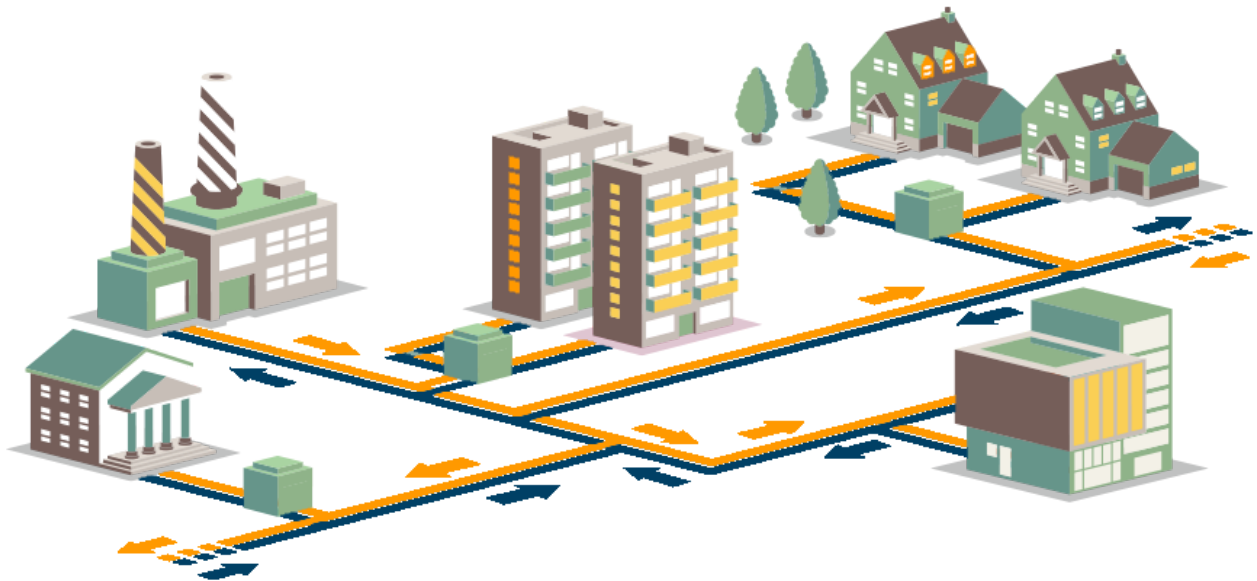


Séminaire de département VET
10 juin 2021



Réseaux de chaleur

- RAPPORT FINAL -



David BEDOYA TABORDA, Antoine BOUQUAHEUX, Juan MONTANI,
Hadrien THEBAULT, Lou VALIDE, Tommaso ZAINI

Sommaire

Sommaire	1
Enjeux du projet	2
Enjeux de décarbonation de la chaleur	2
Le rôle des réseaux de chaleur	2
Etat de l’art et questionnement	4
Données actuelles sur les RCU	4
Dynamique de raccordement	5
Exemples à l’étranger	6
Scénarios existants	6
Problématique du projet	7
Présentation du modèle	8
Schéma du modèle	8
Scénarios étudiés	9
Hypothèses et données d’entrée	9
Limites du modèle	11
Résultats	13
Résultats généraux	13
Émissions de CO ₂ du chauffage à horizon 2050	13
Evolution du mix énergétique	14
Taux de raccordement à atteindre	16
Densité énergétique	17
Recommandations à court terme	19
Propositions de valorisation	21
Annexes	22

1. Enjeux du projet

a. Enjeux de décarbonation de la chaleur

En France, l'un des principaux secteurs générateurs de gaz à effet de serre est celui de l'électricité et du chauffage, notamment dans le secteur résidentiel et tertiaire. Dans son ensemble, le pays compte **36 millions de logements**, qui émettent **12% des émissions annuelles** de gaz à effet de serre nationales, essentiellement via le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (The Shift Project, 2020). Si l'on y ajoute les émissions des bâtiments du secteur tertiaire, elles atteignent 90 Mt CO₂eq en 2017, soit 19 % des émissions nationales. Depuis les années 1990, ces émissions avaient légèrement diminué dans le secteur résidentiel, alors que celles du secteur tertiaire avaient globalement augmenté sur la même période. Cependant, ces dernières années, l'énergie finale consommée a stagné sur l'ensemble du parc, de sorte que les secteurs résidentiels et tertiaires risquent de ne pas tenir les objectifs de réduction des émissions de GES.

Dans ce contexte, une série de mesures à différentes échelles spatio-temporelles ont été prises pour limiter la contribution du chauffage dans les émissions de gaz à effet de serre. Ces mesures, consolidées dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), prévoient un budget carbone de **5 Mt CO₂eq en 2050** pour le secteur bâtiment dans le scénario de référence.

b. Le rôle des réseaux de chaleur

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 ;
- un ensemble de sous-stations d'échange, à partir desquelles les bâtiments sont desservis par un réseau de distribution secondaire.

Les plans de réduction accordent une place particulière aux systèmes de distribution de chaleur ou froid centralisés à l'échelle de quartiers urbains : les réseaux de chaleur et de froid (respectivement RCU et RFU). En effet, ces systèmes présentent plusieurs avantages :

- Ils permettent de mobiliser et même **mutualiser les gisements de certaines énergies renouvelables** (géothermie, biomasse, valorisation de déchets...). Une part importante des réseaux de chaleur peut fonctionner en cogénération, ce qui permet de réaliser des économies d'échelle et d'obtenir de meilleurs rendements.

- Ils offrent des **prix de chaleur stables** (mais variables d'un réseau à l'autre) en raison d'une part importante du coût fixe d'investissement initial. Les contrôles peuvent également être plus fréquents.
- Ils ont un **impact limité sur la qualité de l'air** grâce à la centralisation des systèmes de traitement, qui se traduisent par des réductions importantes de la pollution par unité de chaleur produite.
- Il s'agit d'une **solution flexible**, dans le sens où il est possible de modifier ou augmenter la source d'énergie dans le futur en intervenant sur les chaudières centrales.

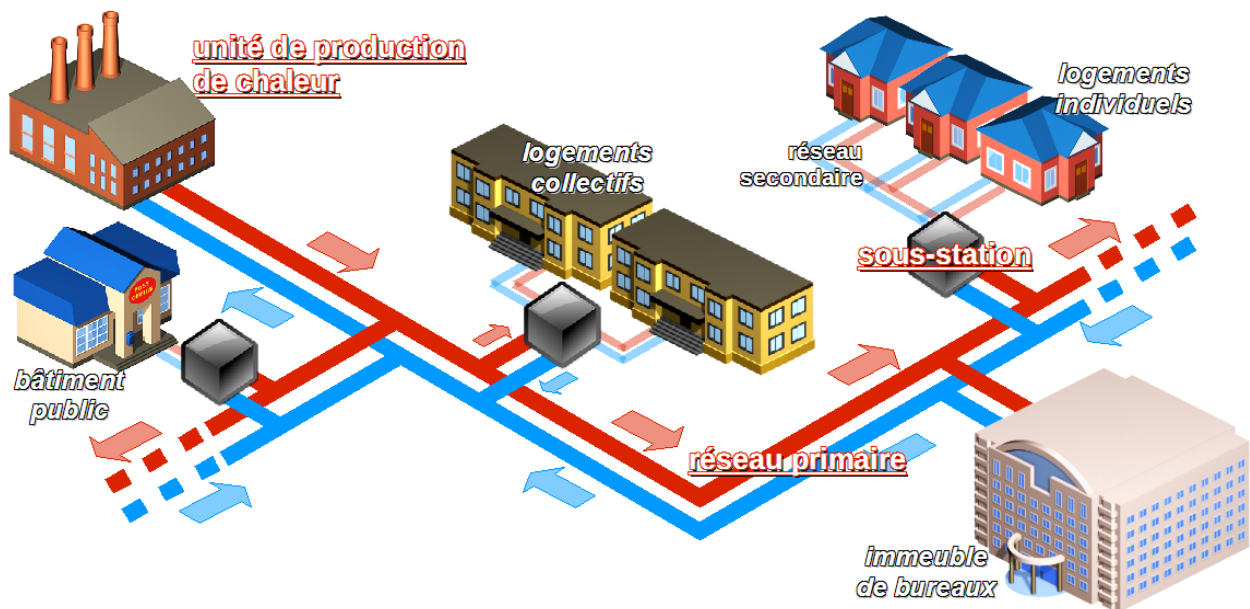


Figure 1. Schéma de fonctionnement d'un réseau de chaleur et de froid (Cerema)

2. Etat de l'art et questionnement

a. Données actuelles sur les RCU

D'après les chiffres du SNCU et de la Fedene, en 2017, les besoins de froid étaient estimés à 19 TWh, tandis que les besoins de chaleur étaient de 741 TWh. Par rapport à ces besoins, les réseaux de chaleur jouent un rôle encore minoritaire, en couvrant seulement 3,5% des besoins totaux et 5% des besoins du secteur résidentiel.

