



ENGAGER LES VILLES DURABLES SUR LE CHEMIN DE LA TRANSITION ENERGETIQUE, DES RESEAUX DE CHALEUR A LA TOILE NUMERIQUE ET AUX SYMBIOSES INDUSTRIELLES ET URBAINES

Arnaud DIEMER, Pierre DEWAELE, Aymane JEBRANE, Yacine PETARD

Sofiane TALEB, Joris MAZAUDIER, Adrien AUW, Valentin LABRUQUERE

Revue Francophone du Développement Durable

2023 - n°22 - Octobre

Pages 1 - 55

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/publications/revue-francophone-du-developpement-durable/>

Pour citer cet article

Diemer A. & al. (2023), Engager les villes durables sur le chemin de la transition énergétique, des réseaux de chaleur à la toile numérique et aux symbioses industrielles et urbaines, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°22, Octobre p. 1 – 55.

Engager les villes durables sur le chemin de la transition énergétique, des réseaux de chaleur à la toile numérique et aux symbioses industrielles et urbaines¹

Arnaud DIEMER, Pierre DEWAELE, Aymane JEBRANE, Yacine PETARD, Sofiane TALEB, Joris MAZAUDIER, Adrien AUW, Valentin LABRUQUERE

*Université Clermont Auvergne, Ecole d'économie, CERDI, ERASME
UFR Mathématiques, MIASHS
Polytech Clermont*

***Résumé :** Depuis quelques années, l'Europe cherche à impulser une stratégie énergétique en s'appuyant sur différents piliers (efficacité énergétique, marché intégré, innovation, décarbonation du système économique, équité énergétique, sécurité énergétique). Il existe cependant de nombreuses disparités entre les Plans Climat et Energie Nationaux (PCEN) et leur déclinaison à l'échelle territoriale, voire à celle des villes et des agglomérations. En effet, les Plans Climat Air Energie Territoriaux (PCAET) offrent des perspectives locales qui reflètent davantage les réalités du terrain. Les installations en panneaux solaires, les équipements en pompe à chaleur, l'usage de la biomasse ou encore les investissements dans les réseaux de chaleur font désormais partie du mix énergétique de la plupart des métropoles. Ils obligent, dans le même temps, les métropoles à se constituer une base de données pour évaluer leurs politiques publiques à l'horizon 2030 et 2050. Les réseaux de chaleur combinés à la rénovation thermique des logements collectifs et des raccordements à des infrastructures énergivores (piscines, patinoires, résidences, complexes sportifs...) font de l'acteur public, un rouage essentiel dans l'émergence et le développement des symbioses urbaines et industrielles.*

***Mots clés :** Diagramme de boucles causales, PCAET, Réseau de chaleur, Transition énergétique, Villes durables*

L'énergie, clé de voûte de notre civilisation moderne, est la puissance invisible qui alimente nos foyers, nos entreprises, nos systèmes de transport et bien plus encore (IEA, 2023, Ministère de la Transition Énergétique, 2023). Toutefois, sa production et son utilisation ont un impact environnemental significatif (Bessalem, Diemer, Batisse, 2022), un défi que les villes du monde entier sont déterminées à relever, notamment via l'ODD 7 (Énergie propre). Les ODD (objectifs du développement durable) sont un appel à l'action lancé par l'ONU en 2015. L'ODD 11 villes durables nous rappelle que plus de la moitié de la population mondiale vit dans des villes, et cette proportion devrait atteindre 60% à l'horizon 2030. La France n'échappe pas à cette tendance (Bessalem, Diemer, 2023). Selon l'INSEE (2020), 93% de la population française vit dans l'aire d'attraction² d'une ville. Les villes et les zones métropolitaines sont des pôles de

¹ Cette étude a fait l'objet d'une commande de Clermont Auvergne Métropole et d'un suivi régulier pour la structuration de la base de données. Nous tenons à remercier Sybille Mazuel, Morgane Ombret, Violaine Magne, et Marc Suteau (Visea) pour leur collaboration et leur soutien.

² L'aire d'attraction d'une ville définit l'étendue de son influence sur les communes environnantes. Une aire est composée d'un pôle, défini à partir de critères de population et d'emploi, et d'une couronne, constituée des communes dont au moins 15% des actifs travaillent dans le pôle. Au sein du pôle, la commune la plus peuplée est appelée commune-centre

croissance économique, cependant elles émettent près de 70% des émissions de carbone et consomment plus de 60% des ressources naturelles. Clermont Métropole constitue le principal pôle d'attractivité du département du Puy de Dôme, et sa commune-centre, Clermont-Ferrand, occupe une place privilégiée au sein de l'EPCI (Etablissement Public de coopération intercommunale) composée de 21 communes. Depuis quelques années, les EPCI se voient confier un certain nombre de responsabilités (processus de décentralisation). La question énergétique via la mise en place d'un Schéma de transition énergétique et écologique (STEE) et d'un Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET) constitue l'une d'entre elles (Clermont-Communauté, 2014, Inddigo, 2019, 2018, 2017). A l'horizon 2050, Clermont-métropole devra à la fois réduire son empreinte environnementale (diminution drastique des émissions de GES) et atteindre les cibles gouvernementales en matière d'énergie renouvelable (cela passe par une moindre dépendance envers les énergies fossiles, principalement le gaz et le pétrole). Cette stratégie globale de transition énergétique (CAM, 2020, 2019, MRAE, 2018, AuRA-EE, 2018) concerne non seulement les infrastructures urbaines (secteur résidentiel et tertiaire), mais aussi l'agriculture et les transports, deux secteurs clés de l'économie locale. L'agriculture devient progressivement un acteur incontournable de la production d'énergie renouvelable, notamment via la bio-méthanisation et l'agrivoltaïsme. Les transports intègrent un plan de mobilité douce dans lequel la place de la voiture et des énergies fossiles est désormais dévolue aux pistes cyclables, au transport public et à l'énergie électrique (Kaleido'scop, 2018).

