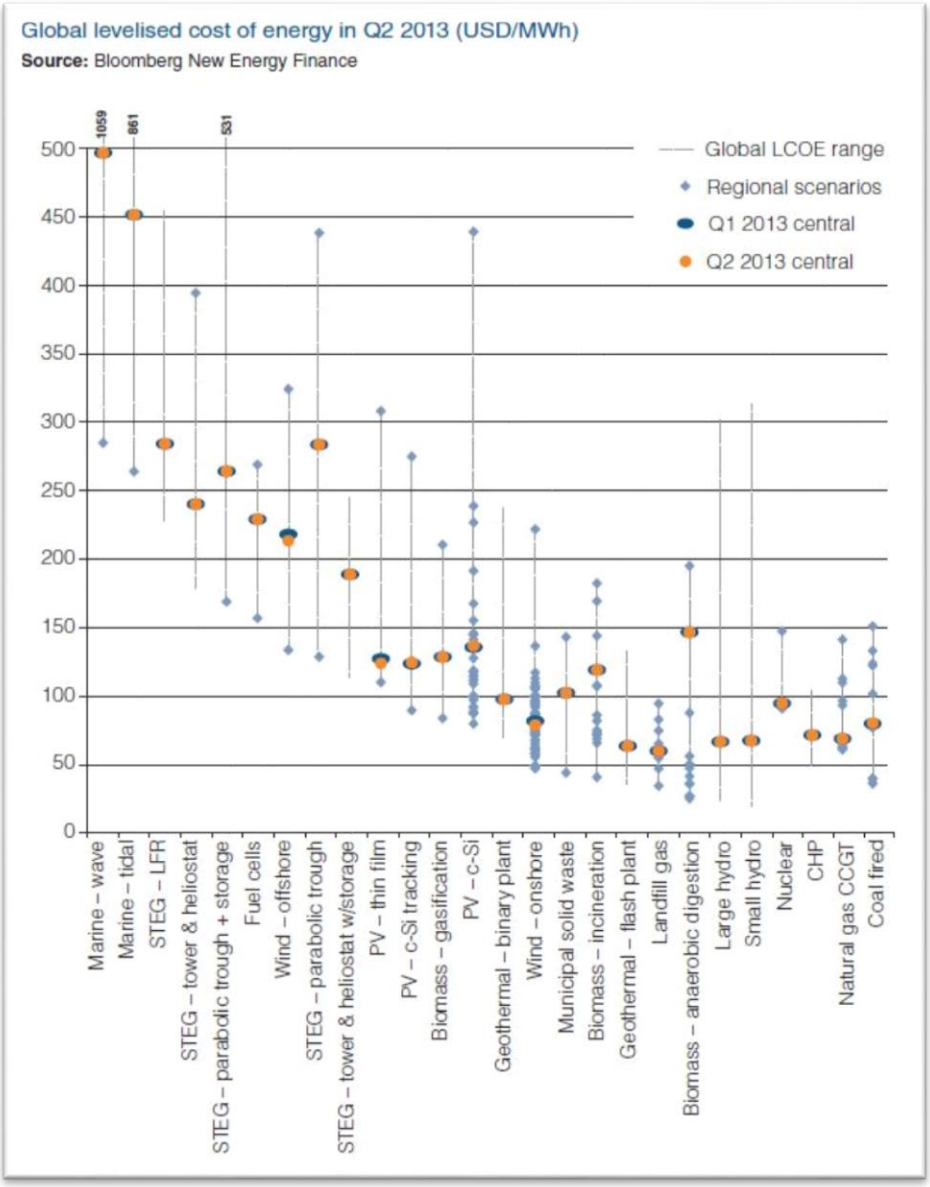
Tableau 2: Résultats des taux d'enrichissement en capital des projets de réseaux de chaleur des écoquartier 1, 2 et 3

Un taux d'enrichissement en capital acceptable pour un projet est de l'ordre de 10%, ainsi cet indicateur ne contredit pas l'intérêt démontré par la VAN et le TRI de l'ensemble des projets étudiés.

- **Coût de l'énergie pour l'exploitant**

Dans le domaine de l'énergie, les technologies sont également considérées suivant leur coût actualisé de l'énergie exprimé en euro (ou dollar) par mégawatt-heure. Ce coût représente l'ensemble des charges de l'exploitant rapporté à l'énergie délivrée sur la durée de vie du projet. Cet indicateur donne un premier aperçu de la rentabilité que l'on peut attendre d'un projet énergétique au regard de ce qu'il va pouvoir rapporter.

C'est dans ce but de comparaison et de veille que le World Energy Council (WEC) a établi le rapport « Cost of Energy Technologies » (SALVATORE 2013) dans lequel est présenté, le panorama des coûts des différentes énergies, hors subventions, dans le monde au second trimestre 2013.
Le graphique 4 montre que les coûts des principales énergies utilisées et utilisables dans les réseaux de chaleur sont compris entre 60 $/MWh (43,50€/MWh) et 150 $/MWh (108,76€/MWh).



Graphique 4: Benchmark des coûts actualisés de l'énergie sur le deuxième trimestre 2013 (Source:WEC)

Les trois cas étudiés s'insèrent dans cet ordre de grandeur comme le montre le tableau 3.

	Ecoquartier 1	Ecoquartier 2	Ecoquartier 3
Coût actualisé de l'énergie (avec aides)	95,69 €/MWh	70,82 €/MWh	94,01 €/MWh
Coût actualisé de l'énergie (sans aides)	115,98 €/MWh	83,84 €/MWh	113,85 €/MWh

Tableau 3: Résultats des coûts de production actualisés de l'énergie des réseaux de chaleur des écoquartiers 1, 2 et 3

Ainsi, ces projets ont un coût de l'énergie pour l'exploitant cohérent avec le type de technologie développé pour la production de chaleur. Les écarts entre les différents cas s'expliquent essentiellement par la quantité d'énergie livrée. L'écoquartier 1 possède le coût le plus élevé car les charges d'exploitation sont proches de celles de l'écoquartier 2 mais pour une quantité d'énergie livrée bien inférieure. A l'inverse, l'écoquartier 2 possède le coût le plus bas tout en ayant les charges d'exploitation les plus fortes mais compensées par la quantité d'énergie livrée.

L'impact des aides a également été caractérisé en calculant le coût actualisé de l'énergie avec et sans aides. En faisant le rapport des deux types de coût, les aides entraînent une baisse du coût de près de 20 % (21 % pour le cas 1, 18 pour le 2 et 21 pour le 3).

Le coût actualisé de l'énergie est donc un bon indicateur car il révèle l'état de l'équilibre entre les charges d'exploitation (sources de dépenses) et la production d'énergie (source de recettes).

- **Prix moyen de vente de la chaleur**

Afin de comparer les prix moyens de vente de la chaleur des trois cas analysés aux prix moyens des réseaux recensés en France, cette partie s'appuiera sur le rapport *prix de vente de la chaleur 2013* (AMORCE 2015). Avant d'interpréter ces résultats, il est important de préciser que le calcul du prix moyen de la chaleur ne reflète pas exactement la facture finale de l'usager. Le prix moyen de vente de la chaleur est calculé au niveau de l'abonné qui n'est pas l'usager final. Entre les deux viennent s'ajouter des charges liées au réseau secondaire. De plus, le prix moyen de vente de la chaleur est sensible à la rigueur climatique, plus il fait froid, plus la consommation d'énergie va augmenter ce qui aura une répercussion sur la part variable, tirant alors le prix de vente unitaire vers le bas. Afin de comparer les prix de vente moyens de la chaleur il est donc nécessaire de corriger les variations climatiques ou à défaut de comparer ces prix sur une même année de référence. C'est pourquoi l'édition 2015 du rapport d'AMORCE a été retenue.

Le tableau 4 recense les prix moyens de vente des cas étudiés et des réseaux de chaleur en France ainsi que ceux ayant un mix énergétique supérieur à 50 % d'énergies renouvelables. Les écoquartiers ont un objectif inscrit dans la charte de diversification des sources énergétiques les alimentant au profit des énergies renouvelables. De plus, les aides du fonds chaleur ne sont délivrées qu'aux réseaux affichant un taux d'énergies renouvelables supérieur à 50% ; c'est pourquoi le tableau 4 met en avant les réseaux français ayant recours à plus de 50% d'énergies renouvelables.