Les réseaux de chaleur ont livré en 2019 **25,6 TWh de chaleur nette**, qui est produite à partir de trois sources principales: le gaz naturel (35% du mix énergétique), les unités de valorisation énergétique (UVE) (25%) et la biomasse (24%). Les 16% restants sont générés par la géothermie (5%), d'autres énergies vertes comme le biogaz et la chaleur industrielle (5,5%) et d'autres énergies fossiles (5,5%), comme le charbon et le fioul.

Ces dernières années, la **part renouvelable** dans le bouquet énergétique est devenue **de plus en plus importante**, passant de 31% en 2009 à **59,4% en 2019**. Le verdissement du mix des réseaux de chaleur a essentiellement été tiré par le développement massif de la biomasse en substitution des énergies les plus carbonées (charbon et fioul). Les secteurs principaux de livraison sont le résidentiel et le tertiaire, qui ensemble constituent 89% de la demande.

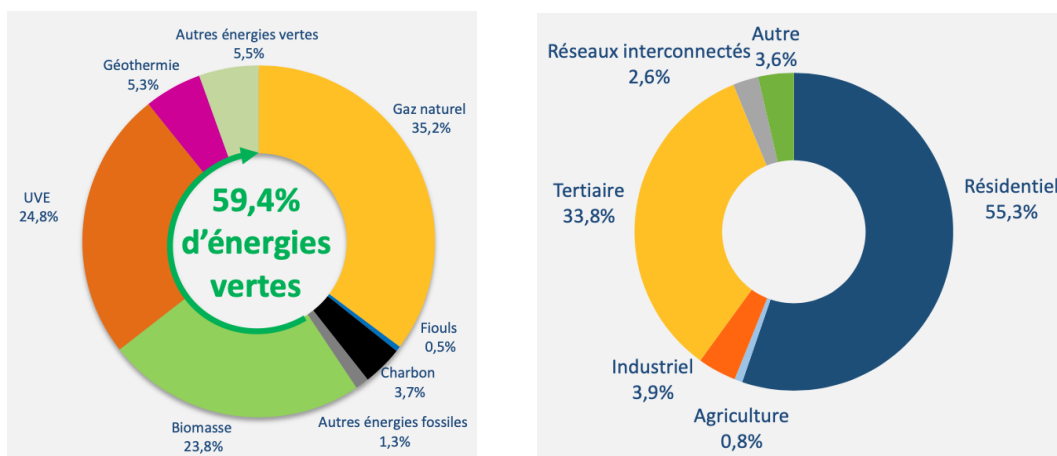


Figure 2. Bouquet énergétique et secteurs de livraison des RCU en 2019 (SNCU, 2020)

Suite au développement des énergies renouvelables dans le mix énergétique, les émissions moyennes de CO₂ par unité d'énergie produite ont constamment baissé : elles ont réduit de moitié entre 2006 et 2019 pour atteindre **107 gCO₂/KWh**.

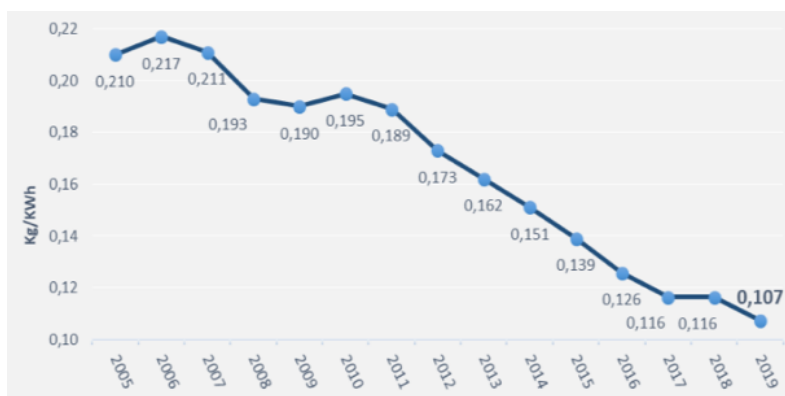


Figure 3. Evolution du contenu en CO2 des réseaux de chaleur en kg/kWh (Fedene & SNCU, 2020)

b. Dynamique de raccordement

Le développement et la montée en puissance du **Fonds Chaleur**, géré par l'ADEME, a permis d'initier une vraie dynamique de développement depuis 2009 avec une augmentation du nombre de bâtiments raccordés et de la longueur de réseau. Néanmoins, aujourd'hui cette dynamique de raccordement s'essouffle et reste inférieure aux objectifs fixés. La tendance actuelle **ne permettra pas d'atteindre les objectifs** (bas ou haut) de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie et de la LTECV.

La création des réseaux de chaleur a connu un pic important en 2015, avec près de 70 RCU créés, mais on observe un **ralentissement très important de cette dynamique de création** depuis. De fait, le nombre de RCU créés en 2019 est resté au même niveau qu'en 2012.

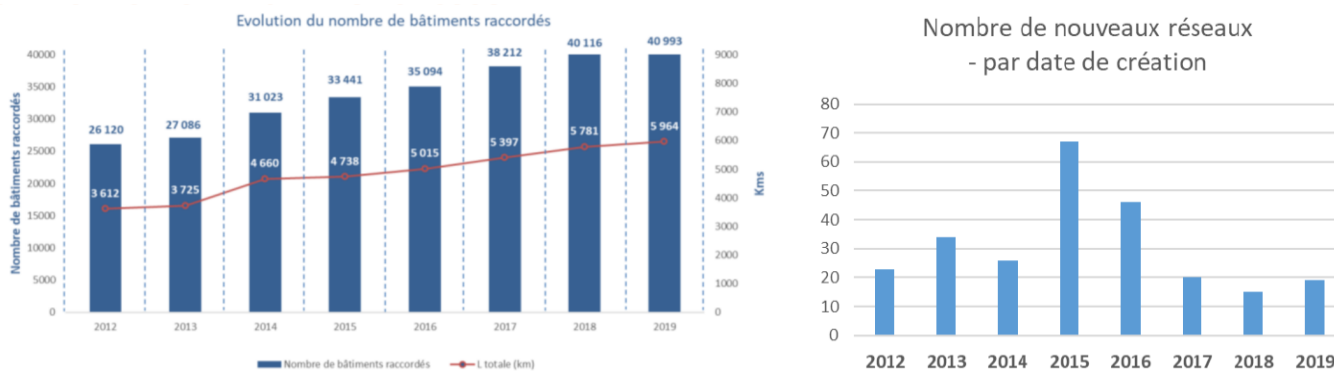


Figure 4. Evolution du nombre de bâtiments raccordés et du nombre de réseaux de chaleur créés entre 2012 et 2019 (Fedene & SNCU, 2020)

c. Exemples à l'étranger

En Europe, le recours aux réseaux de chaleur reste assez marginalisé et localisé principalement dans les pays du Nord (Danemark, Suède, Finlande). Les pays ayant le plus recours aux réseaux de chaleur ne sont pas forcément ceux utilisant un mix énergétique décarboné. En France, le taux de raccordement des bâtiments à un réseau de chaleur EnR&R reste faible (de l'ordre de 6%, pour une **moyenne européenne à 13%** en secteur résidentiel et tertiaire) par rapport à d'autres pays européens (Allemagne 13%, Autriche 18% et Danemark et Finlande à près de 50%)¹. Cependant, la France, malgré son retard dans le développement de ces réseaux, possède à ce jour un des mix énergétiques les plus vertueux.

Le déploiement des RCU au Danemark s'est fait suite aux chocs pétroliers pour **assurer l'indépendance énergétique du pays** et s'est construit avec les collectivités, responsables de leur propre planification de l'énergie thermique. En mobilisant la cogénération, le pays a pu développer de vastes réseaux de chaleur, qui desservent plus de 50 % de la population du pays (cette proportion atteint 90 % pour la capitale Copenhague). Le mix énergétique atteint les 59% d'EnR&R. Le Danemark s'appuie également sur des **mesures légales contraignantes** comme l'interdiction de chauffer à l'électrique dans une zone desservie par un réseau et l'établissement de zones où le raccordement à un RCU est obligatoire. Des **leviers économiques** ont également été mis en place, le dispositif de taxation du pétrole et du charbon couplé à un subventionnement pour la construction d'infrastructures ayant permis la mise en compétitivité de cette technologie. Les réseaux de chaleur sont tous publics ou exploités par des coopératives d'usagers. Le monopole naturel de ces réseaux est contrebalancé par la structure même du budget communal, qui interdit tout transfert entre catégories de dépenses, rendant le secteur à but non lucratif. Cela a eu pour conséquences une plus forte acceptation sociale du chauffage urbain.

d. Scénarios existants

La plupart des scénarios de transition énergétique mettent à l'honneur les réseaux de chaleur et cherchent à les développer. Cependant, les ambitions de raccordement ainsi que les estimations de besoin de chaleur totaux à l'horizon 2050 sont très variables.