Dans cette course effrénée visant à réduire son empreinte environnementale (principalement les gaz à effet de serre) et à basculer vers les énergies renouvelables, les villes et les EPCI sont de plus en plus amenées à développer des investissements dans des ressources locales, que ce soit la géothermie, le solaire, l'éolien ou encore les réseaux de chaleur. Dans le cas de Clermont-Métropole, la création d'un nouveau réseau de chaleur ³sur le quartier Saint Jacques, alimenté par un incinérateur de déchets, s'inscrit pleinement dans le plan d'actions du PCAET à l'horizon 2050 (PCAET, 2021), mais également les directives ministérielles (Ministère de l'écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2013 ; Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2016, 2017 ; Ministère de la transition écologique et solidaire, 2019). La constitution de ce réseau est un parfait exemple d'initiative locale visant à contribuer à une transition énergétique plus durable et entièrement décentralisée. Malgré des investissements importants, l'EPCI est encore fortement dépendante des énergies fossiles et peine encore à rééquilibrer son bilan CO₂ (en 2021, 1427 kteCO₂ émis contre 78kteCO₂ stockées dans les surfaces agricoles et naturelles). Chaque année, l'EPCI consomme près de 6400 GWh d'énergie, sa production (430 GWh) représente à peine 7% de sa consommation (DDT, 2021). Les plans de sobriété

³ Un réseau de chaleur, ou réseau de chauffage urbain, est un système de distribution de chaleur généralement sous forme d'eau chaude ou de vapeur depuis un lieu centralisé de production vers des utilisateurs multiples, souvent des bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels (Cabinet Castelnaud, 2012).

énergétique ne suffisent pas pour supprimer un écart qui risque de se creuser sous le coup de besoins énergétiques grandissants. Les transports représentent le tiers de la consommation d'énergie, presque exclusivement sous la forme de carburants routiers. Ce qui rend le territoire dépendant aux produits pétroliers et sensible au prix du pétrole. Le logement et le tertiaire ne sont pas en reste, ils représentent successivement 34% et 22% de la consommation d'énergie. Le tiers de l'énergie totale consommée, souvent du gaz, sert au chauffage des locaux. La biomasse⁴ (bois) est fortement mobilisée (près de 63% de la production d'énergie renouvelable) cependant elle ne suffit pas à rééquilibrer les bilans énergétiques.

C'est ce constat qui nous a amené à analyser le plan de transition énergétique de l'EPCI Clermont métropole (ORCAE, 2021), et plus particulièrement l'impact environnemental et socioéconomique du nouveau réseau de chaleur dans le quartier Saint Jacques. Le choix de cette problématique a été conditionné par trois facteurs : 1° la transition énergétique constitue un enjeu important dans les actions à mettre en place pour lutter contre le réchauffement climatique ; les réseaux de chaleur sont présents dans de nombreuses villes de l'hexagone⁵ (ADEME, 2019) ; 2° la Métropole clermontoise a souhaité que cette initiative soit accompagnée d'une analyse sociotechnique, visant à poser les bases d'un diagnostic de territoire ; 3° l'étude d'un nouveau réseau de chaleur (Saint-Jacques) offrait une occasion unique d'examiner les tenants et les aboutissants d'une initiative locale permettant de redessiner le paysage urbain. Notre étude vise ainsi à rendre compte des potentialités d'une source d'énergie renouvelable, ici le réseau de chaleur, en analysant les impacts sociotechniques et les questions d'acceptabilité sociale liés à sa mise en place. Dans un premier temps, nous présenterons un diagnostic énergétique du territoire concerné, ici l'EPCI Clermont-Métropole. Nous analyserons les contraintes techniques et les objectifs visés par la création des réseaux de chaleur. Cette analyse sera associée à une enquête de terrain visant à recueillir les données nécessaires pour évaluer l'impact d'un réseau de chaleur et notamment son acceptabilité sociale auprès des habitants. Dans un second temps, nous aurons recours à la dynamique des systèmes (Forrester, 1969 ; Sterman, 2001 ; Meadows & al., 2008 ; Lane, 2016 ; Ford, 2019) afin de construire les principales boucles de causalité du réseau de chaleur, identifier les principaux drivers et leviers d'actions (il sera ainsi possible d'identifier les variables qui jouent un rôle important dans l'analyse des réseaux de chaleur). Dans un troisième et dernier temps, nous proposerons des trajectoires énergétiques pour la métropole, intégrant à la fois des enjeux liés à l'efficacité énergétique, la sobriété énergétique ou la rénovation thermique.

⁴ La biomasse est une source d'énergie renouvelable provenant de matière organique, comme les plantes ou les déchets organiques. Elle peut être utilisée pour produire de l'électricité, de la chaleur ou des biocarburants.

⁵ En 2019, 798 réseaux de chaleur et 24 réseaux de froid ont répondu à l'enquête annuelle du Syndicat National du Chauffage Urbain (SNCU), totalisant 5964 km de conduites.

Du diagnostic énergétique aux réseaux de chaleur

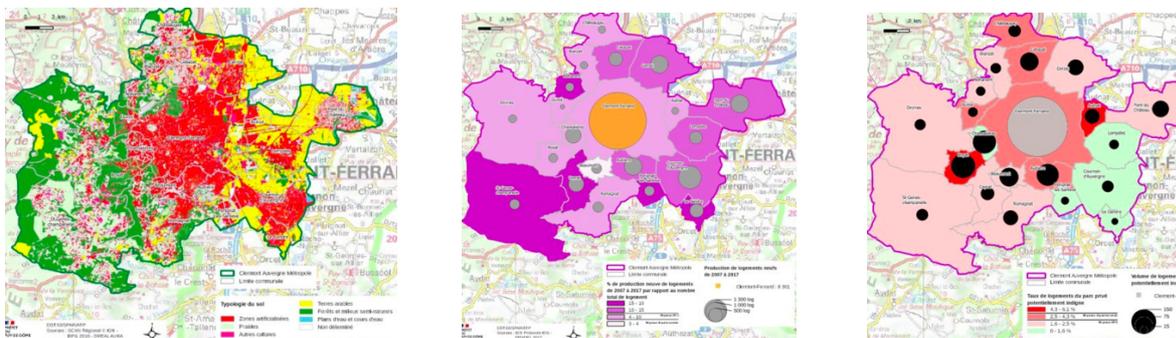
Clermont Métropole est un territoire dynamique et diversifié qui présente une variété d'habitats et un paysage géographique unique. Avec une population d'environ 290 000 habitants répartis sur 21 communes (figure 1), c'est une région qui combine les éléments urbains, périurbains et ruraux (33% d'occupation du sol), avec une diversité de paysages (27% de forêts, 10% de prairie) et d'environnements de vie (figure 2). Bien entendu, le cœur des zones artificialisées se concentre sur la ville de Clermont-Ferrand (DDT, 2021).