	Tous réseaux de chaleur en France	Réseaux de chaleur >50% EnR[10] en France	Ecoquartier 1	Ecoquartier 2	Ecoquartier 3
Prix moyen de la chaleur (€HT/MWh)	68,3	61,8	103,07	74,47	102,69
Part du R2 dans la facture	33,2 %	41 %	62 %	59,50 %	50 %

Tableau 4: Prix moyens de vente de chaleur et part du R2 dans la facture pour les réseaux de chaleur 1, 2 et 3 dans le contexte national

D'après les résultats du tableau 4, il apparaît que le prix moyen de la chaleur des trois cas étudiés de réseaux de chaleur est supérieur au prix moyen français ainsi qu'au prix moyen des réseaux utilisant plus de 50 % d'énergie renouvelable. De plus, la part fixe de la facture est également supérieure aux moyennes nationales (totale et >50% EnR).

La proportion de la part fixe dans ces écoquartiers est révélatrice de projets très coûteux à l'investissement par rapport aux charges de fonctionnement. Bien que la comparaison entre le coût de l'énergie vu précédemment et le prix de vente de la chaleur ne soit pas possible, l'un étant actualisé sur la durée de vie, l'autre pris sur une année de référence ; les coûts de l'énergie calculés justifient d'avoir des prix plus élevés que la moyenne des réseaux français.

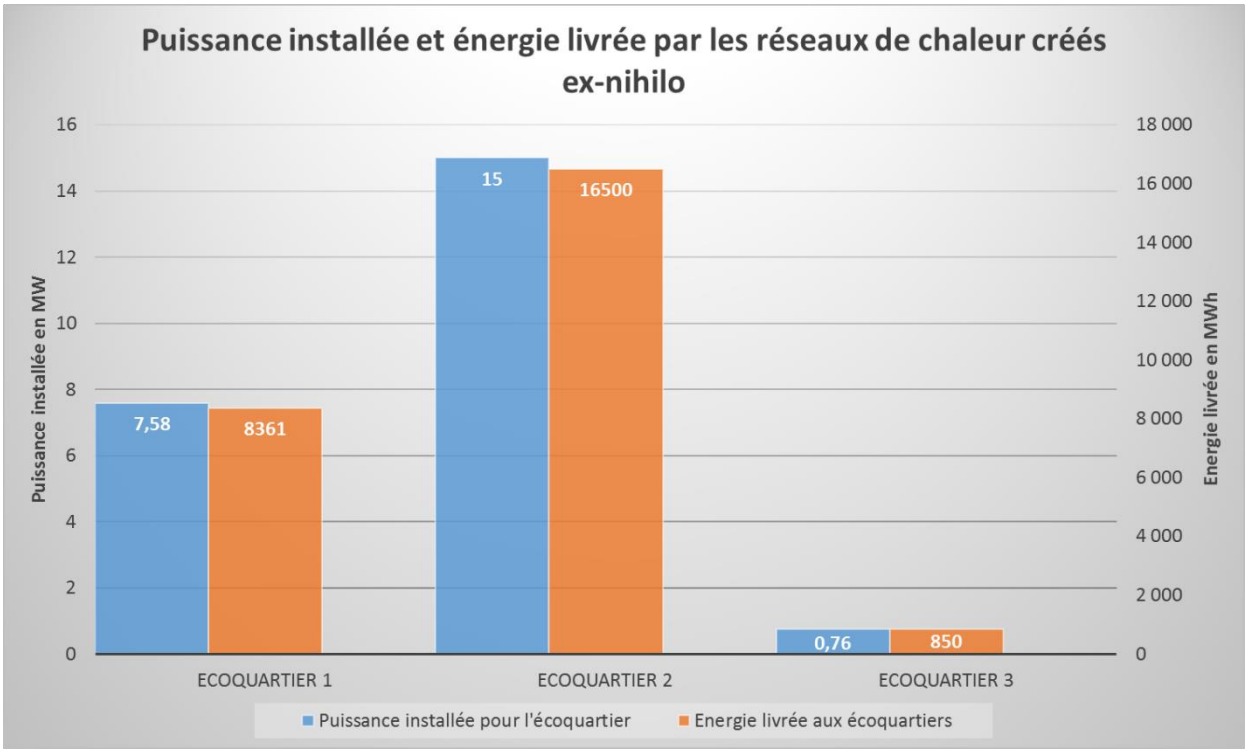
De plus, le rapport d'AMORCE spécifie que « Les plus petits réseaux (moins de 10 000 MWh) ont un prix de vente relativement plus élevé », il n'est donc pas anormal vu la quantité d'énergie livrée [11] à ces écoquartiers que les prix de vente soient supérieurs à la moyenne.

10 EnR : abréviation d'énergies renouvelables
11 Donnée affichée dans le graphique 5 de la partie 4.2.2

4.2.2. Présentation et interprétation des indicateurs techniques

- **Puissance installée, énergie livrée et durée de fonctionnement**

Le graphique 5 présente la puissance installée ainsi que l'énergie livrée des réseaux de chaleur des trois écoquartiers créés ex-nihilo. Comme expliqué dans la partie 4.1.2, la durée de fonctionnement est le rapport entre l'énergie livrée et la puissance installée. Ce graphique montre un rapport constant entre les trois écoquartiers concernant la durée de fonctionnement. Cette dernière vaut respectivement pour les écoquartiers 1, 2 et 3, 1103h, 1100h et 1117h[12].



Graphique 5: Puissance installée et énergie livrée par les réseaux de chaleur 1, 2 et 3

Les bureaux d'études considèrent que cette durée, pour une chaudière, doit être comprise entre 2000 h et 5000h. Une durée inférieure à 2000h signifie que l'installation est surdimensionnée alors qu'une durée supérieure à 5000h est très performante et optimisée ; la durée de fonctionnement couramment observée est de l'ordre de 2500h pour une chaudière. Cependant les durées calculées correspondant à l'ensemble des chaudières du réseau de chaleur ; les chaudières de secours se trouvent donc comptabilisées alors qu'elles ne sont utilisées que quelques heures dans l'année pour faire face aux pics ou encore aux défaillances d'une chaudière « principale ».

12 Valeurs calculées sur les prévisions à terme de l'écoquartier hors autres projets de raccordement

La courbe de charge d'un réseau de chaleur n'est pas linéaire et lisse sur une année. Comme le montre la figure 4, issue de l'analyse des besoins d'un îlot de l'écoquartier 1 par l'exploitant, c'est en hiver que la consommation est maximale et en été qu'elle est minimale. Cela représente 230 jours de chauffe soit 5520 heures, pour 135 jours où seule l'eau chaude sanitaire doit être produite.