Scénarios	Consommation d'énergie dans le résidentiel	Emissions de GES en 2050		Part des RCU dans le mix chaleur	Consommation totale de chaleur
Données actuelles			2010	3% 11 TWh	364 TWh
			2019	5% 14 TWh	280 TWh

¹ Source : ADEME, 2017, Les réseaux de chaleur alimentés par des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R)

Premières estimations AMS (DGEC, 2018)	-51% entre 2010 et 2050	0 émission : neutralité carbone	2050	38% 68 TWh	178 TWh
Scénario énergie - climat 2035-2050 (ADEME, 2017)	-44% entre 2010 et 2050	Environ -90 % par rapport à 2010)		18% 37 TWh	204 TWh
Scénario négaWatt 2017-2050 (négaWatt, 2017)	-70% entre 2010 et 2050	0 émission : neutralité carbone		9% 10 TWh	108 TWh
Scénario AMS (SNBC & PPE, 2019)	-57% entre 2010 et 2050			13% 20 TWh	155 TWh

Tableau 1. Objectifs des différents scénarios à horizon 2050

e. Problématique du projet

Cet état de l'art nous a permis de connaître l'utilisation actuelle des réseaux de chaleur, la dynamique de raccordement associée, les scénarios projetés par les différentes organisations ainsi que des exemples de développement dans des pays voisins. La problématique que nous nous sommes posés est la suivante :

Dans quelle mesure les réseaux de chaleur peuvent-ils contribuer à la décarbonation du chauffage à l'horizon 2050 ?

Nous allons donc chercher à estimer le développement possible des réseaux de chaleur en modélisant les nouveaux raccordements ainsi que l'évolution du mix énergétique qui approvisionne ces réseaux. En jouant sur différents paramètres, nous chercherons à savoir ce qu'il est possible de faire à travers le développement des RCU et si cette massification pourrait permettre d'atteindre certains objectifs de transition énergétique, principalement en termes de réduction des émissions de CO₂ associées au chauffage.

3. Présentation du modèle

a. Schéma du modèle

Le résultat sortant de notre modèle sont les **émissions de CO₂** du secteur du chauffage à l'horizon 2050 en fonction de différents scénarios. Une première donnée importante pour notre travail était l'estimation des **besoins de chaleur** à horizon 2050, qui nous a été fournie par le groupe travaillant sur ce sujet (sur la base de 3 scénarios climatiques différents). Nous avons ensuite dû modéliser et faire des hypothèses sur deux axes :

- Le **raccordement des logements** (neufs et existants) aux réseaux de chaleur,
- L'évolution du **mix énergétique au sein de ces réseaux de chaleur**.

A partir des besoins de chaleur, croisés avec les premiers résultats de raccordement, nous avons pu estimer l'évolution des besoins au sein des RCU et ainsi poser des hypothèses sur le changement du mix énergétique (les besoins nouveaux étant plus systématiquement pris en charge par des ENR&R par exemple).

Légende

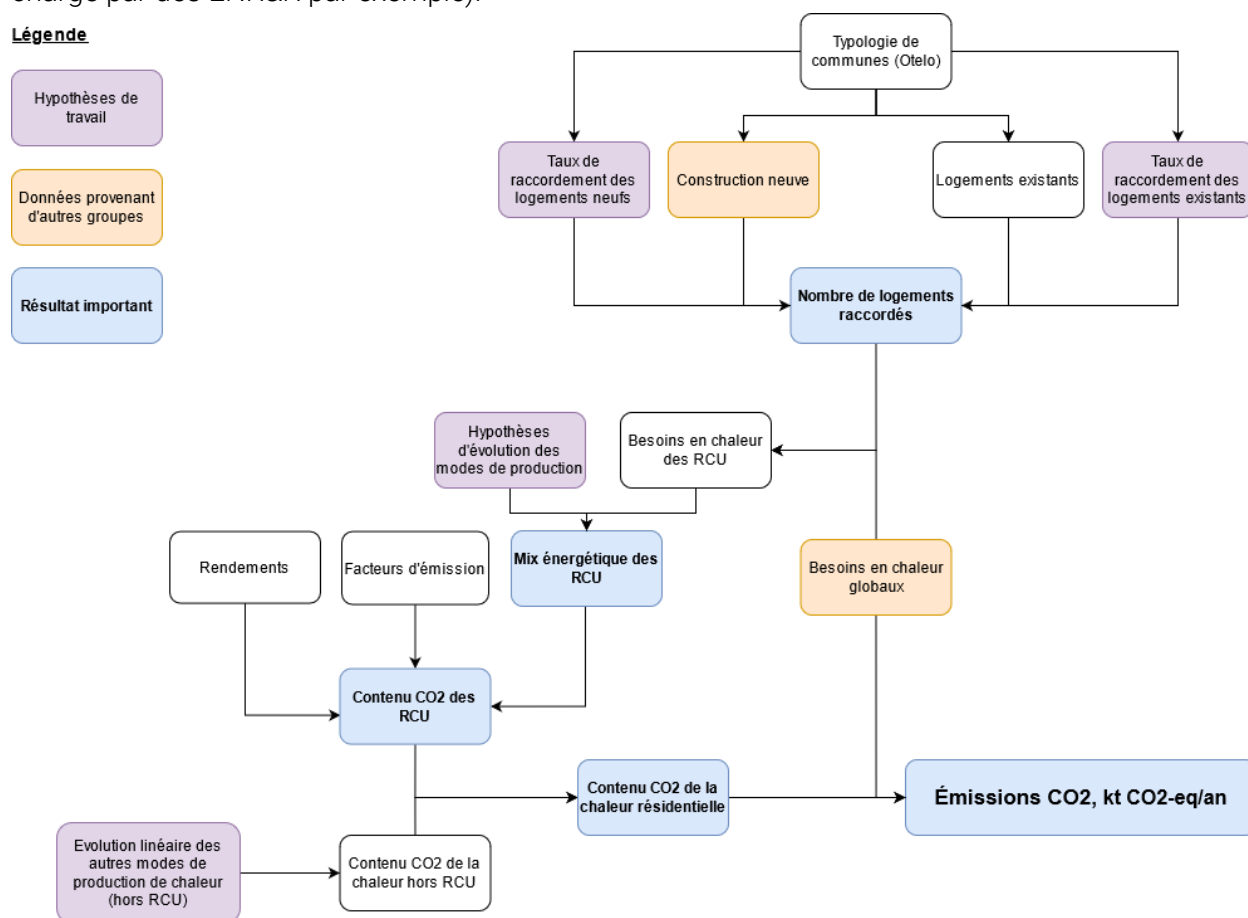


Figure 5. Schéma de fonctionnement du modèle

b. Scénarios étudiés

Nous avons décidé de développer 3 scénarios, avec des hypothèses différentes :

- **Scénario tendanciel** : évolutions linéaires des tendances actuelles (en termes de raccordement mais également pour le mix énergétique).
- **Scénario volontariste** : l'évolution du mix énergétique est fondée sur les tendances actuelles, mais avec un changement progressif de ces tendances pour une transition plus rapide. On pose l'hypothèse de raccorder 50% des logements potentiellement raccordables (logements possédant déjà un système de chauffage collectif) dans les grandes villes d'ici 2050.
- **Scénario ambitieux** : ici l'évolution du mix énergétique s'écarte des tendances actuelles, nous visons une augmentation maximale de la part des EnR&R. On pose cette fois-ci l'hypothèse de raccorder 80% des logements potentiellement raccordables dans les grandes villes d'ici 2050.

c. Hypothèses et données d'entrée

Pour l'axe raccordement, nous avons besoin d'émettre des hypothèses différenciées selon les typologies de communes. En effet, les réseaux de chaleur sont adaptés et efficaces en milieu dense. Afin de pouvoir travailler en synergie avec le groupe *Construction neuve*, nous avons donc choisi de reprendre comme eux la **typologie du modèle OTELO** ainsi que les différentes données de nombres de logements et densités de population qui y sont associées. Nous avons donc 7 types de communes différentes, dont le détail est donné [en annexe](#). Nous avons ensuite pu agréger certaines **données par communes du Cerema sur les RCU** pour connaître le taux de raccordement actuel par typologies de communes, ainsi que les potentiels de raccordement. Pour cela, nous avons utilisé les données sur le nombre de logements qui fonctionnent avec un système de chauffage centralisé : les logements n'en disposant pas sont beaucoup plus difficilement raccordables. Nous avons donc pu estimer un premier **potentiel maximal** de raccordement (des logements existants) par typologie, correspondant au taux de logements en chauffage centralisé moins le taux de logements déjà raccordés à des RCU. A partir de ce potentiel maximal, nous avons pu élaborer nos différentes hypothèses selon les scénarios (également détaillées [en annexe](#)). Nous avons également posé des **hypothèses de raccordement des logements neufs**, que nous avons pu croiser avec les résultats des projections du groupe *Construction neuve*. A partir des ces différentes données et hypothèses, nous pouvions donc estimer le nombre de logements raccordés à différents horizons temporels.

En croisant les résultats de raccordement aux projections de besoins de chaleur, nous connaissons les besoins en chauffage des RCU. Il est ensuite nécessaire de savoir quels moyens de production on attribue à cette chaleur : c'est là que le mix énergétique de la production de chaleur pour les RCU entre en jeu dans la modélisation. Le modèle fonctionne sur une **base annuelle** en examinant combien de capacité devra être ajoutée en fonction des besoins calculés

initialement : ces **nouveaux besoins** seront, dans la mesure du possible, **affectés à des énergies renouvelables**. En outre, selon les scénarios, on **transforme une partie de la production fossile** en énergies renouvelables. Les calculs sont effectués année par année, il est donc possible d'observer dans le modèle l'effet de la **vitesse de mise en œuvre des différentes politiques**.