Figure 1 : Les 21 communes de Clermont Métropole (CAM)



L'habitat à Clermont Métropole est caractérisé par une grande variété de constructions, reflétant les différentes périodes de son développement. On y trouve des bâtiments anciens, des constructions plus récentes et des bâtiments très anciens. Les résidences principales représentent 83% du parc de logements (soit 145928 résidences). Les résidences secondaires constituent une part très faible du parc immobilier (3,3%). Le nombre de logements vacants (près de 13885) connaît une croissance importante (+26,6% entre 1999 et 2017). Enfin, précisons que ces logements sont occupés principalement par des locataires (51,6%) et qu'ils sont pour l'essentiel collectifs (62% du parc).

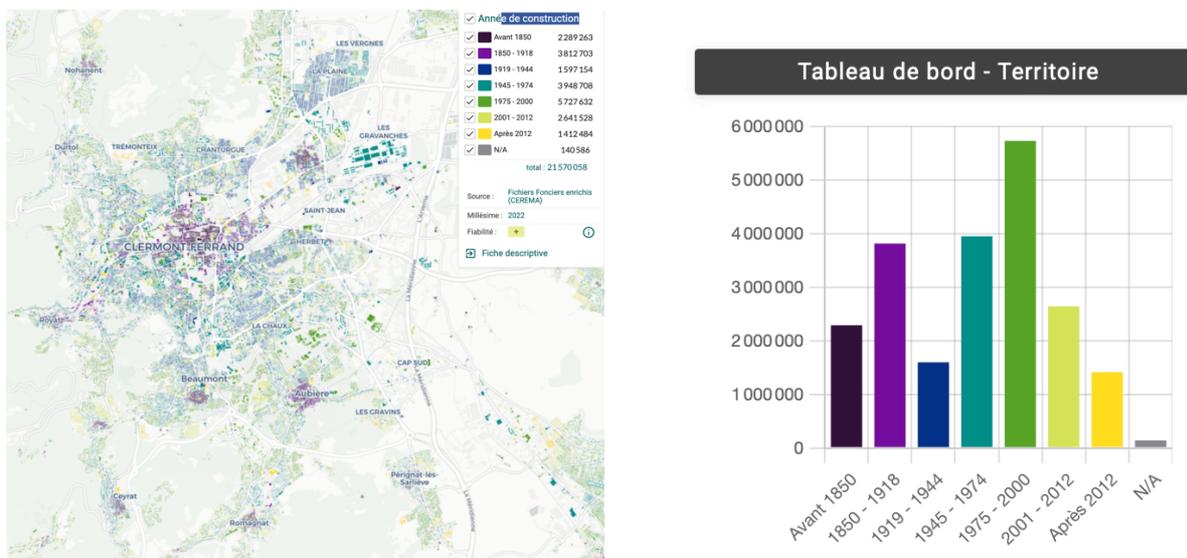
Figure 2 : Occupation des sols et logements dans la CAM



Source : DDT (2021)

Cette diversité architecturale pose à la fois des défis et des opportunités en matière de gestion énergétique (figure 3). Les bâtiments plus anciens (près de 2,3 millions avant 1850 et près de 3,9 millions entre 1850-1918) peuvent nécessiter d'importantes rénovations pour améliorer leur efficacité énergétique et réduire leur impact environnemental. D'un autre côté, les constructions plus récentes (4 millions après 2001) offrent la possibilité d'intégrer dès le départ des technologies énergétiques avancées et durables (climatisation).

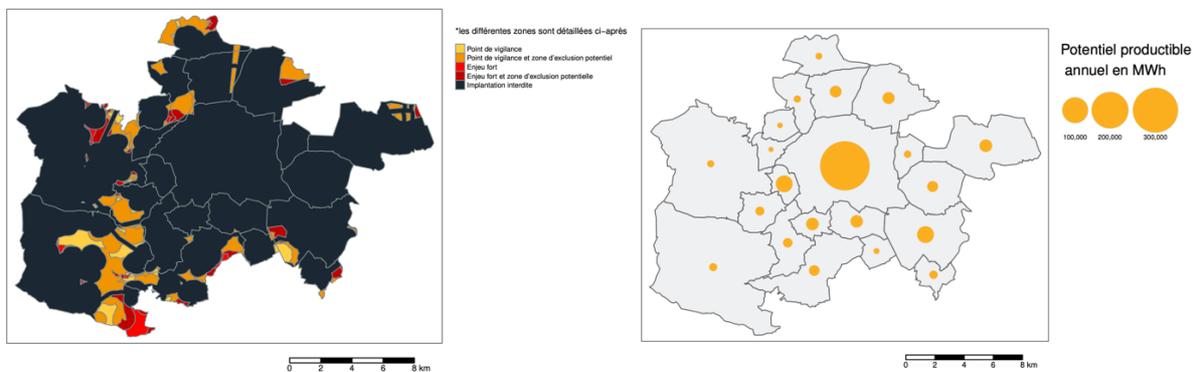
Figure 3 : Carte du bâti dans la CAM



Source : <https://app.urbs.fr/onb>

La variabilité des altitudes sur le territoire de Clermont Métropole, allant des plaines aux zones de montagnes, ajoute une autre dimension à la question énergétique. Cette diversité topographique peut influencer les choix en matière de sources d'énergie, les conditions climatiques variant en fonction de l'altitude. Par exemple, les zones de haute altitude peuvent être plus adaptées à l'utilisation de l'énergie éolienne, tandis que les plaines pourraient être plus propices à l'énergie solaire (figure 4).

Figure 4 : zones favorables à éolien et potentiel solaire thermique



Source : ORCAE, 2023, 2021

Par ailleurs, Clermont Métropole est une région économiquement dynamique, avec une industrie bien développée, une activité tertiaire en plein essor et une agriculture toujours présente (tableau 1). Ces différents secteurs ont des besoins énergétiques spécifiques et constituent des acteurs clés de la transition énergétique sur le territoire.