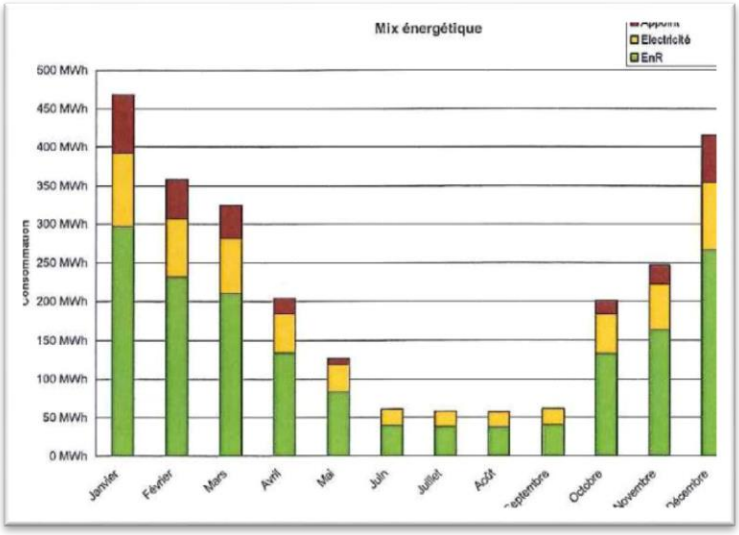


Figure 4: Courbe de charge d'une chaufferie du réseau de chaleur 1

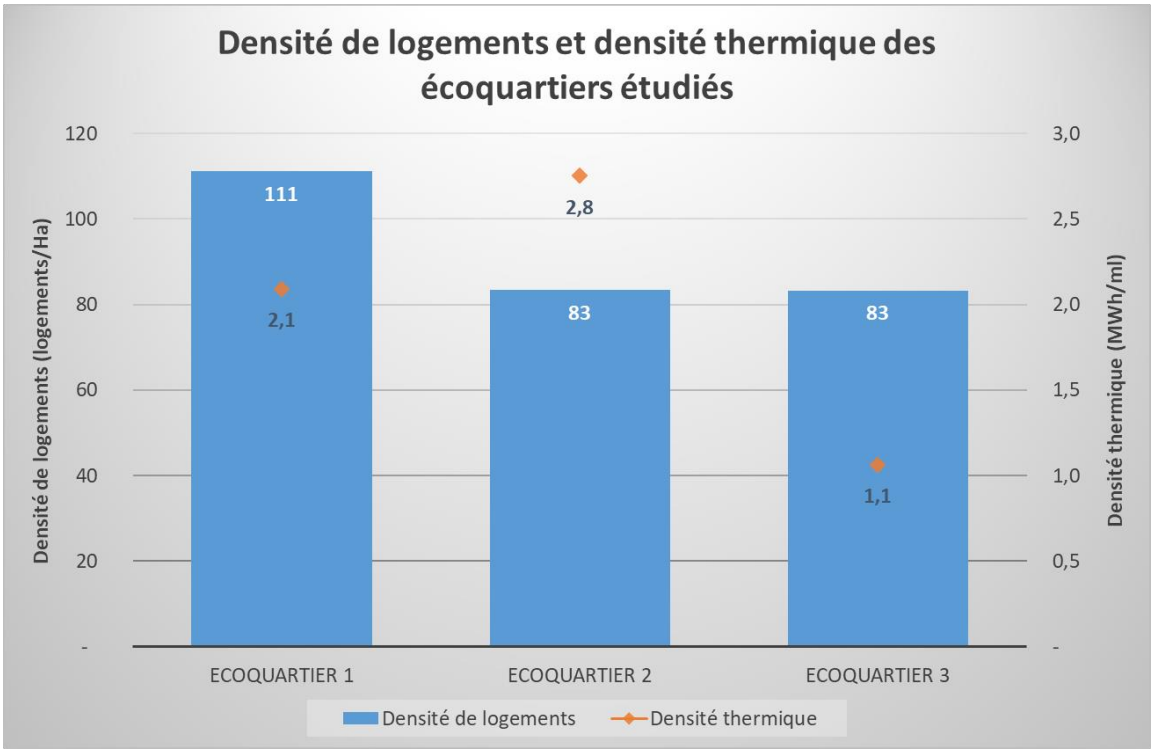
Par ailleurs, le calcul de la durée de fonctionnement sur la globalité du réseau de chaleur met en avant le dimensionnement des chaudières. Plus la durée est courte, plus les chaudières sont surdimensionnées. Deux cas sont alors possibles : soit les chaudières principales sont bien dimensionnées et ce sont les chaudières de secours qui sont surdimensionnées, soit ce sont les chaudières principales qui sont surdimensionnées. Or, en dehors des tranchées et de la tuyauterie, ce sont les kilowatts installés qui conditionnent l'investissement. Il y a donc un fort enjeu économique attaché au bon dimensionnement des chaudières, en particulier celles fonctionnant au bois ou avec la géothermie.

Enfin, la mixité d'usages présentée dans cette partie peut jouer sur le fonctionnement des chaudières et plus particulièrement sur le foisonnement de la courbe de charge journalière. A une échelle plus micro que le graphique précédent, le foisonnement du réseau de chaleur est représenté par le cumul des appels de puissance sur une journée. Plus le réseau de chaleur dessert des bâtiments à usages différents, plus la courbe de charge journalière sera lisse, optimisant ainsi les moyens de production (utilisation des chaudières d'appoint réduite).

D'après les facteurs exposés précédemment, la durée de fonctionnement des trois écoquartiers reste assez basse, signe d'un surdimensionnement des installations de production. En effet, d'après les données du rapport de l'enquête nationale des réseaux de chaleur (SNCU 2015), la durée d'utilisation moyenne sur l'ensemble des réseaux de chaleur français est d'environ 1360h. Le surdimensionnement de ces réseaux de chaleur peut toutefois s'expliquer par des projets d'extension du réseau ou d'agrandissement des écoquartiers. La durée de fonctionnement se calculant sur une année, il se peut qu'un réseau paraisse surdimensionné une année et mieux adapté quelques années plus tard, suite à de nombreux raccordements. C'est toutefois un indicateur qu'il faut suivre car représentatif du bon dimensionnement des installations.

- **Densité de logements et densité thermique**

La densité thermique est l'un des critères de viabilité des réseaux de chaleur les plus utilisé. L'intérêt du graphique 6 est de mettre au regard de cette densité thermique celle des logements des écoquartiers, afin de déterminer s'il y a un lien entre ces indicateurs. Le graphique montre que ce n'est à priori pas le cas. La densité de logements seule, n'explique donc pas la densité thermique du réseau de chaleur. Ce résultat était prévisible, la diversité des logements, que ce soit par leur taille ou par leur niveau de performance, peut également influencer la densité thermique pour une densité de logements donnée. De plus, bien qu'ils représentent une part majoritaire au sein des écoquartiers, les logements ne sont pas les seuls locaux raccordés aux réseaux de chaleur. En effet, la présence d'équipements publics, de commerces ou d'autres activités influe également sur la densité thermique.



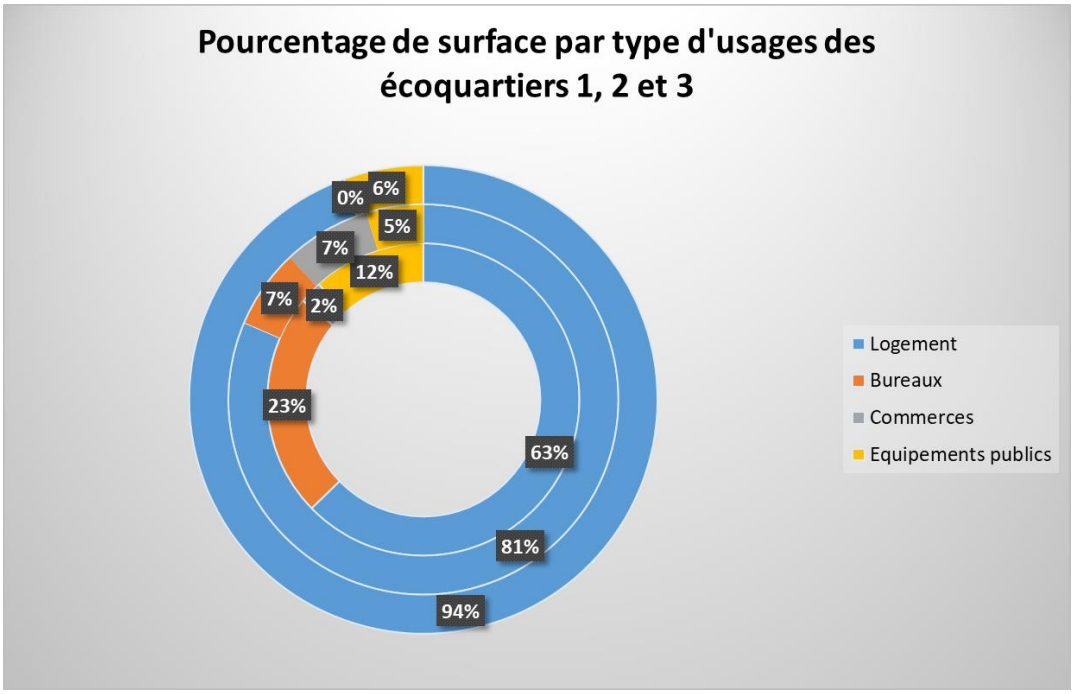
Graphique 6: Densité de logements et densité thermique des cas 1, 2 et 3

Toutefois, l'étude portant sur des écoquartiers, le niveau de performance des bâtiments est contraint et n'explique donc pas non plus cette disparité de densités thermiques.

On peut alors conclure qu'il n'y a aucun indicateur étudié qui peut expliquer directement la densité thermique à posteriori. Celle-ci reste donc à apprécier, pour ces cas qui semblent présenter un faible taux de raccordement. Quelles que soient les raisons, ces densités sont relativement faibles par rapport à la moyenne des réseaux enquêtés (SNCU 2015) qui est de 6.7MWh/ml, mais restent toutefois supérieures, excepté pour le cas 3, au seuil critique de 1,5MWh/ml.