Ainsi, le modèle étudie le potentiel qui peut être installé année par année et attribue à l'un des modes de production une augmentation ou une diminution en fonction du scénario étudié. Ensuite, grâce aux contenus CO₂ de chaque mode de production, on obtient les émissions de CO₂ associées. Le modèle met en œuvre des stratégies différentes pour chacune des méthodes de production, ce qui lui confère une **flexibilité** marquée. Il prend également en compte des **valeurs maximales de production** pour chaque mode, qui rendent l'augmentation de chaque mode plus compliquée quand on s'en approche, afin de gagner en réalisme.

Afin d'établir les hypothèses d'augmentation de la production de certaines méthodes renouvelables, nous nous sommes basés sur leurs différents avantages et inconvénients qui sont rappelés ci-dessous.

SOURCE	ATOUTS	INCONVENIENTS
Géothermie	● Faible coût d'exploitation ● Innovation (performances des technologies, durée de vie, nouvelles technologies)	● Coût d'exploration élevé ● Risque géologique ● Coût d'investissement (et durée d'amortissement) élevés
UVE	● Gisement quasi-inépuisable ● Nouvelles technologies ● Potentiel d'augmentation d'efficacité ● Les CSR : un projet ambitieux	● Syndrome NIMBY ● Pas de nouveaux UVE ● Problématiques de pollution de l'air ● Participe à perpétuer le modèle actuel de production de déchets
Biomasse	● Adaptée au RCU ● Valorisation prioritaire sous forme de chaleur ● Orientation privilégié pour les pouvoirs publics ● Priorisation dans les Fond de Chaleur	● Participe à perpétuer le modèle actuel de production de déchets

Tableau 2. Atouts et inconvénients des différentes sources de chaleur des RCU

d. Limites du modèle

Tout d'abord, notre modèle se situe **en bout de chaîne** : il utilise les résultats de plusieurs autres groupes de travail comme données entrantes (groupes *Besoins de chaleur* et *Construction neuve*) et est assez dépendant de leurs résultats. Cependant, comme notre modèle est presque entièrement construit à partir d'un unique tableur, il peut être relativement facile de faire évoluer ces valeurs s'il le faut.

De plus, nous avons rencontré des limites spécifiques à nos deux axes de travail. Tout d'abord, sur la modélisation de l'évolution du mix énergétique :

- Les **facteurs d'émissions de CO₂** de chaque source de production d'énergie sont considérés **constants dans le temps**, alors qu'ils sont très probablement amenés à évoluer (optimisation ou mutualisation qui les feraient diminuer, changement dans la disponibilité des ressources ...), notamment celui des pompes à chaleur (PAC) qui est directement dépendant du mix de production électrique.
- Les facteurs d'émissions des différentes **ENR&R** ont été considérés égaux à **0 gCO₂/kWh** (en suivant les recommandations du SNCU) : cela suppose que ces modes de production sont tout à fait neutres, sans considérer les différentes émissions dues à l'extraction/la production et au transport.
- Enfin, certains résultats sont à revoir en **prenant mieux en compte les différents scénarios climatiques**, qui entraînent une réduction des besoins totaux et parfois même des besoins des RCU malgré une augmentation significative de leur part relative. En effet, nous avons rencontré des difficultés à cause de la non-compatibilité de certaines données à prendre réellement en compte les différents scénarios de besoins et raccordement.

Pour les hypothèses de raccordement, nous avons également rencontré certaines limites :

- Tout d'abord, nous n'avons pas pu réellement prendre en compte le lien entre **raccordement et performance énergétique des logements** : actuellement, beaucoup de RCU se développent avec la construction de nouveaux quartiers et alimentent donc des bâtiments plus efficaces thermiquement parlant. Nous avons pris en compte ce phénomène grossièrement en utilisant un ratio fixe entre la part de logements raccordés aux RCU et la part de chauffage résidentielle fournie par des RCU (qui est donc plus faible), mais cela pourrait être affiné.
- Dans notre modèle nous avons rencontré une véritable difficulté de **prise en compte des limites d'extension des RCU** (avec notamment un seuil de densité énergétique minimal de 1,5 MWh / ml) en raison d'un manque de données. D'une part, elle concerne la longueur totale des réseaux de chaleur. Il existe bien des bases de données du Cerema répertoriant

les RCU par commune², mais ces bases de données, pourtant daté de 2018, affiche des réseaux de chaleur dont la longueur totale s'élève à 3520 km, ce qui est la longueur totale des réseaux de chaleur atteinte 6 ans plus tôt... Via Sèva offre une carte interactive³ bien plus complète et récente, mais il ne propose pas de tableau général. D'autre part, dans les données de la SNCU, il faudrait pouvoir différencier extension et densification parmi les sous-stations raccordées, ce qui aurait pu nous donner une idée des dynamiques actuelles. Il est donc possible que notre modèle surestime les potentiels de raccordement.

Enfin, une des limites principales de notre étude est la non **prise en compte des réseaux de froid**. Les différents scénarios climatiques et les données fournies par le groupe *Besoins en chaud et froid* montrent bien une réelle diminution des besoins en chaleur qui a priori rendrait la massification des RCU moins utile. Cependant, cette diminution s'accompagne d'une augmentation importante des besoins de froid : or il existe des réseaux de chaud et de froid qui exploitent les synergies entre ces deux demandes. Cette double fonctionnalité des réseaux de chaleur et de froid pourrait les rendre d'autant plus intéressants à développer à l'avenir.

² Il est téléchargeable ici :

<https://www.cdata.cerema.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search;jsessionid=0ABD247F6D37FE0127B3EA56956AC658#/metadata/776385ed-13d4-4440-bdae-76c7f25b744f>

³ Via Sèva : Cartographie des réseaux de chaleur et de froid <https://carto.viaseva.org/public/viaseva/map/>

4. Résultats

a. Résultats généraux

Les résultats de la modélisation des différents scénarios permettent d'observer des dynamiques intéressantes, notamment sur le **taux d'ENR&R dans le mix énergétique** des RCU qui atteint plus de 90% pour tous les scénarios. C'est l'**accélération des dynamiques de raccordement** et donc l'augmentation de la part des RCU dans le mix qui enclenche les changements attendus au niveau des émissions et des livraisons à l'horizon 2050. Les **différents scénarios climatiques** influencent les valeurs de livraisons de chaleur mais les tendances observées restent similaires (cf résultats pour le scénarios RCP 8.6 et RCP 4.5 [en annexe](#)).

Scénario RCP 2.6 sans évolution du parc en 2050	2019	Tendanciel	Scénario volontariste	Scénario ambitieux
Livraisons résidentielles RCU (TWh)	13,6	18,1	34,1	58,8
Part des logements raccordés à un RCU	7,11%	9,7%	18,3%	31,6%
Part des RCU dans le mix du chauffage résidentiel	4,7%	6,2%	11,6%	20,1%
Taux ENR&R dans les RCU	57%	91%	93%	95%
Contenu CO ₂ (tonne CO ₂ -eq/GWh)	0.107	0.0222	0.0101	0.0107
Émissions de CO ₂ du secteur chauffage (Mt CO ₂ -eq/an)	48,3	39,0	36,8	33,5

Tableau 3. Principaux résultats de la modélisation (scénario RCP 2.6 sans évolution du parc)

b. Émissions de CO₂ du chauffage à horizon 2050

Les résultats des émissions de CO₂ du chauffage résidentiel à l'horizon 2050 sont dépendants des différents scénarios climatiques et de l'évolution du parc immobilier.

L'évolution tendanciel du mix énergétique des RCU permet de **réduire largement la part de fossile à l'horizon 2050**. La différence entre les différents scénarios se joue notamment sur la vitesse de réduction des parts de fossile dans le mix énergétique, qui sont plus rapidement remplacés par des ENR&R.

On note une différence de **6% des émissions de CO₂ entre les scénarios tendanciel et volontariste**. Le scénario ambitieux permet quant à lui une réduction plus significative de **14% par rapport au scénario tendanciel**.

Les résultats obtenus sont cohérents mais ne permettent pas d'obtenir des résultats à la hauteur des ambitions du gouvernement et du PPE ou du LTECV qui ont les mêmes objectifs mais à l'horizon 2030. Ils dépendent également grandement de l'évolution du parc (voir [annexe](#)).