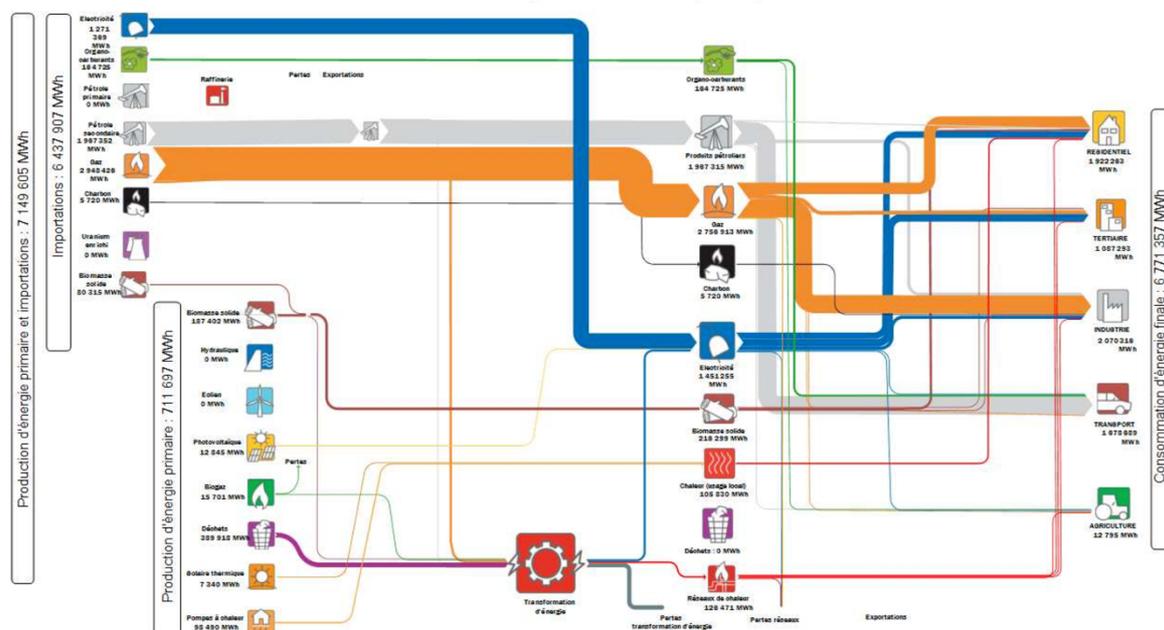
Tableau 1: Consommation d'énergie finale par secteur et par énergie (GWh)

	Chauffage et froid urbain	CMS	Déchets	Electricité	ENRt	Gaz	Organo-carburants	PP	Toutes énergies
Résidentiel	62	0	0	551	255	1159	0	95	2122
Tertiaire	24	0	0	650	23	398	0	128	1222
Industrie hors branche énergie	13	6	0	234	43	1487	0	251	2033
Gestion des déchets	0	0	0	55	0	0	0	0	55
Branche énergie	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Transport routier	0	0	0	1	0	9	167	1618	1795
Autres transports	0	0	0	6	0	0	1	20	27
Agriculture, sylviculture et aquaculture	0	0	0	2	0	1	1	6	10
Tous secteurs	99	6	0	1499	320	3053	168	2119	7264

Source : ORCAE (2023)

Les caractéristiques diversifiées de Clermont Auvergne Métropole, en termes de paysage, d'habitat, et d'économie, rendent la question de l'énergie particulièrement complexe. Cependant, cette diversité offre aussi de nombreuses opportunités pour des solutions innovantes et adaptées à chaque contexte local. Le diagramme SANKEY permet de rendre compte des flux entre la production d'énergie primaire, les importations d'énergie primaire et de produits secondaires et la consommation d'énergie finale (figure 5). Il met en évidence la différence entre les ressources mobilisées et les ressources utiles.

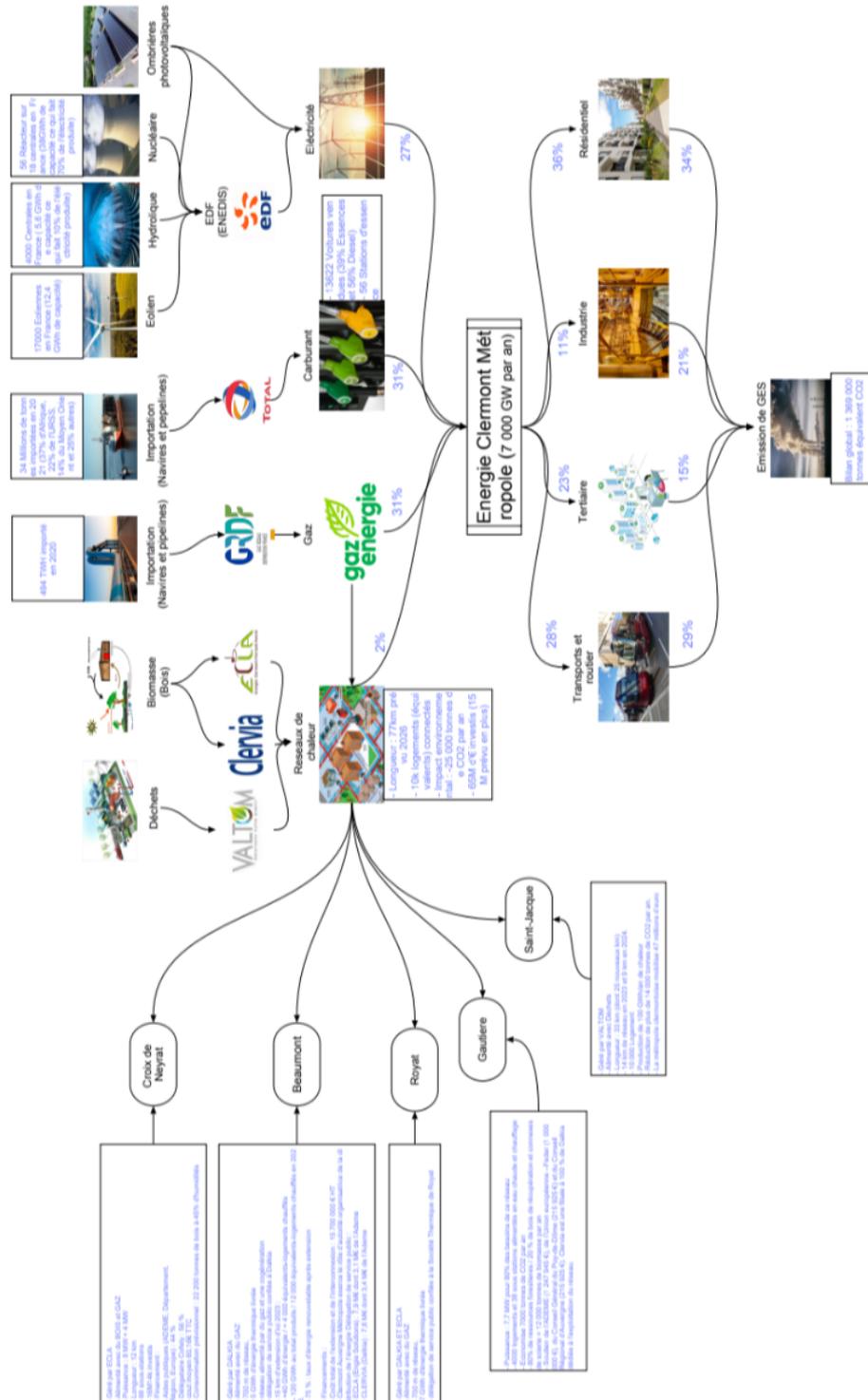
Figure 5 : Flux d'énergie de Clermont Auvergne Métropole pour 2020