- **Superficie des bâtiments et mixité d'usages**

Les trois écoquartiers étudiés sont bien différents du point de vue de leur mixité d'usages. En effet, si les trois possèdent une part majoritaire de logements (de 63 à 94 %), le poids des autres types de locaux diffère. Ainsi le graphique 7 montre une proportion importante des bureaux au sein de l'écoquartier 1 pour une part bien inférieure de commerces et d'équipements publics alors que l'écoquartier 2 possède des bureaux, commerces et équipements publics environ à parts égales. Enfin, l'écoquartier 3 affiche une dépendance quasi-exclusive de logements avec seulement 6 % d'équipements publics.



Graphique 7: Mixité d'usages des écoquartiers 1, 2 et 3

Le rapport du Cerema sur *la place des réseaux de chaleur dans les nouveaux quartiers* (Le Dû 2012) a mis en exergue que la mixité d'usages d'un quartier affecte le fonctionnement et les performances du réseau de chaleur qui l'alimente. Ce rapport conclue que plus la mixité d'usages est faible, plus la performance du réseau est détériorée, ceci ayant des conséquences sur son fonctionnement.

L'écoquartier 1 profite de la plus grande mixité d'usage des trois cas tandis que le réseau de l'écoquartier 3 ne bénéficie quasiment d'aucune mixité. Pourtant, le cas 1 affiche une durée de fonctionnement quasiment équivalente à celle du cas 3, ainsi qu'une densité thermique moins élevée que le cas 2, alors que les cas 2 et 3 possèdent une mixité d'usages inférieure.

Dans les cas étudiés, la mixité d'usages n'apparait pas comme un critère de performance. Ce point mériterait d'être approfondi, en analysant notamment la courbe de charge des réseaux et le taux de rendement des chaudières en fonction de la charge de celles-ci.

4.3. Analyse du réseau étendu ou pré-existant

4.3.1. Présentation et interprétation des indicateurs économiques

- **VAN et TRI**

La VAN et le TRI sont deux indicateurs liés et sont donc analysés parallèlement. Les calculs de ces indicateurs économiques ont abouti aux résultats présentés dans le tableau 5 pour les deux réseaux de chaleur considérés.

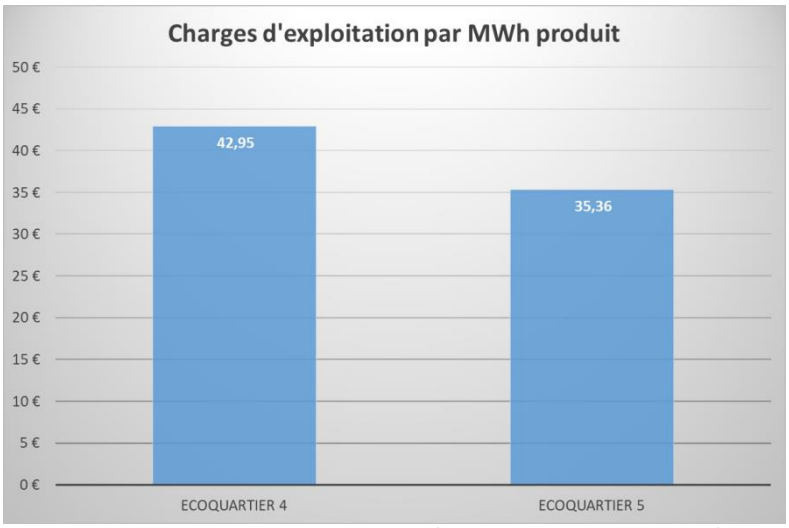
	Ecoquartier 4	Ecoquartier 5
Durée de vie projet	20 ans	12 ans
VAN	2 665 560	1 085 682
TRI	9,95%	10,30%
Taux d'actualisation	7,10%	6,00%

Tableau 5: Résultats des VAN et TRI des projets de réseaux de chaleur des écoquartiers 4 et 5

Au vu de ces résultats, les deux écoquartiers apparaissent comme économiquement viables, en effet les VAN sont positives et les TRI supérieurs aux taux d'actualisation. Tous ces projets de réseaux de chaleur créent de la valeur. Toutefois, ces deux projets ne sont pas aussi profitables avec un rapport de 2,45 entre les VAN. Cela s'explique par différentes variables comprises dans le calcul de la VAN comme les droits de raccordement, les charges d'exploitation, la durée des contrats et la tarification aux abonnés.

L'écoquartier 4 facture directement des droits de raccordements aux futurs abonnés alors que l'écoquartier 5 n'a pas cette possibilité. Le réseau étant déjà existant et partiellement raccordé dès le démarrage pour l'écoquartier 5, les charges et recettes sont également moins élevées. La question se pose alors de savoir quel réseau est le plus intéressant pour l'exploitant.

Le graphique 8 représente les charges d'exploitation, rapportées à une unité d'énergie livrée par les réseaux. Le réseau de chaleur de l'écoquartier 5 présente des charges d'exploitation environ 20 % moins élevées que celles de l'écoquartier 4. Cela vient relativiser l'écart entre les VAN de ces deux projets. Le cas 4 possède une VAN bien plus élevée mais des charges d'exploitation également bien plus élevées.



Graphique 8: Charges d'exploitation par mégawatt-heure produit des réseaux de chaleur 4 et 5

Concernant la durée des contrats, le réseau de chaleur de l'écoquartier 4, qui semble plus intéressant, a une durée de vie de 20 ans alors que celle de l'écoquartier 5 est de 12 ans, ce qui vient nuancer le gain de l'écoquartier 4.

- **Taux d'enrichissement en capital**

Afin de mieux apprécier la profitabilité d'un projet, il convient d'analyser plusieurs indicateurs afin de compenser les biais de chacun d'entre eux. Ainsi, en plus de la VAN et du TRI, le taux d'enrichissement en capital permet de prendre en compte l'investissement initial.

Le tableau 6 met en avant un rapport VAN/I qui bénéficie davantage à l'écoquartier 5 :

	Ecoquartier 4	Ecoquartier 5
Taux d'enrichissement en capital	20%	33%

Tableau 6: Résultats des taux d'enrichissement en capital des projets de réseaux de chaleur des écoquartier 4 et 5

Un taux d'enrichissement en capital acceptable pour un projet est de l'ordre de 10%. Cet indicateur ne contredit donc pas l'intérêt démontré par la VAN et le TRI de l'ensemble des projets étudiés. Il ajoute en outre, une clé d'analyse en inversant l'intérêt des projets mis en avant par la VAN. En effet, l'écoquartier 4 qui possédait une VAN 2,45 fois supérieure à l'écoquartier 5 affiche un taux d'enrichissement en capital de 20 % contre 33 % pour l'écoquartier 5.

Le réseau de chaleur de l'écoquartier 4 mobilise donc un capital 4 fois plus important que celui de l'écoquartier 5 pour dégager une VAN 2,45 fois plus importante, mais sur une durée 40 % plus longue. On peut alors conclure que d'un point de vue purement économique, le réseau de chaleur de l'écoquartier 5 semble plus profitable malgré la différence observée sur la VAN.

- **Coût de l'énergie pour l'exploitant**

Avant d'aborder le prix moyen de vente de la chaleur, l'analyse du coût de l'énergie permet de situer un réseau par rapport à un autre, mais également vis à vis d'autres types d'énergies.

Le graphique 4 présenté dans la partie précédente, sert de référence pour situer les cas étudiés dans le spectre des coûts des différentes énergies. Il montre que les coûts des principales énergies utilisées et utilisables dans les réseaux de chaleur, sont compris entre 60 $/MWh (43,50€/MWh) et 150 $/MWh (108,76€/MWh).

En ce qui concerne les cas étudiés, le tableau 7 montre leur coût actualisé de l'énergie :

	Ecoquartier 4	Ecoquartier 5
Coût actualisé de l'énergie (avec aides)	82,68 €/MWh	55,94 €/MWh
Coût actualisé de l'énergie (sans aides)	87,01 €/MWh	55,94 €/MWh

Tableau 7: Résultats des coûts de production actualisés de l'énergie des réseaux de chaleur des écoquartiers 4 et 5

L'écoquartier 4 possède un coût de l'énergie dans la moyenne des coûts des différentes énergies utilisables dans les réseaux de chaleur, tandis que celui de l'écoquartier 5 est bien inférieur et se situe parmi les énergies les moins coûteuses.

Ainsi ces projets ont un coût de l'énergie pour l'exploitant cohérent avec le type de technologie développé pour la production de chaleur. L'écart entre ces cas s'explique essentiellement par les charges d'exploitation et l'investissement initial.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'écoquartier 4 a un investissement initial et des charges d'exploitation bien supérieures à l'écoquartier 5, qui ne compensent pas la différence de quantité d'énergie livrée. Cet indicateur est donc très utile pour se rendre compte du coût du réseau de chaleur pour l'exploitant sur la durée du contrat. Il permet également de mieux comprendre les prix de vente pratiqués.