Emissions totales du chauffage résidentiel en 2050 selon les différents scénarios (avec évolution du parc)

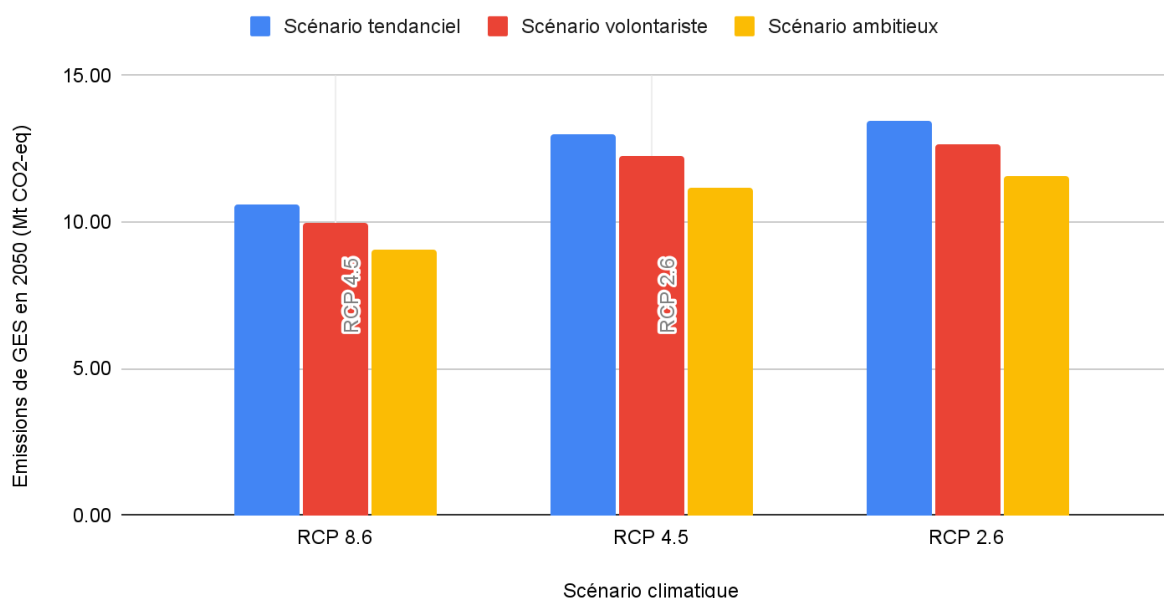


Figure 6. Histogramme des émissions du chauffage résidentiel pour différents scénarios climatiques à l'horizon 2050 avec évolution du parc

c. Evolution du mix énergétique

L'évolution du mix énergétique est basé sur différentes hypothèses qui nous permettent d'obtenir des résultats différents selon les scénarios. Les scénarios tendanciel et volontariste présentent des mix plus ou moins similaires (cf. [annexe](#)). Le scénario ambitieux est beaucoup plus vertueux puisqu'il se base majoritairement sur la biomasse, les UVE et la géothermie.

Le **scénario tendanciel** suit l'évolution du bouquet énergétique des dernières années, selon laquelle toutes les sources renouvelables vont être exploitées de plus en plus et remplacer les énergies fossiles (cf [Figure 7](#)). Ainsi, **l'exploitation de la biomasse croît de manière importante**, devenant la source principale (30,8% avec 12,3 TWh/an de livraison de chaleur), accompagnée des Unités de Valorisation Énergétique (17,5% soit 7,0 TWh/an), dont la production

d'énergie augmente jusqu'à 2022, pour atteindre un plateau lié aux politiques de prévention de déchets actuellement en vigueur et à la difficulté de créer de nouvelles unités. La **part fossile dans le bouquet énergétique diminue progressivement**, avec la quasi disparition du charbon et du fioul en 2030 et la réduction du gaz naturel jusqu'à 1,5 TWh/an, soit seulement 3,7% du mix énergétique. Les autres sources renouvelables, comme la géothermie, le biogaz et la chaleur industrielle, sont de plus en plus exploitées mais jusqu'à des niveaux plus faibles (entre 2 et 4 TWh/an), à cause de leur disponibilité limitée.

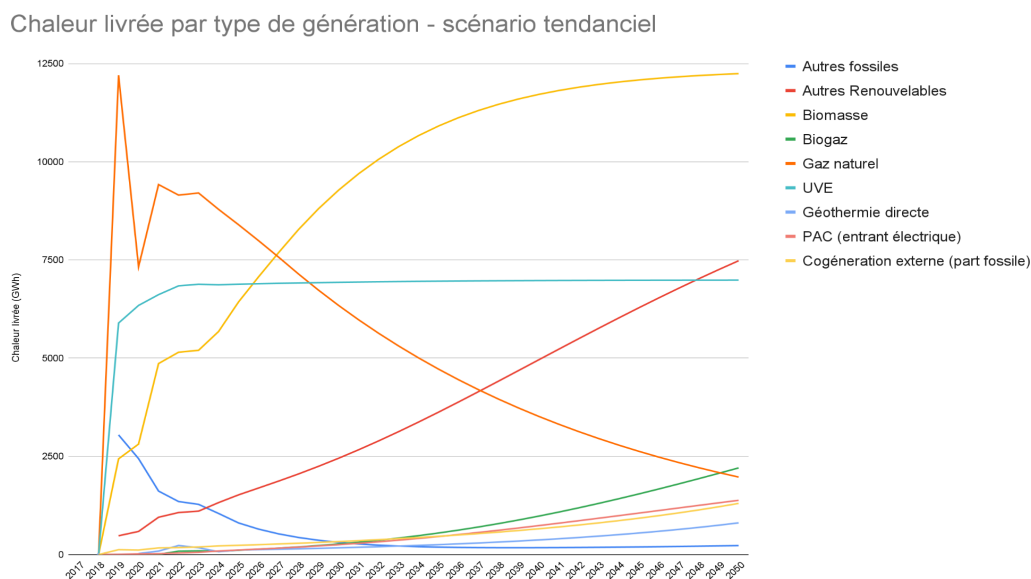


Figure 7. Evolution des différents modes de production au sein des RCU à horizon 2050 dans le scénario tendanciel

Dans le **scénario volontariste** (cf.[annexe](#)), la production des énergies fossiles diminue **plus rapidement** et le gaz naturel sort complètement du mix énergétique juste avant 2050. Ainsi, les émissions de CO₂ liées au chauffage par les RCU, égales à 888 ton CO₂-eq/an en 2050 dans le scénario tendanciel, se réduisent à 439 ton CO₂-eq/an dans le scénario volontariste.

Enfin, pour le **scénario ambitieux** (cf.[annexe](#)), l'exploitation du gaz naturel et des autres **énergies fossiles est arrêtée avant 2032** et le potentiel des énergies renouvelables et de récupération est poussé jusqu'aux niveaux maximaux liés aux contraintes physiques de disponibilité, de telle sorte que la **biomasse augmente très rapidement** pour atteindre son plateau en 2030 et 1/3 de l'exploitation totale en 2050. La production des autres sources telles que la géothermie, la chaleur fatale industrielle et les pompes à chaleur (PAC) aux entrants renouvelables augmente de l'ordre de 0,5 TWh/an chacune, et leur part dans le mix énergétique croît de l'ordre de 1-3%.

Bouquet énergétique - Scénario ambitieux 2050

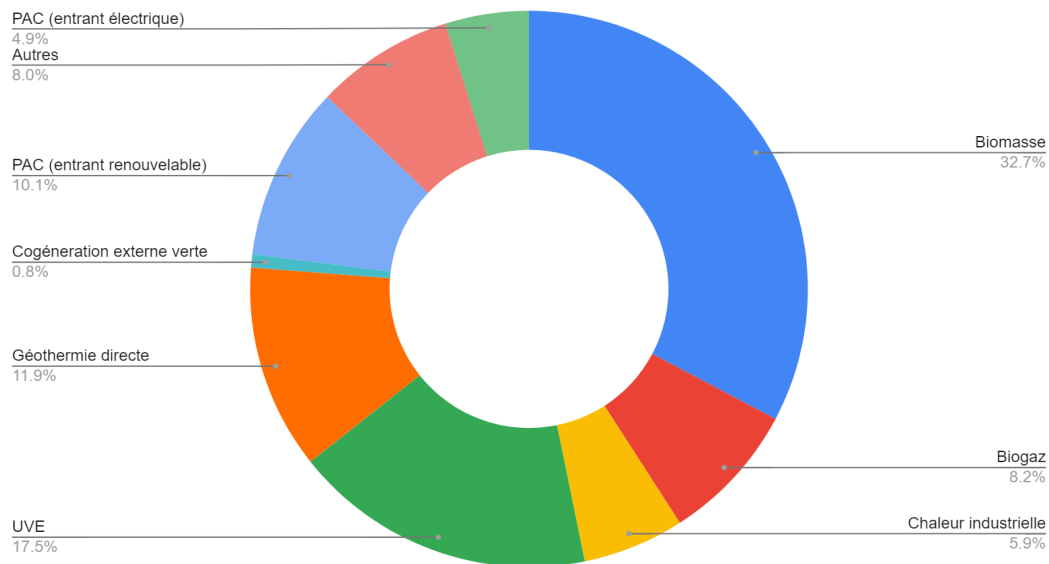


Figure 8. Mix énergétique des RCU pour le scénario ambitieux à horizon 2050

d. Taux de raccordement à atteindre

Avec notre modèle, on obtient que le paramètre qui altère les résultats de manière significative est le **taux annuel de raccordements** des logements existants présentant un chauffage centralisé **pour la typologie 1 - Principaux pôles urbains**. C'est en effet cette typologie qui comprend le nombre le plus importants de bâtiments existants avec un système de chauffage centralisé, et de loin (plus de 8,3 millions, soit la moitié de tous les logements "raccordables") : de fait, même avec un taux de raccordement des logements anciens plus faible que pour la typologie 2 - *Couronne sous influence directe des pôles*, le nombre de logements raccordés chaque année aux réseaux de chaleur dans la typologie 1 est toujours très élevé.