Source : ORCAE (2022)

La figure 6 présente sous la forme d'un click chart, une vision globale du système énergétique de Clermont Auvergne Métropole. Cette dernière consomme près 7 000 GW/an. Cette consommation se décompose en 27% d'électricité, 31% de carburant, 31% de gaz, et 2% provenant des réseaux de chaleur.

Figure 6 : Vision globale du système énergétique de la CAM



Source : les auteurs

L'électricité est principalement fournie par EDF et des ombrières photovoltaïques. EDF tire sa production de sources diverses : le nucléaire (56 réacteurs sur 18 centrales en France pour une capacité de 38 GWh, soit 70% de la production d'électricité du pays), l'hydraulique (4000 centrales en France), et l'éolien (17 000 éoliennes en France). La part de carburant de la consommation énergétique provient principalement des 13 000 voitures vendues dans la métropole, avec une répartition de 39% d'essence et 56% de diesel. Ce carburant est fourni par Total qui l'importe via des navires et des pipelines. La part de gaz est fournie par GRDF, tandis que la part des réseaux de chaleur est assurée par Valtom (déchets), Clervia (biomasse bois) et Ecla (biomasse bois). Ces réseaux de chaleur ont un impact environnemental significatif, permettant d'économiser 25 000 tonnes de CO₂ par an, pour un investissement de 65M d'€ (avec 15M prévu en plus). Enfin, la consommation énergétique de la métropole est répartie entre les transports routiers (28% de la consommation et 29% des émissions de GES), le secteur tertiaire (23% de la consommation et 15% des GES), l'industrie (11% de la consommation et 21% des GES) et le résidentiel (36% de la consommation et 34% des GES).

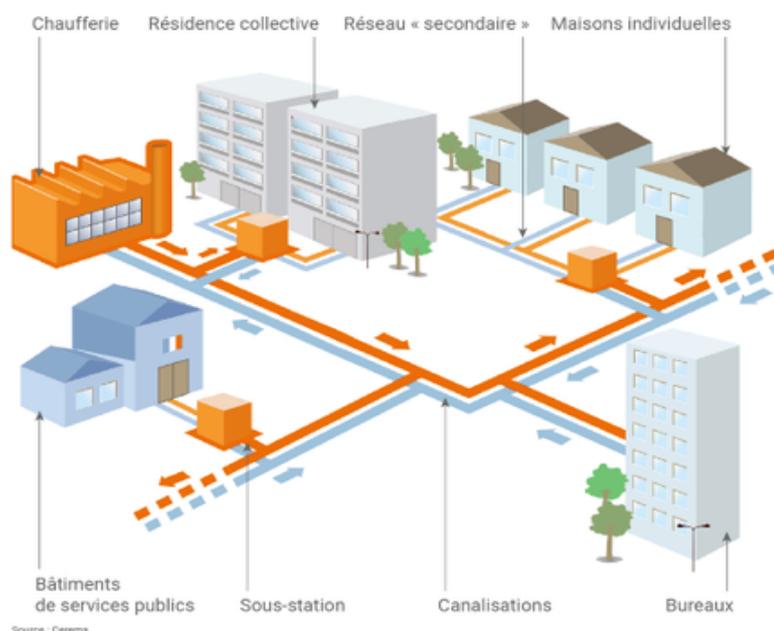
Certaines énergies sont transformées pour produire de l'électricité ou de la chaleur via des réseaux de chaleur urbains. C'est ce dernier point qui constituera désormais l'essentiel de nos propos. Notre travail porte principalement sur l'évaluation de l'impact environnemental et économique du réseau de chaleur Saint-Jacques et sur l'élaboration de stratégies pour réduire l'empreinte carbone de la CAM. La problématique de notre étude peut être reformulée comme suit : "Comment optimiser l'utilisation et l'expansion du réseau de chaleur Saint-Jacques et développer des stratégies énergétiques efficaces pour minimiser l'empreinte carbone de Clermont Auvergne Métropole d'ici 2050 ?". Cette problématique nous a guidés dans la définition de nos objectifs et dans l'élaboration de notre méthodologie. Elle nous a permis de cibler notre recherche sur des aspects spécifiques, tout en gardant une vision globale de la situation énergétique de la métropole. Cependant, il est important de préciser que nos travaux se sont concentrés principalement sur l'aspect technique et économique de la transition énergétique, et non sur les aspects politiques ou sociaux. Nous sommes conscients que ces facteurs jouent également un rôle important. De plus, bien que nous ayons utilisé le quartier de Saint-Jacques comme point de départ pour notre analyse, nous avons extrapolé nos résultats à l'ensemble de la métropole. Cela a été rendu possible grâce à l'utilisation de méthodes statistiques rigoureuses et à la coopération avec les autorités locales et les fournisseurs d'énergie. Enfin, notre étude est basée sur des données et des technologies disponibles à l'heure actuelle. Nous sommes conscients que le paysage énergétique évolue rapidement et que de nouvelles technologies ou réglementations pourraient influencer les principaux résultats. C'est pourquoi nous avons mis l'accent sur l'importance de l'adaptabilité et de l'innovation dans la mise en œuvre de nos recommandations.