- **Prix moyen de vente de la chaleur**

Comme dans la partie précédente, le tableau 8 présente le prix moyen de vente de la chaleur des deux réseaux étudiés au regard du prix moyen observé sur le territoire français (AMORCE 2015), ainsi que le prix de vente moyen des réseaux intégrant plus de 50 % d'énergies renouvelables dans leur bouquet énergétique.

	Tous réseaux de chaleur en France	Réseaux de chaleur >50% EnR en France	Ecoquartier 4	Ecoquartier 5
Prix moyen de la chaleur (€HT/MWh)	68,3	61,8	93,07	65
Part moyenne de la partie fixe de la facture	33,2 %	41 %	53,26 %	50,35 %

Tableau 8: Prix moyens de vente de chaleur et part du R2 dans la facture pour les réseaux de chaleur 4 et 5 dans le contexte national

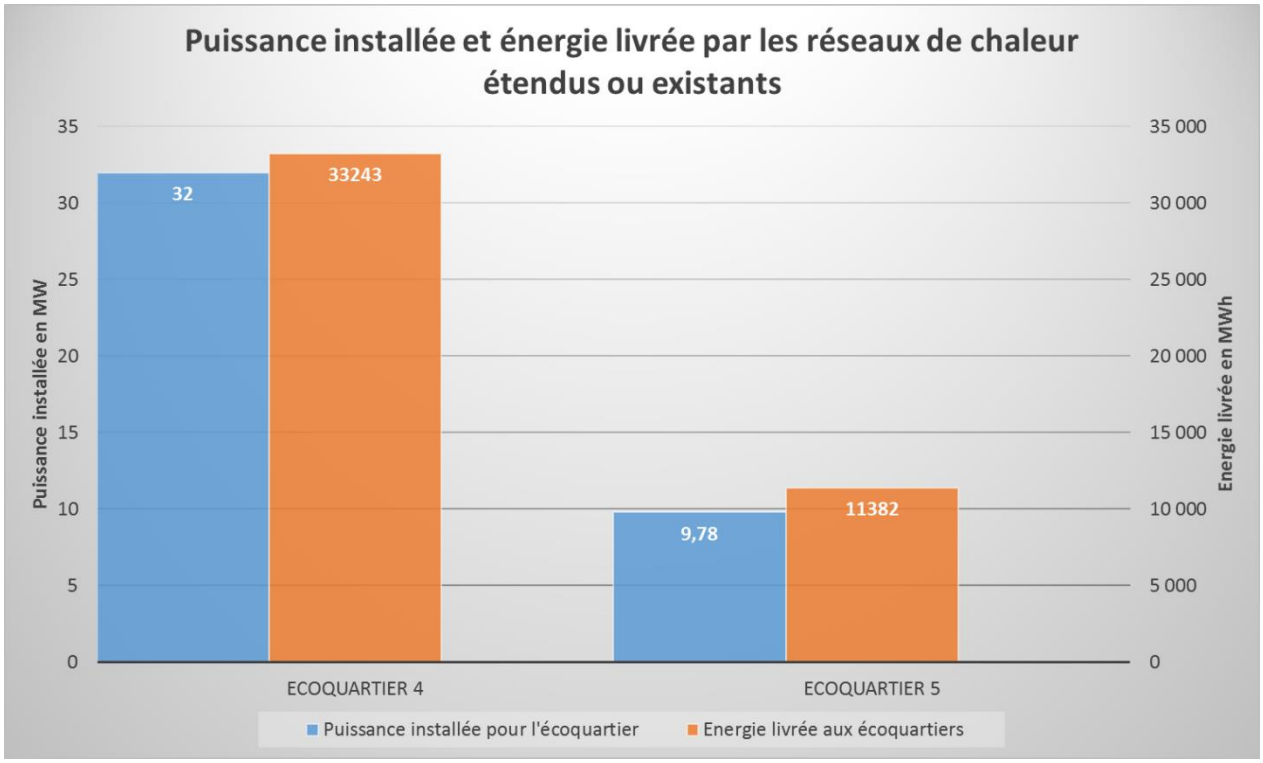
D'après les résultats du tableau 8, le prix moyen de la chaleur des deux cas étudiés est supérieur au prix moyen des réseaux alimentés à plus de 50 % par des énergies renouvelables. Toutefois l'écoquartier 5 affiche un prix moyen de vente inférieur à la moyenne nationale, tous réseaux confondus, alors que l'écoquartier 4 est lui bien supérieur.

La proportion de la part fixe dans ces écoquartiers est également bien supérieure aux deux catégories de réseaux issues de l'étude d'AMORCE. La part fixe servant notamment à amortir l'investissement, plus cette part est élevée plus l'investissement initial est important par rapport au coût de fonctionnement (coût des intrants). Cet indicateur confirme de nouveau l'importance de l'investissement pour le réseau de chaleur de l'écoquartier 4 par rapport à celui de l'écoquartier 5. De plus, cela met en avant que ces deux réseaux coûtent davantage à l'investissement que la moyenne des réseaux français, ainsi que des réseaux étant alimentés à plus de 50 % par des énergies renouvelables.

4.3.2. Présentation et interprétation des indicateurs techniques

- **Puissance installée, énergie livrée et durée de fonctionnement**

Le graphique 9 présente la puissance installée ainsi que l'énergie livrée des réseaux de chaleur étendus ou déjà existants. Comme expliqué dans la partie 4.1.2, la durée de fonctionnement est le rapport entre l'énergie livrée et la puissance installée. Ce graphique montre un rapport équivalent entre les deux cas étudiés, avec des durées de fonctionnement de 1038h et 1163h.



Graphique 9: Puissance et énergie des réseaux de chaleur 4 et 5

Comme pour les cas de réseaux créés ex-nihilo, cette durée est bien inférieure à la moyenne française qui est de 1360h (SNCU 2015), lorsque l'on considère la totalité du réseau de chaleur et non pas chaque chaudière de manière individuelle. Cette durée met en avant le bon dimensionnement des différentes chaudières (partie 4.2.2) qui a un impact fort sur l'investissement et donc la viabilité du projet.

Mais le dimensionnement des installations n'est pas le seul paramètre impactant la durée de fonctionnement : la mixité d'usages présentée dans cette partie est également un paramètre déterminant. Plus le réseau de chaleur dessert des bâtiments à usages différents plus la courbe de charge journalière sera lisse, optimisant ainsi les moyens de production (utilisation des chaudières d'appoint réduite).

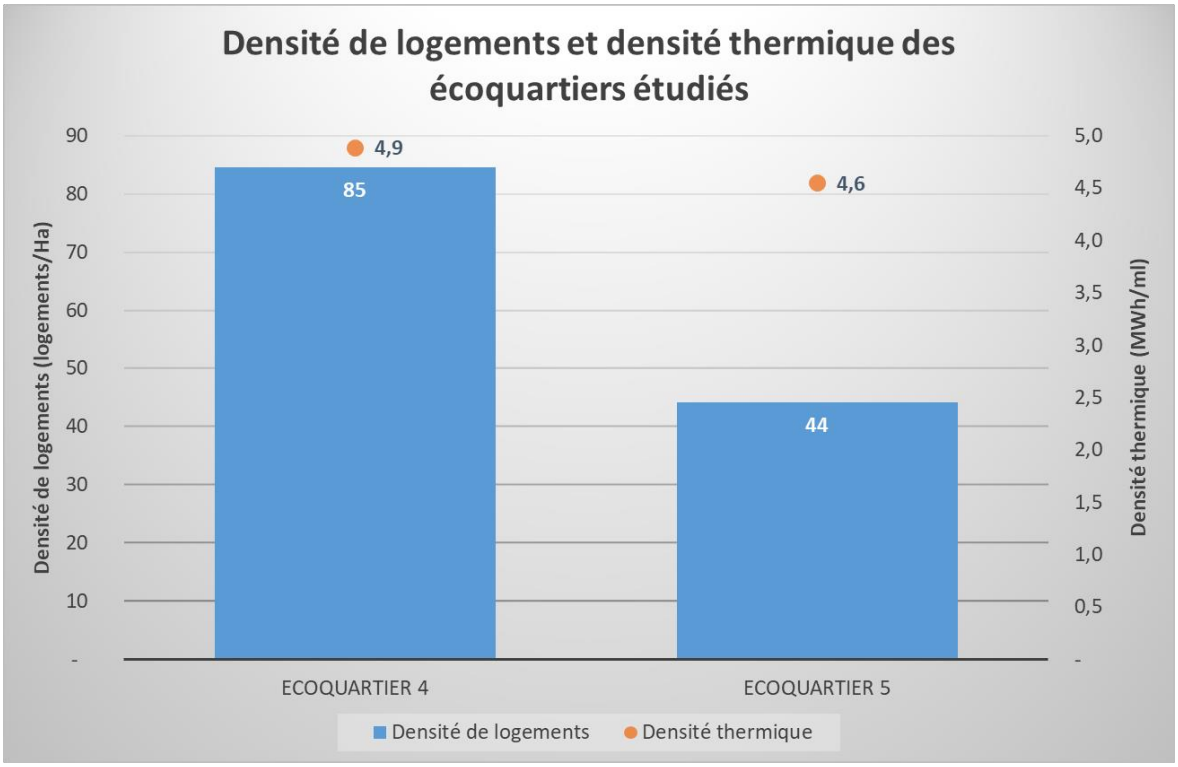
D'après les facteurs exposés précédemment, la durée de fonctionnement de ces réseaux est basse comparativement à la moyenne nationale, signe d'un surdimensionnement des installations de production. Elle peut toutefois s'expliquer par une vision à plus long terme des collectivités qui projetteraient la réalisation d'extensions des réseaux ou l'agrandissement des écoquartiers.