Notre modèle de raccordement est très flexible : en effet, il prend en compte des taux de raccordement aux réseaux de chaleur différents pour chaque typologie du modèle OTELO, et ces taux peuvent être modifiés comme on le souhaite. Cependant, ces taux sont très difficiles à estimer de manière réaliste, même avec les données dont nous disposons sur les réseaux de chaleur.

Malgré cette difficulté, notre modèle donne un aperçu très net de l'ampleur des raccordements à effectuer afin d'atteindre les **objectifs fixés par la LTECV et la SNBC**, tout en éliminant les énergies fossiles de la production de la chaleur délivrée par les réseaux de chaleur. Par exemple, si l'on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de rénovation énergétique du parc immobilier et

si l'on pousse "à fond" le développement des réseaux de chaleur 100 % EnR&R (c'est notre scénario ambitieux), alors les chiffres de raccordement sont les suivants :

- 115 000 logements neufs raccordés par an ;
- 200 000 logements existants raccordés par an.

On raccorde donc de **330 000 logements chaque année** (contre un peu moins de 100 000 en moyenne aujourd'hui), et on aboutit alors à un doublement du nombre de logements raccordés aux RCU entre 2020 et 2030 (une multiplication par 3,5 entre 2020 et 2030) et à un taux de raccordement des logements de 17 % en 2030 (32 % en 2050). La part des RCU dans le chauffage s'élèvent à 10 % en 2030 (20 % en 2050). Ces taux sont relativement satisfaisants, quoique insuffisants devant ceux observés aujourd'hui dans les pays scandinaves. Toujours pour ce même scénario, les livraisons de chaleur des RCU plafonnent à 30 TWh en 2030 et varient entre 45 TWh et 60 TWh en 2050 selon l'évolution des besoins de chaleur dépendant du réchauffement climatique. Au regard de la dynamique actuelle, ces chiffres sont à multiplier à peu près par 2 si l'on souhaite obtenir les livraisons de chaleur totales (les livraisons au secteur tertiaire en particulier). On aboutit alors aux conclusions suivantes :

- Les objectifs de la LTECV de 2015 de 60 TWh de **livraisons totales de chaleur par les RCU** sont en phase avec notre scénario ambitieux (en prenant le scénario climatique RCP 2.6, sans évolution du parc). Au regard de la dynamique actuelle, il va falloir fournir un **véritable effort pour les atteindre**, étant donné qu'ils nécessitent un raccordement massif des logements anciens.
- En ce qui concerne la **part des RCU dans le chauffage total**, elle atteint 11,5 % en 2050 pour le scénario volontariste et même 20 % pour le scénario ambitieux. Ce dernier chiffre est supérieur à l'ensemble des scénarios existants, sauf celui de la DGEC (2018), et est légèrement supérieur au scénario Energie-Climat de l'ADEME (18 %). Le scénario volontariste permet d'atteindre une part des RCU dans la chaleur totale livrée comparable à celle de l'Allemagne aujourd'hui.

En conclusion, les scénarios existants sont atteignables en termes de part des RCU dans le chauffage, mais moins en termes de livraisons totales de chaleur en TWh : les besoins en chauffage à horizon 2030 et 2050 ont sûrement été surestimé par rapport aux estimations que nous a fourni le groupe *Besoins en chaud et froid*.

e. Densité énergétique

Le principal indicateur de performance technico-économique des réseaux de chaleur est la densité énergétique, définie comme le rapport de la quantité d'énergie livrée sur la longueur de réseau. Elle a été très **difficile à estimer** dans notre modèle pour plusieurs raisons. La 1^{re} est que notre modèle calcule la quantité de chaleur livrée par les réseaux de chaleur au secteur résidentiel uniquement, et non la quantité de chaleur totale, livrée également au secteur tertiaire (commerces, bureaux...). Nous l'avons vu, cette quantité de chaleur livrée est beaucoup plus faible

pour les scénarios de réhabilitation thermique que pour les scénarios sans rénovation : ceci influence grandement la valeur de la densité thermique. La 2^{ème} difficulté est l'estimation de la longueur de réseaux ajoutée induite par le raccordement des logements aux réseaux de chaleur, qui peuvent se faire par trois canaux : création, extension, densification. L'extension et la création en milieu peu dense présentent le désavantage d'allonger considérablement la longueur de réseau et de souvent diminuer la densité énergétique, ce que ne fait pas la densification. Nous avons donc estimé pour chaque typologie un "taux de densification" pour les raccordements de logements qui nous apparaît réaliste : ce taux est de fait beaucoup plus important pour la typologie "principaux pôles urbains", qui dispose déjà de linéaires importants et qui peut bénéficier à l'avenir d'opérations de densification à la suite de création ou d'extension de réseaux.

Malgré toutes ces difficultés, nous arrivons à la conclusion que pour l'ensemble de nos scénarios (tendanciel, volontariste et ambitieux), sous l'hypothèse d'une absence de rénovation énergétique du parc immobilier, il y a **franchissement de la limite de densité énergétique de 1,5 MWh/ml vers 2035**. Ce franchissement est même observé avant 2030 dans le cas d'une réhabilitation du parc immobilier, en raison des plus faibles livraisons d'énergie. Ces résultats peuvent être légitimement remis en question au vu de la méthode d'estimation du linéaire de voirie nécessaire aux raccordements des bâtiments par création / extension, mais ils semblent montrer deux choses :

- D'une part, il va de la viabilité des RCU de **privilégier les opérations de densification** plutôt que celles de création ou d'extension de réseaux de chaleur. Une approche plus réaliste pourrait consister à faire varier ce taux de densification dans le temps pour les typologies urbaines, afin de modéliser justement la multiplication d'opérations de densification après créations ou extensions de réseaux.
- D'autre part, **superposer systématiquement le raccordement à un réseau de chaleur et la réhabilitation thermique apparaît peu pertinent**, puisque cela détériore considérablement la densité énergétique. La *Revue de l'énergie* (2020) préconise de privilégier les RCU dans les zones urbaines denses et de couronne (correspondant à la typologie "principaux pôles urbains") et de privilégier la rénovation énergétique dans tous les autres contextes.

5. Recommandations à court terme

Au regard des nos différents résultats, nous proposons les recommandations suivantes :

- **Pour tous les acteurs** : Il ne faudrait pas chercher à associer systématiquement les RCU avec la rénovation énergétique. En complément avec les propositions de la *Revue de l'énergie* (2020)⁴, il faudrait privilégier les RCU dans les zones urbaines denses et de couronne, et la rénovation énergétique dans tous les autres contextes urbains et ruraux, difficilement raccordables à des RCU.
- **Pour les collectivités territoriales** : En ce qui concerne la création de réseaux de chaleur visant à desservir des quartiers neufs, il faudrait privilégier des programmes immobiliers à forte mixité fonctionnelle, qui comportent des bâtiments de plusieurs niveaux, côte à côte, avec bureaux/commerces au rez-de-chaussée et des logements en étages. Selon l'ADEME, de tels programmes peu consommateurs en énergie apportent des densités énergétiques satisfaisantes.⁵ En effet, les besoins de ces différentes fonctions sont complémentaires et permettent donc d'optimiser l'utilisation des réseaux de chaleur.
- **Pour les audits au sein des démarches de classification des RCU** : les démarches de classification des RCU pour la définition de zones prioritaires de développement des RCU devraient être revues pour accélérer un processus de densification en accord avec nos propositions ci-dessus. En effet, pour un RCU à plus de 50% d'EnR&R, à l'équilibre financier et disposant d'un système de comptage de la chaleur en sous-stations, il est possible de définir des zones prioritaires dans lesquelles le raccordement au RCU est obligatoire pour tous les nouveaux bâtiments mais aussi ceux qui subissent une rénovation thermique importante. Nous proposons de revoir cette dernière catégorie : en remplacement des dérogations possibles des obligés, il faudrait imposer par exemple le choix entre le raccordement aux RCU ou la rénovation thermique, afin de garantir des économies d'énergie dans tous les cas. Cela pourrait passer par des audits énergétiques spécifiques à chaque litige, ce qui, nous le concevons, pourrait alourdir les démarches.
- **Pour la promotion de la géothermie** : Nous proposons que des études approfondies visant à accroître les connaissances du potentiel de la géothermie commune par commune en Île-de-France soient effectuées en partenariat avec les collectivités territoriales, car cela les encouragerait à adopter cette source d'énergie. En effet, il n'existe pas d'informations détaillées sur le potentiel de ce type d'énergie pour les RCU, et les coûts d'exploration sont très élevés. Pourtant, il s'agit d'une source d'énergie très prometteuse, aux coûts principalement concentrés au moment de l'investissement et aux impacts écologiques très limités.