Les principes de fonctionnement d'un réseau de chaleur

Un réseau de chaleur est un chauffage central à l'échelle d'une ville. Souterrain, il permet d'alimenter des bâtiments en chauffage, eau chaude sanitaire ou en process (pour l'industrie : vapeur, eau surchauffée...) à l'échelle d'un ou plusieurs quartiers (Chabanne-Pouzynin, 1994, Hampikian, 2017). Concrètement une chaufferie produit de la chaleur, distribuée dans un réseau fermé de canalisations souterraines sous forme d'eau chaude (Amorce, 2015). Cette énergie est ensuite transférée au réseau interne de chaque bâtiment raccordé qui bénéficie ainsi de chauffage et d'eau chaude garantie toute l'année sans avoir besoin d'une chaudière (ADEME, 2019).

Le réseau de distribution primaire constitue une boucle qui conduit le fluide caloporteur de l'unité de production de chaleur jusqu'à la sous-station d'échange. On emploie trois types de fluides caloporteurs. Le réseau eau chaude a une température comprise entre 60° et 110°C. Il est généralement prévu pour les groupes d'immeubles d'habitation ou de bureaux, ou encore les hôpitaux et établissements industriels qui ne consomment pas de vapeur (Berry, 2017). Le réseau eau surchauffée a une température comprise entre 110°C et 180°C. Il est principalement utilisé dans les réseaux de grande envergure qui alimentent des bâtiments nécessitant des températures élevées (laveries, abattoirs, industries textiles...). Le réseau vapeur a une température de 200°C à 300°C. Son utilisation est de plus en plus limitée. Il est présent essentiellement pour la fourniture de chaleur industrielle (Cantat, 2004 ; ADEME, 2012).

Figure 7 : Schéma de fonctionnement d'un réseau de chaleur



Les canalisations sont en général constituées d'un système double enveloppe : une gaine extérieure en acier (jusqu'à 800 mm de diamètre) à l'intérieur de laquelle se trouve une autre gaine en acier transportant le fluide caloporteur entourée d'une épaisseur d'isolant (laine de roche, mousse de polyuréthane, etc.). La pose peut se faire en caniveau enterré, ce qui permet une protection mécanique et minimise les effets dus

à l'humidité par ventilation de ces caniveaux. Elle peut également se faire en tranchée, solution moins coûteuse, mais nécessitant que les gaines soient entourées d'un film protecteur contre l'humidité et qu'elles soient installées à une profondeur suffisante afin d'absorber les efforts de la surface. Le coût de pose d'un mètre de réseau est de l'ordre de 1000 à 2000€. Ce coût dépend bien sûr en réalité de très nombreux facteurs liés à chaque projet. Dans certains cas, des sous-stations sont installées sur le réseau de chaleur. Généralement situées en pied de bâtiment, la sous-station d'échange se compose d'un échangeur thermique qui permet le transfert de la chaleur entre les deux circuits. La sous-station comporte aussi un compteur de chaleur transférée qui permet de connaître la consommation d'énergie du bâtiment, donnée nécessaire à la facturation (ADEME, 2016).

De nombreux types de chaufferies sont en fonctionnement, ils peuvent varier par leur puissance et par les énergies qu'elles exploitent. Certaines chaufferies de réseaux de chaleur produisent de la chaleur et de l'électricité par cogénération, permettant d'améliorer le rendement global du système par rapport à des productions séparées.

La chaleur peut être produite à partir de nombreuses sources (SNCU, 2012). Les énergies suivantes sont les plus fréquemment utilisées par les réseaux de chaleur : combustion d'hydrocarbures (gaz naturel, fioul, charbon), combustion de biomasse (généralement sous forme de bois-énergie), géothermie, chaleur de récupération (c'est par exemple la forme d'énergie fatale de procédés d'incinération des déchets, de centres de données, des eaux usées, voire du métro dans des installations expérimentales).

La part des sources d'origine fossile a tendance à diminuer, au profit des énergies renouvelables et de récupération. Le mix énergétique dépend toutefois de chaque réseau, et les situations peuvent également être très différentes d'un pays à un autre.

Une des particularités des réseaux de chaleur est leur capacité à exploiter une large gamme de sources énergétiques (Foissard, 2015, Chambon, Corm, 2023). Au-delà des énergies fossiles classiques et des énergies renouvelables et de récupération aujourd'hui dominantes (bois, géothermie, chaleur fatale d'incinérateurs), d'autres gisements peuvent être mobilisés. Par exemple l'énergie solaire, captée par des panneaux solaires thermiques ; les petits réacteurs nucléaires modulaires ; la chaleur des égouts ou « cloacothermie », la géothermie profonde et la géothermie superficielle, avec utilisation de pompe à chaleur ; la chaleur ou le froid des océans, mers, lacs et cours d'eau ; la chaleur issue de la climatisation des centres de données ; la chaleur rejetée par les centrales nucléaires ; la chaleur produite par des bâtiments à énergie positive ou récupérée dans les réseaux d'assainissement. De façon plus anecdotique, mais illustrant la capacité d'adaptation des réseaux de chaleur, quelques réseaux en Suède et en Suisse récupèrent la chaleur issue de crématoriums.