En effet, la durée de fonctionnement se calcule sur une année. Il se peut qu'un réseau paraisse surdimensionné une année mais devienne optimal quelques années plus tard, suite à de nombreux raccordements. C'est toutefois un indicateur qu'il faut suivre car représentatif du bon dimensionnement des installations.

- **Densité de logements et densité thermique**

La densité thermique est un des critères de viabilité des réseaux les plus utilisés (partie 4.2.2). La densité de logements, quant à elle, trouve sa place non seulement par l'engagement n°6 de la charte EcoQuartier, mais également car les écoquartiers possèdent une faible mixité d'usages, majoritairement résidentielle. La question de l'existence d'un lien entre la densité thermique et la densité de logements se pose alors.

Le graphique 10 confronte cette densité thermique à la densité de logements des écoquartiers afin de déterminer si ces indicateurs peuvent être corrélés. Ce graphique montre que les deux réseaux de chaleur ont une densité thermique très proche alors que la densité de logements de l'écoquartier 4 est quasiment le double de celle de l'écoquartier 5.

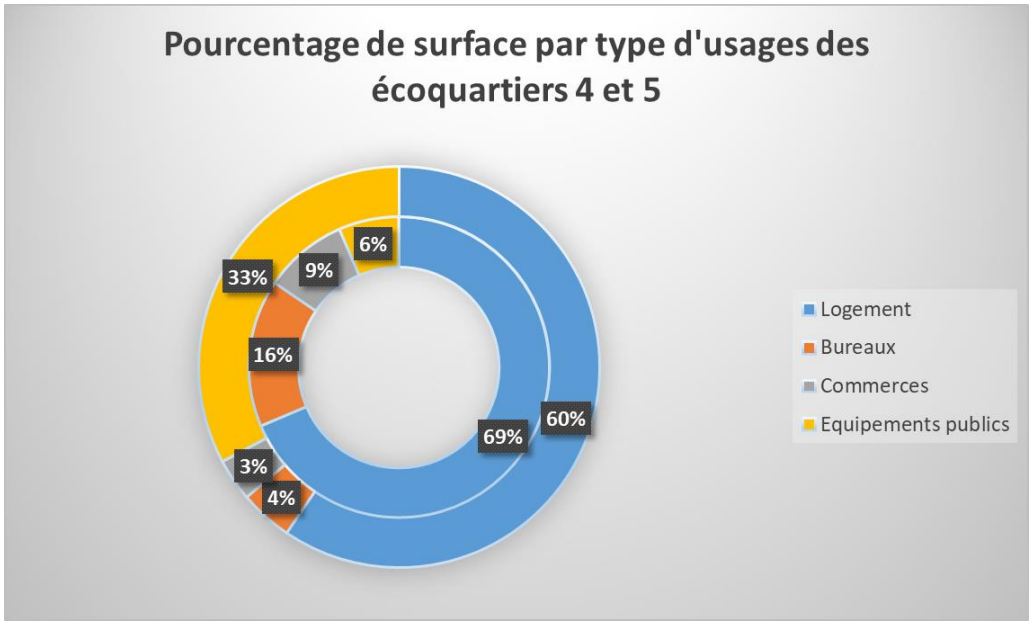


Graphique 10: Densité de logements et densité thermique des cas 4 et 5

Malgré qu'il n'y ait pas de lien direct entre ces deux indicateurs, ce graphique laisse supposer que le taux de raccordement de ces réseaux de chaleur peut être un facteur explicatif. Un approfondissement de cette hypothèse serait nécessaire.

- **Superficie des bâtiments et mixité d'usages**

Les deux écoquartiers étudiés sont bien différents du point de vue de leur mixité d'usages. En effet, si les deux possèdent une part majoritaire de logements (plus de 60 % dans les deux cas), le poids des autres types de locaux diffère. Ainsi le graphique 11 montre une proportion très importante des équipements publics au sein de l'écoquartier 5 pour une part très faible de bureaux et de commerces, alors que l'écoquartier 4 possède davantage de bureaux (16%) que de commerces ou d'équipements publics.



Graphique 11: Mixité d'usages des écoquartiers 4 et 5

Mise à part le logement qui a la même proportion dans les deux cas, l'un des écoquartiers est fortement impacté par les besoins de chaleur de ses équipements publics alors que l'autre est plutôt impacté par les besoins des bureaux. Ce sont donc ces usages qui sont déterminants dans le dimensionnement des réseaux de chaleur de ces écoquartiers. Or, les bureaux et équipements publics ne présentent pas les mêmes profils de consommation journalière, ce qui influence la courbe de charge de ces réseaux. Comme dans la partie précédente, un approfondissement de l'impact de la courbe de charge sur les performances des réseaux semble nécessaire.

4.4. Synthèse des analyses portées sur les réseaux de chaleur créés ex-nihilo et étendus ou existants

Trois cas de réseaux de chaleur créés ex-nihilo dans des écoquartiers ont été analysés d'un point de vue technique et économique en s'appuyant sur plusieurs indicateurs définis en partie 4.1. Il ressort de cette analyse qu'économiquement, ces projets sont tous viables, comprenant une VAN positive, un TRI supérieur au taux d'actualisation et un taux d'enrichissement en capital supérieur à 10 %. En revanche, en comparant le coût actualisé de l'énergie de ces différents cas avec le benchmark effectué par le World Energy Council (SALVATORE 2013), la production d'énergie des réseaux de chaleur étudiés apparaît légèrement plus onéreuse que les moyens de production de chaleur observés par le WEC. Ce résultat peut toutefois être relativisé lorsque les aides perçues sont prises en compte avec une baisse du coût de l'énergie d'environ 20 %.

Un autre facteur explicatif serait la montée en charge du réseau très longue, liée au temps nécessaire à la livraison de l'ensemble des bâtiments de l'écoquartier, qui détériore ce coût en retardant les besoins d'énergie malgré l'investissement réalisé initialement.

Le prix moyen de vente de la chaleur est, quant à lui, défavorable aux réseaux de chaleur créés ex-nihilo. En effet, il est supérieur d'environ 10 % à la moyenne pour une part fixe de 20 % à 50 % plus élevée que la moyenne des réseaux mobilisant plus de 50 % d'énergies renouvelables.

D'un point de vue technique, ces trois réseaux présentent des durées de fonctionnement d'environ 1100 h contre 1360 h pour la moyenne des réseaux enquêtés par le SNCU. Cela traduit donc un surdimensionnement des installations de production dans ces écoquartiers, comparativement à une moyenne des réseaux en France plus optimisée. Cela est principalement dû à une production d'énergie moyenne de ces réseaux inférieure à la moyenne nationale, avec moins de 10 000 MWh livrés dans ces trois cas contre 37 000 MWh environ sur 607 réseaux enquêtés par le SNCU (SNCU 2015).

En ce qui concerne la densité de logements, il semblerait d'après les cas étudiés, qu'elle n'influence pas directement la viabilité des projets de réseaux de chaleur. En effet, aucun lien n'a pu être établi entre les densités thermiques des réseaux de chaleur et les densités de logements des écoquartiers, ni même entre les densités thermiques et la superficie de ces écoquartiers.