⁴ Revue de l'énergie n°652, septembre-octobre 2020, *Promouvoir la chaleur renouvelable, au moins autant que la réhabilitation thermique des logements*

⁵ Avis de l'ADEME sur les réseaux de chaleur alimentés par des énergies renouvelables et de récupération (EnR&R), 2017

- **Pour le Fonds Chaleur et les collectivités territoriales** : Il nous paraît indispensable de maintenir le Fonds Chaleur au moins jusqu'en 2035. Cependant, afin de garantir un passage à des livraisons de chaleur 100 % EnR&R sur tout le secteur des RCU, nous proposons de renforcer les critères d'éligibilité au Fonds Chaleur **dans le temps**. Pour prétendre au Fonds Chaleur, les projets de RCU devraient s'engager à court terme à atteindre 50 % de livraison de chaleur EnR&R, et à plus ou moins long terme, ils devraient s'engager à atteindre progressivement 100 % de livraisons EnR&R. Ces engagements passent par des schémas directeurs mis en place par les collectivités, obligatoires pour être éligible au Fonds Chaleur. Aujourd'hui, les réflexions des schémas directeurs se portent sur 10 ans⁶ : il nous apparaît important d'imposer un nouveau schéma directeur, 5 ans après la construction du RCU par exemple, afin de prévoir sur le reste de la durée de vie du RCU avant rénovation (20-30 ans en tout) une transition vers du 100 % EnR&R.

⁶ AMORCE, *Guide de réalisation d'un réseau existant de chaleur ou de froid*

6. Propositions de valorisation

Le développement des RCU doit contribuer à l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de GES à l'échelle nationale. Nos analyses pourraient donc être utiles dans les différentes **feuilles de route de la France** pour réduire les émissions de carbone, mais aussi dans les feuilles de routes qui cherchent à développer, consolider et adapter les différentes sources d'énergie (comme par exemple la Stratégie National de Mobilisation de la Biomasse).

Notre projet s'inscrit déjà dans le **Plan de Transformation de l'Économie Française** (PTEF) mené par le Shift Project, qui vise à proposer des solutions pragmatiques pour la décarbonation. Le PTEF prend en compte l'ensemble des secteurs économiques, dont beaucoup sont en relation avec les RCU. Le Shift Project pourra donc examiner l'impact des résultats obtenus sur les différents flux physiques et économiques pris en compte dans le PTEF, et donc aider à assurer une cohérence d'ensemble des pistes ici développées. De plus, nos résultats étant disponibles sous forme de tableur, les hypothèses et données d'entrée pourront être modifiées afin de tester des scénarios différents de ceux que nous avons considéré. Les modèles pourront également être affinés.

Nos analyses peuvent également servir à alimenter le débat public et à **informer les acteurs sectoriels**, locaux et territoriaux. En effet, elles fournissent des ordres de grandeur de quelques chiffres clés (taux de raccordements, besoins énergétiques, part de chauffage avec potentiel d'être servi par les RCU, mobilisations de sources d'énergie, bilan carbone). En plus, l'analyse pourrait également être utile pour mettre en évidence les **conditions nécessaires pour la mise en œuvre et la réalisation de certains objectifs**. Pour y parvenir, nous avons pensé à avoir des échanges directes avec des agences publiques, telles que l'Ademe, ou avec des élus locaux. Dans le même ordre d'idées, des échanges avec les syndicats propres au secteur tels que la Fédération des Services Énergétiques de l'Environnement (FEDENE) et le Syndicat National du Chauffage Urbain et de la Climatisation Urbaine (SNCU) pourraient être envisagés.

Enfin, dans un souci d'accessibilité et de communication autour de notre projet, nous avons décidé de présenter nos résultats sous un **format clair et lisible** qui permet de faire varier certains paramètres clés et d'en voir l'influence sur les différents résultats. Notre feuille Grid est disponible [ici](#). Elle n'était pas encore tout à fait finalisée lors de la rédaction de ce rapport.

Annexes

Annexe 1 - Typologie de communes (données OTELO) et données sur les RCU associées (données du Cerema agrégées par nos soins)

TYPOLOGIE DE COMMUNES (OTELLO)	1	2	3	4	5	6	7	Ensemble des communes
	Principaux pôles urbains	Couronne sous influence directe des pôles	Couronnes résidentielle des pôles	Espaces ruraux et urbains en perte d'attractivité	Espaces ruraux attractifs et dynamiques	Espaces ruraux à dominante agricole	Espaces ruraux de villégiature	
Nombre de communes	954	1359	7194	6980	7880	6253	5831	36451
Densité de pop moyenne hb/km2 (2012)	2712	260	133	102	61	56	40	156
Part des résidences principales dans les logements (2013)	88%	88%	85%	74%	81%	84%	55%	77%
Parc de logements (2013)	12,695,283	1,670,272	4,191,128	5,350,750	2,714,387	1,781,657	3,421,676	31,825,153
RACCORDEMENT RCU (Cerema)								
Longueur de réseau en 2013 (km)	2,086	26	125	937	199	53	96	3,521
Energie livrée en 2013 (MWh)	12,413,080	93,795	317,161	7,095,814	1,005,189	378,331	364,222	21,667,592
Densité énergétique (MWh/ml)	5.95	3.54	2.55	7.58	5.06	7.08	3.79	6.15
Part résidences principales chauffage urbain	32%	5%	13%	8%	2%	2%	7%	18%
Part résidences principales chauffage centralisé	72%	53%	57%	57%	40%	42%	42%	60%
Potentiel de raccordement	40%	48%	43%	49%	39%	41%	35%	42%

Annexe 2 - Hypothèses de raccordement selon les typologies

TYPOLOGIE DE COMMUNES (OTELO)	1	2	3	4	5	6	7
TAUX DE RACCORDEMENT - Scénario volontariste							
Taux de logements neufs raccordés	48%	42%	25%	25%	10%	5%	5%
Taux de logements anciens raccordés (2013-2050)	20%	24%	13%	10%	12%	4%	3%
Taux de logements raccordables raccordés	50%	50%	30%	20%	30%	10%	10%
TAUX DE RACCORDEMENT - Scénario ambitieux							
Taux de logements neufs raccordés	80%	70%	50%	50%	20%	10%	10%
Taux de logements anciens raccordés (2013-2050)	32%	38%	26%	20%	16%	8%	7%
Taux de logements raccordables raccordés	80%	80%	60%	40%	40%	20%	20%

Annexe 3 - Principaux résultats de la modélisation (scénario RCP 8.6 sans évolution du parc)

Scénario RCP 8.6 sans évolution du parc en 2050	2019	Tendanciel	Scénario volontariste	Scénario ambitieux
Livraisons résidentielles RCU (TWh)	13,6	14,1	26,6	46
Émissions de CO2 du secteur chauffage (Mt CO2-eq/an)	48,3	30,5	28,7	26,2

Annexe 4 - Principaux résultats de la modélisation (scénario RCP 4.5 sans évolution du parc)

Scénario RCP 4.5 sans évolution du parc en 2050	2019	Tendanciel	Scénario volontariste	Scénario ambitieux
Livraisons résidentielles RCU (TWh)	13,6	17,4	32,8	56,6
Émissions de CO2 du secteur chauffage (Mt CO2-eq/an)	48,3	37,6	35,4	32,3

Annexe 5 - Principaux résultats de la modélisation (scénario RCP 8.6 avec évolution du parc)

Scénario RCP 8.6 avec évolution du parc en 2050	2019	Tendanciel	Scénario volontariste	Scénario ambitieux
Livraisons résidentielles RCU (TWh)	13,6	4,9	9,2	15,9
Émissions de CO2 du secteur chauffage (Mt CO2-eq/an)	48,3	10,6	10	9,1

Annexe 6 - Principaux résultats de la modélisation (scénario RCP 4.5 avec évolution du parc)

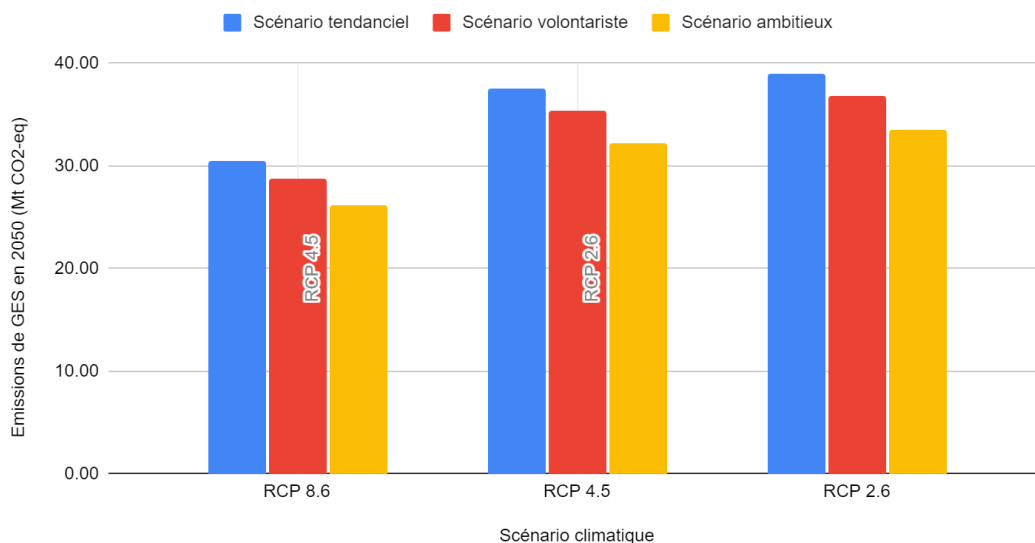
Scénario RCP 4.5 avec évolution du parc en 2050	2019	Tendanciel	Scénario volontariste	Scénario ambitieux
Livraisons résidentielles RCU (TWh)	13,6	6	11,4	19,6
Émissions de CO2 du secteur chauffage (Mt CO2-eq/an)	48,3	13	12,2	11,2