Dans le cadre du jeu d'acteurs, le réseau de chaleur peut se définir comme un échange de flux constitutif d'une symbiose industrielle et urbaine (Colombert, Diab, 2017, Diemer, Dierickx, 2022). La collectivité est l'autorité organisatrice du service public de

la chaleur (Amorce, 2017). Elle peut exercer en régie la gestion de ce service ou déléguer cette mission à une entreprise privée, par concession ou affermage. Certains réseaux sont privés. Leurs propriétaires, maîtres d'ouvrages de ces installations, peuvent également gérer en régie ces réseaux ou confier cette tâche à des opérateurs privés, via un contrat d'exploitation (Amorce, 2017 ; Amorce/ADEME, 2022). La société gestionnaire du réseau est l'opérateur désigné par le maître d'ouvrage du réseau. Il est responsable de la bonne exécution du service. Il assure la conformité et le renouvellement des équipements nécessaires à la production et à la fourniture de chaleur. Le gestionnaire du bâtiment est l'abonné au réseau de chaleur. S'agissant souvent de bâtiments à usage collectif, le gestionnaire est un syndicat de copropriétaires, un bailleur social, les services techniques d'une collectivité, etc. C'est lui qui organise la transmission de l'information entre les usagers et l'opérateur. Les usagers sont les habitants et occupants des locaux raccordés. Ils bénéficient du service de production et de distribution de chaleur (ADEME, 2009).

Analyse sociotechnique des réseaux de chaleur

Les perspectives en matière de lutte contre le changement climatique invitent à explorer des modes de production ou d'utilisation d'énergie qui émettent peu de gaz à effet de serre. Une attention particulière doit être portée aux secteurs résidentiels et tertiaires qui représentent une grande partie de la consommation totale d'énergie (59% de la consommation énergétique de l'agglomération de Clermont-Ferrand). Cette consommation d'énergie sera diminuée grâce à l'amélioration de l'isolation des bâtiments mais cela ne suffira pas. Il faudra également utiliser autant que possible des énergies autres que d'origine fossile. Parmi ces formes d'énergie, plusieurs ne peuvent pas être acheminées aisément jusqu'à leur lieu d'utilisation. C'est le cas par exemple de la biomasse, de la géothermie ou de l'énergie issue du traitement des déchets. L'utilisation massive de ces sources d'énergie passe par le développement des réseaux de chaleur.

Coût de création d'un réseau de chaleur

En abordant la question des réseaux de chaleur, on est tout d'abord frappé de la difficulté de connaître les composantes du coût de production et de livraison de la chaleur par des réseaux. Un réseau est toujours formé d'au moins deux sources de chaleur, la principale utilisée « en base » et une autre de capacité égale ou supérieure utilisée pendant les périodes de pointe et comme secours, de conduites et d'échangeurs en pied d'immeuble, appelés « sous-stations ». Il faut entretenir le réseau et les chaudières, entretien courant et « gros entretien », y compris le remplacement des pièces défectueuses ou usées. Aux dépenses d'achat de matière première pour l'énergie (gaz, biomasse, charbon, etc.) s'ajoutent les dépenses d'énergie nécessaires au fonctionnement du réseau, les frais de gestion (frais commerciaux, fournitures diverses, surveillance, entretien courant, eau), les taxes, dont les redevances pour

occupation du domaine public, les bénéfiques avant impôts. En cas d'utilisation de biomasse, la vente des cendres, riches en éléments minéraux, procure une recette.

Dans cette étude, nous nous sommes appuyés sur le rapport du Conseil Général des Mines (Prevot, 2006) pour estimer le coût de la création d'un réseau de chaleur toutefois il faut garder à l'esprit qu'il s'agit d'un exercice très complexe dans la mesure où la diversité des situations est très grande (réseau installé ou réseau à construire / zone urbaine dense ou petite ville / production pour 10000 logements ou 100 logements / chauffage au charbon, fioul, gaz, chaleur de géothermie, chaleur d'usine d'incinération d'ordures ménagères ou biomasse sans même parler des solutions par captage et stockage du CO₂). De plus, un système de chauffage urbain est un équipement qui ne peut s'évaluer que dans une perspective de plusieurs dizaines d'années. Or il est impossible de prédire avec exactitude l'évolution des prix de l'énergie fossile et des autres formes d'énergie sur cette période. Il en est de même pour les évolutions technologiques qui ne manqueront pas d'intervenir. Enfin pour diminuer les émissions de gaz carbonique, il faudra des décisions politiques qui modifieront le coût respectif des énergies qui émettent des gaz à effet de serre et celles qui n'en émettent pas.

Coût chaudière principale

Pour de la géothermie, l'investissement pour une installation complète comprenant un puits de 200 m³/heure de 1700 mètres de profondeur et le puits de retour est de 8 M€, soit 1150 €/kW pour une installation moyenne. L'investissement peut être bien moindre s'il n'y a qu'un puits ou si le rendement du puits est supérieur à 7 MW.

Coût de l'énergie de base consommée (Energie de base/MWh entrée)

On fera l'hypothèse que le prix du charbon/fioul est égal) 17,6 €/MWh, que le prix de la biomasse est de 15 €/MWh, que le prix de la chaleur d'usine d'incinération (UIOM) est de 9 €/MWh et que le prix de l'énergie de pompage pour faire circuler l'eau géothermale est de 5€/MWh

Coût des conduites (Pose du réseau €/m)

Le coût des conduites, y compris la pose, dépend naturellement de leur diamètre et aussi de l'environnement où elles sont posées. En moyenne, en milieu urbain dense, il faut compter 1100 €/m linéaire d'une conduite double d'une capacité de 4 MW, 1300 €/m linéaire pour une conduite de 7 MW. Mais dans les petites villes ou dans les zones en cours d'aménagement, le coût peut descendre à 300 €/mètre linéaire ou même moins. Au contraire, dans les points singuliers les coûts sont de plusieurs milliers d'euros par mètre. Nous retiendrons 1000 €/mètre pour les réseaux de taille moyenne ou grande, 300 €/mètre pour les petits réseaux. Ramené à la quantité de chaleur livrée, le coût du réseau dépend énormément de la quantité de chaleur livrée par unité de longueur du réseau. Un réseau moyennement dense dessert 500 à 1000 logements par kilomètre, à qui il livre 6 à 12 GWh/an par kilomètre. Dans ces conditions le « coût

d'usage » du réseau est d'environ 4 €/MWh, à quoi s'ajoute le gros entretien pour 2 €/MWh.