Enfin, la mixité d'usages qui est couramment mise en avant comme critère de performance n'a, dans les cas étudiés, pas réellement d'impact sur le fonctionnement des réseaux. La notion de taille critique ou de mixité d'usages optimale reste cependant à préciser. Il convient alors de veiller au bon dimensionnement des installations vis-à-vis des investissements réalisés.

Concernant les deux cas étudiés de réseaux de chaleur étendus à un écoquartier ou déjà existant, l'analyse des mêmes indicateurs mène à des conclusions plus favorables que pour les réseaux créés ex-nihilo.

L'analyse économique met en avant des VAN positives pour les deux cas étudiés, des TRI supérieurs aux taux d'actualisation et un taux d'enrichissement en capital nettement supérieur au 10 % minimum conseillé. De plus, les coûts actualisés de l'énergie, calculés pour ces réseaux, sont dans la moyenne basse des coûts observés par le WEC (SALVATORE 2013) pour des installations de production de chaleur.

Finalement le prix moyen de vente de la chaleur est supérieur à la moyenne des réseaux enquêtés par le SNCU pour l'un des cas mais inférieur pour le second. En revanche, concernant la part fixe de la facture, les deux réseaux sont supérieurs à la moyenne des réseaux mobilisant plus de 50 % d'énergies renouvelables.

Par ailleurs, l'analyse technique révèle des durées de fonctionnement inférieures aux 1360 h pour la moyenne française, faisant apparaître un surdimensionnement des installations de production de chaleur dans ces deux réseaux.

5. Retours d'expériences

Cette partie repose sur les huit retours d'expériences qui ont pu être étudiés, de collectivités essentiellement, ayant réalisé un réseau de chaleur au sein de leur écoquartier. Les retours d'expériences sont synthétisés ici afin d'apporter une analyse qualitative et permettre une prise de recul sur les données exposées dans les parties précédentes.

5.1. La puissance souscrite par les bâtiments

Comme l'explique la partie 4.1.2, l'ajustement de la puissance installée est essentiel pour l'équilibre financier du réseau. Lors des entretiens, deux collectivités ont mis en évidence un problème de calcul de puissance nécessaire par les promoteurs/bailleurs pour leurs bâtiments. En effet, la puissance installée par le réseau est issue d'une négociation entre l'exploitant et les maîtres d'ouvrage des bâtiments.

Une collectivité a mentionné un écart allant jusqu'à 30 voire 40 % entre la souscription et ce que le bâtiment a réellement consommé. Dans ce cas, le maître d'ouvrage avait souscrit une puissance plus élevée que nécessaire afin de garantir la couverture des besoins quelles que soient les conditions d'usage. Mais un écart aussi important n'est pas soutenable du point de vue de l'exploitant qui investit dans des capacités de production alors inutilisées. Il y a eu une renégociation qui a conduit à une baisse d'environ 1MW des installations de production.

Comme l'atteste une autre collectivité, cette négociation est délicate et décisive sur l'avenir du réseau. Pour mener à bien cette opération, elle a opéré en trois temps. Elle a commencé par faire estimer par un bureau d'étude spécialisé lors de l'étude de faisabilité du réseau de chaleur, la puissance nécessaire pour les bâtiments prévus. Ensuite, la collectivité s'est dotée d'un accompagnement par un second bureau d'étude pour la rédaction des contrats et le suivi du démarrage du réseau. Enfin, les différents bureaux d'études ainsi que l'exploitant ont confronté leurs visions afin de se mettre en accord sur une puissance à installer.

Un dernier retour d'expérience, d'une collectivité gérant son réseau en régie, a montré qu'il était possible de faire converger les visions des différents acteurs lors de l'élaboration du projet. Pour ce faire, toutes les problématiques liées à la création d'un réseau de chaleur ont été abordées en amont et partagées par toutes les parties prenantes. De plus, le réseau bénéficie d'un prix de la facture compétitif qui rend cette solution avantageuse.

5.2. La production de froid associée

L'étude ne portait pas spécifiquement sur la production de froid car elle est encore trop peu fréquente dans les réseaux au sein d'écoquartiers. Néanmoins, dans l'un des cas étudié, un tel système a été mis en place ce qui n'a pas été sans poser de difficultés. En effet, la collectivité a mentionné lors de l'entretien « ne pas être prête à refaire un même type de réseau de chaleur, au final plus coûteux que le service rendu ». Les difficultés principales venaient du fait que les quelques abonnés à cette solution de rafraîchissement souhaitaient avoir une température constante de 20°C et que les besoins en puissance souscrite ont cette fois ci été sous-dimensionnés par rapport aux besoins réels.

La solution proposée est du free-cooling (rafraîchissement passif avec un échangeur thermique entre une boucle d'eau « fraîche » pompée sur nappe et une boucle d'eau « chaude » provenant des locaux à rafraîchir). La capacité de rafraîchissement est de l'ordre de 7°C par rapport à la température extérieur. Lorsque cette dernière dépasse les 27°C, les abonnés se plaignent de la chaleur créant ainsi une frustration. La collectivité estime qu'une meilleure communication aurait pu/dû être mise en place pour expliquer aux riverains que la solution de rafraîchissement n'offre pas les mêmes services qu'un réseau de froid, ce qui semble être attendu par les usagers.

L'écoquartier offrant une grande mixité d'usage, le second problème rencontré est la question de la sécurisation d'installations telles que des serveurs informatiques, qui nécessitent un rafraîchissement constant important, ainsi que la question d'hygiène dans des locaux médicaux. La solution de rafraîchissement a donc répondu à ces besoins mais seuls ces locaux ont été desservis et les résidents ne comprennent pas pourquoi cela n'a pas été étendu à l'ensemble des bâtiments concernés.

De plus, cette solution est relativement coûteuse du point de vue de la collectivité et difficile à mettre en place ou à étendre pour satisfaire davantage d'abonnés car il faut créer une seconde boucle ou installer des systèmes de rafraîchissement au niveau des sous-stations. La métropole s'interroge donc sur l'extension de cette solution car elle pressent une demande de l'exploitant pour la révision à la hausse du prix facturé.

5.3. L'innovation dans la production de chaleur

L'un des projets étudiés comporte la première installation de production de chaleur en France basse température, alimentée par une nappe d'accompagnement. Ce type de nappe se distingue des nappes phréatiques par une « boursouflure » du fleuve qui s'engouffre en vase communiquant dans cette nappe et non pas en vase clos. Ainsi la température moyenne est de 15°C été comme hiver, permettant le rafraîchissement ainsi que la production de chaleur associée à une pompe à chaleur.

Bien que l'idée soit intéressante, le seul délégataire s'étant proposé pour construire et exploiter ce réseau n'avait aucune expérience sur ce type de réseau et de nombreux problèmes sont apparus. Ce réseau étant une première, la collectivité ainsi que l'exploitant ont eu de grandes difficultés à trouver des retours d'expériences. L'exemple le plus marquant de problème rencontré a été la fuite de nombreux manchons de tuyaux, qui n'ont pas supportés la pression lors de la mise en service. De plus, cette innovation s'est avérée couteuse. Le réseau de chaleur propose ainsi un tarif peu compétitif car très proche de celui du gaz.

5.4. Les retards de livraison des bâtiments

Parmi les retours d'expériences les plus fréquents, le retard de livraison de bâtiments au sein des écoquartiers arrive en tête, avec une collectivité sur deux qui ont eu ce type de désagrément. Les conséquences en revanche varient sensiblement selon les cas. Une collectivité a déploré des retards pour certains bâtiments allant jusqu'à 2 ans. Un tel délai implique des retombées financières négatives à cause d'absence de recettes. L'exploitant a donc demandé à la collectivité une révision du prix, qui n'a pas été acceptée par la collectivité tant que le fonctionnement du réseau n'était pas fortement impacté.

D'autres collectivités limitent les conséquences des retards de livraison de bâtiments en réagissant assez en amont pour adapter la mise en service et la construction des installations de production. C'est le cas pour l'un des écoquartiers étudié, qui a demandé le report de la construction de la troisième chaufferie tant que les deux précédentes n'étaient pas à pleine charge. Il a même été envisagé dans ce cas d'installer cette troisième chaufferie mais avec une puissance moindre pour en ajouter, quand elle serait nécessaire, une quatrième, afin d'atteindre la puissance inscrite dans le contrat. Cette décision a été validée en comité de pilotage par la collectivité, le contrat le permettant.