Annexe 7 - Principaux résultats de la modélisation (scénario RCP 2.6 avec évolution du parc)

Scénario RCP 2.6 avec évolution du parc en 2050	2019	Tendanciel	Scénario volontariste	Scénario ambitieux
Livraisons résidentielles RCU (TWh)	13,6	6,2	11,7	20,3
Émissions de CO2 du secteur chauffage (Mt CO2-eq/an)	48,3	13,4	12,7	11,6

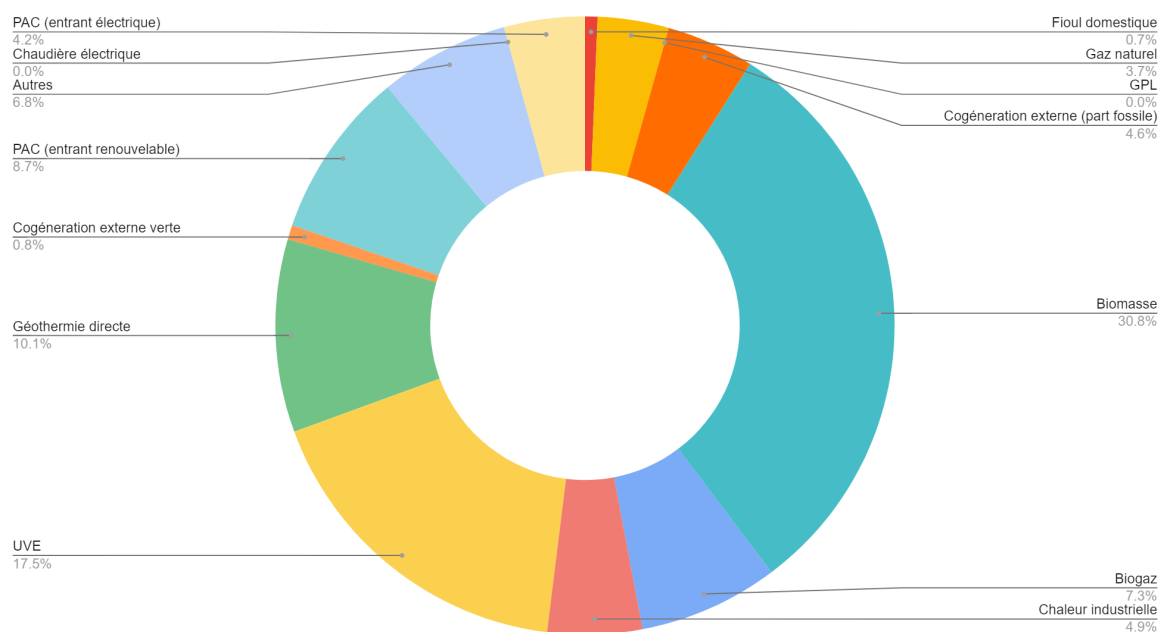
Annexe 8 - Histogramme des émissions du chauffage résidentiel pour différents scénarios climatiques à l'horizon 2050 sans évolution du parc

Emissions totales du chauffage résidentiel en 2050 selon les différents scénarios (sans évolution du parc)



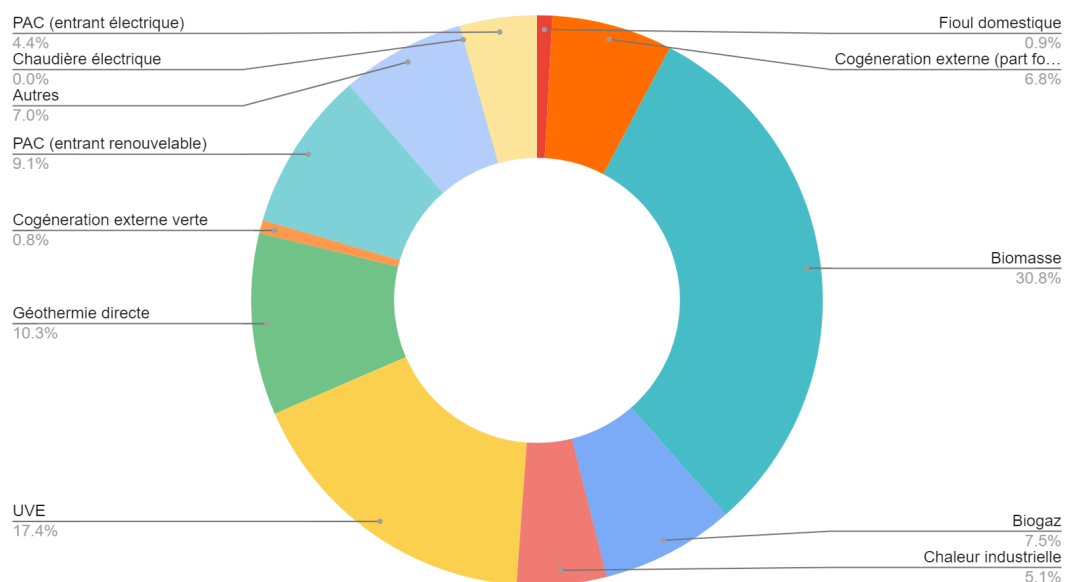
Annexe 9 - Mix énergétique pour le scénario tendanciel à l'horizon 2050

Bouquet énergétique - Scénario tendanciel 2050



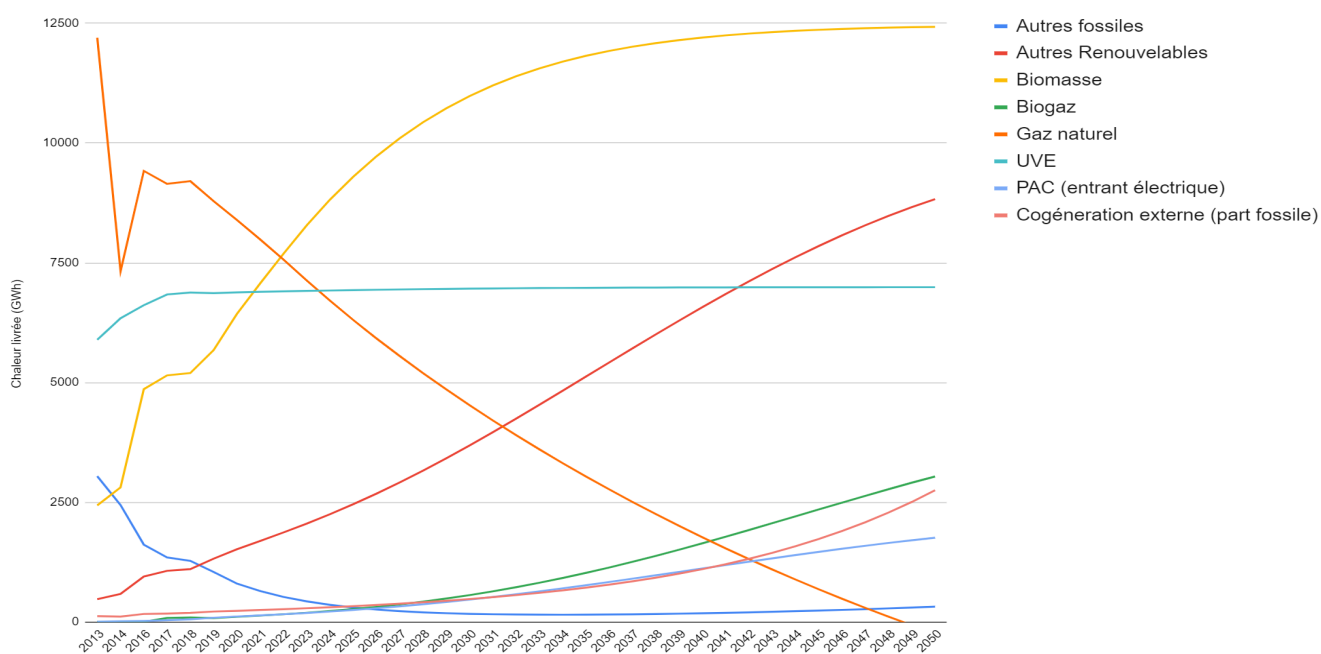
Annexe 10 - Mix énergétique pour le scénario volontariste à l'horizon 2050

Bouquet énergétique - Scénario volontariste 2050



Annexe 11 - Evolution des différents modes de production au sein des RCU à horizon 2050 dans le scénario volontariste

Chaleur livrée par type de génération - scénario volontariste



Annexe 12 - Evolution des différents modes de production au sein des RCU à horizon 2050 dans le scénario ambitieux

Chaleur livrée par type de génération - scénario ambitieux