Enfin, il arrive que les bâtiments soient livrés avec très peu de retard (quelques mois) ne nécessitant pas d'actions particulières ou encore que certains bâtiments aient du retard mais compensé par des raccordements qui n'étaient initialement pas prévus.

5.5. La communication et l'information autour des réseaux de chaleur

Une bonne communication autour des réseaux de chaleur, qu'elle soit interne ou externe à l'équipe projet, est importante pour une meilleure acceptabilité du projet par le public et une meilleure prise en compte des différentes problématiques liées à leur mise en œuvre. Ainsi, deux exemples de collectivités illustrent l'intérêt que représente une bonne communication.

L'un des interlocuteurs a mentionné lors de l'entretien, une très bonne flexibilité de l'exploitant qui s'est adapté aux contraintes de l'aménageur, notamment concernant le tracé du réseau ou l'implantation des chaufferies. Ces acteurs ont pu s'organiser au mieux grâce à de nombreuses réunions techniques pilotées par la collectivité avec des acteurs constructifs. Pourtant, tout ne s'est pas déroulé comme prévu. Une extension, qui n'était pas initialement programmée, devait traverser des lots privés et nécessitait le déplacement de puits de captage de pompe à chaleur. Ces échanges fréquents ont permis de dénouer le problème pour parvenir à réaliser cette extension. Enfin, ce qui a également aidé au bon déroulement du développement de ce réseau a été un maître d'œuvre unique pour l'exploitant et l'aménageur faisant le lien entre les différentes parties.

Dans un autre cas, un problème de communication de la collectivité avec les constructeurs a été constatée. Le problème rencontré ici, venait des ventilations double flux installées dans ces logements qui ne fonctionnaient pas correctement et entraînaient une consommation de chaleur plus importante que prévu. Avec du recul, la collectivité estime que ces difficultés auraient pu être limitées en impliquant davantage les gestionnaires de bâtiments, voire en les formant sur le fonctionnement des réseaux de chaleur de sorte à limiter les dérives.

5.6. Les contrats et aspects financiers

Lors des entretiens ont pu être évoqués les contrats et aspects financiers. Dans l'un des cas, le maître d'ouvrage, une fois le contrat signé, s'est donné peu de moyen pour contrôler et vérifier les différents termes de l'accord donnant lieu à certaines dérives financières. Est également mise en cause la méconnaissance de la comptabilité privée par la puissance publique, qui n'a pas permis de vérifier dans les relevés annuels les investissements réalisés par l'exploitant ainsi que sa capacité à les assumer.

Un interlocuteur fait état d'un bon dialogue avec les différentes parties prenantes, qui a permis de faire financer les tranchées et la pose du réseau par l'aménageur, refacturé dans le prix de viabilisation des terrains. Cela a permis de ne pas renégocier le contrat de délégation de service public avec l'exploitant lors de l'intégration de nouveaux projets de raccordement, l'impact financier étant mineur.

Enfin, un retour encourageant d'une collectivité qui a réalisé un réseau de chaleur sur deux écoquartiers en décalant les raccordements de deux ans. Ce délai a notamment permis de respecter les dates de livraison des bâtiments. Le fait de mutualiser la production de chaleur de deux écoquartiers a en outre, rendu l'installation plus rentable et compétitive car le foisonnement a pu être ainsi optimisé, ayant pour conséquence une baisse du coût de la chaleur pour les abonnés des deux quartiers.

6. Conclusion

Les écoquartiers sont des aménagements ambitieux qui traduisent la volonté des pouvoir publics d'allier qualité de vie et exemplarité énergétique. Le recours aux réseaux de chaleur relativement fréquent pour répondre aux besoins énergétiques de ces quartiers repose sur un modèle technico-économique qui soulève des interrogations.

L'analyse des différents indicateurs montre que les réseaux de chaleur étudiés sont économiquement viables bien que le prix de vente moyen de la chaleur soit supérieur à la moyenne nationale. D'un point de vue technique, la durée d'utilisation équivalente à pleine puissance de ces réseaux laisse supposer un dimensionnement non optimal des différentes chaudières, ainsi qu'une densité thermique plus faible que la moyenne des réseaux français, mais toutefois supérieure au seuil critique définit par l'ADEME. Enfin, la part d'énergies renouvelables de chacun de ces réseaux de chaleur atteint 70%, permettant une alimentation en chaleur faiblement carbonée répondant totalement à l'engagement 17 de la charte Ecoquartier. Les réseaux de chaleur étudiés semblent donc être une solution pertinente pour les écoquartiers qu'ils alimentent, malgré un équilibre économique fragile lié au surdimensionnement des chaudières ainsi qu'à la densité thermique parfois faible.

Par ailleurs, l'analyse effectuée comporte certaines limites qu'il serait souhaitable d'approfondir. Concernant l'aspect économique, le prix de vente moyen de la chaleur étudié correspond à la facture de l'abonné. Or, l'abonné n'est généralement pas l'usager final qui doit s'acquitter de charges supplémentaires pour la gestion du réseau secondaire. De plus, les logements au sein des écoquartiers sont vendus comme étant moins énergivores. Analyser les factures des usagers finaux des réseaux de chaleur dans les écoquartiers permettrait de caractériser la pertinence économique du point de vue de l'usager. Cela permettrait de constater si les économies d'énergie liées au type de bâtiment des écoquartiers compensent le prix de vente plus élevé.

Plusieurs collectivités interrogées ont signalé un équilibre financier fragile, notamment lié aux dérives des plannings de raccordement de bâtiments. Un travail portant sur l'équilibre financier des phases transitoires dans le développement d'un réseau de chaleur serait utile pour mettre en avant les leviers permettant d'anticiper ces difficultés lors du montage de projet. A ce titre, une comparaison entre la situation économique des réseaux de chaleur lors des différentes phases de développement et la projection du réseau à terme permettrait d'identifier ces leviers.

Cet équilibre financier est également impacté par le surdimensionnement des installations de production d'énergie. Une étude du dimensionnement des installations auprès des exploitants, généralement concepteurs de ces réseaux, éclairerait les déterminants de ces choix. Cela répond-il à des souhaits d'extension, des besoins techniques ou des problématiques propres à la conception des écoquartiers ? Si tel n'est pas le cas, il serait intéressant de dégager des pistes d'optimisation des installations de production et de quantifier l'impact de ces ajustements sur l'équilibre financier.

Enfin, l'étude a montré que la densité de logements des écoquartiers analysés, seule, n'influence pas la densité thermique des réseaux de chaleur. Il serait souhaitable d'analyser également le taux de raccordement des bâtiments aux réseaux de chaleur ainsi que les facteurs influant ce taux pour caractériser l'impact d'un aménagement sur la densité thermique des réseaux de chaleur.

Bibliographie

Rapports :

ADEME. *Chiffres clés - Bâtiment édition 2013.* Valbonne: ADEME, 2013.

AMORCE. *Comparatif des modes de chauffage & prix de vente de la chaleur en 2013.* Villeubanne: AMORCE, 2015.

GUGGEMOS, F. «Chiffres clés de l'énergie - Edition 2016.» Paris: Service de l'observation et des statistiques, février 2017.

Le Dû, S. *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.* Nantes: CEREMA, 2012.

Ministère du Logement et de l'Habitat durable. «Dossier de labellisation écoquartier - édition 2016.» Paris, 2016.

SALVATORE, J. *Cost of Energy Technologies.* World Energy Perspective, Londre: World Energy Council, 2013.

SNCU. *Enquête annuelle sur les réseaux de chaleur et de froid - Rapport 2014.* Paris: SNCU, 2015.

Livres:

BEDDIAR, K. *Solutions énergétiques dans les écoquartiers.* Paris: Dunod, 2015.

CEREMA. *Ecoquartiers, quels enseignements ?* Bron: Editions du CEREMA, 2016.

POPIOLEK, N. *Guide du choix d'investissement.* Paris: Edition d'organisation, 2006.

Sites internet:

ADEME. *Les Fonds Chaleur en bref - Fiche descriptive réseaux de chaleur.* 2017. http://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-chaleur/fonds-chaleur-bref (accès le mars 2017).

MCT, Ministère de la cohésion des territoires. *Les écoquartiers.* 9 décembre 2016. http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/les-ecoquartiers (accès le avril 2017).

Cerema Ouest
MAN – 9 rue René Viviani – BP 46223 – 44262 Nantes cedex 2
Tel : 02 40 12 83 01 – mel : DTerOuest@cerema.fr

www.cerema.fr