Coût des sous stations

Ces échangeurs en pied d'immeubles transmettent la chaleur du réseau principal au réseau interne à l'immeuble ; ils occupent un très petit espace. Le « primaire » de l'échangeur fait partie du réseau, le secondaire étant à la charge de l'immeuble. Un « équivalent logement standard » doit pouvoir recevoir une puissance de 7 kW. Le coût de la sous-station est fonction de la puissance délivrée. Il est de 33 €/kW pour une sous-station de 3 MW (400 logements), 40 €/kW pour une station de 800 kW ou 140 €/kW pour une sous-station de 115 kW (16 logements). Le coût d'usage des sous-stations dépend donc beaucoup du nombre de logements raccordés à chaque sous-station : selon les cas, il est de 1 à 3 €/MWh, à quoi s'ajoute le coût du gros entretien, soit en tout de 2 à 4 €/MWh.

Coût de l'Énergie

Le coût de l'énergie inclut l'énergie d'appoint, qui ne représente que 10 à 20 % en quantité mais beaucoup plus en valeur. Est indiqué dans le tableau 2, le coût de l'énergie principale telle qu'elle est achetée par le réseau (entrée chaufferie pour le charbon et la biomasse, entrée réseau pour la chaleur de cogénération ou d'UIOM). Dans le cas de la géothermie, il s'agit de l'électricité de pompage de l'eau géothermale.

Frais d'exploitation et marges

Au coût de l'énergie et du gros entretien et aux dépenses d'énergie de géothermie, il faut ajouter l'énergie nécessaire au fonctionnement des chaudières et du réseau, et d'autre part la récupération des cendres, la surveillance, les provisions pour risques, les dépenses administratives. Il faut également compter les impôts, les redevances diverses notamment pour usage du domaine public. Le coût de la chaleur de réseau est calculé en supposant que ces dépenses sont de 12 €/MWh là où il y a une chaudière, de 10 €/MWh dans les autres cas.

Le prix de revient de la chaleur livrée

Le tableau 2 donne quelques résultats des calculs faits à partir des données indiquées plus haut. Ce tableau est très simplifié en ceci qu'il ne retient qu'une hypothèse sur le coût des réseaux (300 équivalents logements sur un réseau qui coûte 300 €/mètre ou 1000 équivalents logements sur un réseau qui coûte 1000 €/mètre), et un seul coût de sous-station. De même, on n'a retenu que deux valeurs de frais de gestion, une lorsqu'il y a une chaufferie et une autre en l'absence de chaufferie. Ce sont des coûts hors taxes, la charge d'investissement étant limitée à 4 % de la valeur à neuf des matériels sans amortissement mais les frais de gros entretien sont largement calculés : 3 % de la valeur à neuf en général, mais 2 % sur les sous-stations et 4 % sur les installations de géothermie (Rapport du Conseil Général des Mines, 2006).

Selon l’auteur du rapport, ce tableau montrerait « l’intérêt manifeste du chauffage à partir de la chaleur des UIOM (Unité d’Incinération des Ordures Ménagères) et l’ampleur de la « subvention » reçue par les réseaux alimentés par cogénération à partir de gaz. La géothermie, comptée ici pour 4000 heures de fonctionnement, donne de bons résultats lorsque la « durée d’utilisation » est élevée » (2006, p. 30).

Tableau 2 : Estimation du coût d’un réseau de chaleur par MWh

Coût hors TVA	Charbon	UIOM	Cogénération gaz	Géothermie	Biomasse
Coût chaudière principale (€/kW)	300	0	0	1150	500
Energie de base (€/MWh)	17,6	9	40 ou 80	5	15
Durée de fonctionnement (h/an)	2500	2500	2500	4000	2500
Pose du réseau (€/km)	1000	1000	1000	1000	1000
Nombre de logement par ss-station	40	40	40	40	40
Invest : Chaufferie (€/MWh)	5,6	1,7	1,7	11,6	8,2
Invest : Réseau et ss-stations (€/MWh)	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
Gros entretien (€/MWh)	8	5	5	11	10
Energie (€/MWh entrée réseau)	26	13	32 ou 42	9	23
Frais d’exploitation, marges (€/MWh)	12	10	10	10	12
Coût (€/MWh produit)	57,8	37,9	57 ou 65	48	59,4
Coût (€/MWh livré)	62,8	41,2	62 ou 71	52	64

Source : Prevot (2006, p. 30)

Bien que les investissements soient plus onéreux (double puits, eau corrosive), le coût de la chaleur procurée par de la géothermie devient compétitif avec un chauffage collectif au gaz si sa durée d’utilisation est de 4000 heures, dès lors que l’on compte l’effet de serre pour 100 € par tonne de carbone. Pour information, le prix moyen d’un tonne de CO₂ est passé de 37,45 euros en février 2021 à 90 euros en mars 2023, avec pour objectif d’atteindre 100€/tonne de CO₂ en 2030 (Olivier, 2023).

Complément sur le cas de la géothermie

La géothermie coûte cher en investissement, mais une fois financée, elle dégage des résultats intéressants. L’équilibre économique des réseaux géothermiques demande donc une stabilité des prix de l’énergie qui leur a fait défaut notamment après les contre-chocs pétroliers. L’investissement comprend d’abord les dépenses engagées pour trouver un bon site géothermal, puis pour faire le forage, souvent un forage double pour réinjecter l’eau dans la nappe à une distance du captage supérieure à un kilomètre. Il faut également une pompe immergée (selon le cas), une pompe d’injection et un échangeur. Le coût de la chaleur dépend énormément du rendement du puits, très différent d’un puits à l’autre. Le rendement se calcule à partir de la température d’extraction de l’eau, de son débit et aussi de la température de retour des systèmes d’utilisation. Les débits sont de l’ordre de 200 m³/heure, la température de 55 à 80 °C. Si les retours d’eau sont à 40 °C, pour un même débit le rendement d’un puits dont l’eau est à 80°C est le double de celui d’un puits dont l’eau est à 60 °. Dans un cas moyen (70°C, 200 m³ /h), la puissance est de 7 MW.

De même, l’entretien coûte assez cher lorsque les eaux géothermales sont corrosives, et il faut souvent changer les pompes (tous les cinq ans au maximum pour la pompe

de production immergée). Si la chaleur est « gratuite », il faut néanmoins compter le coût de l'énergie électrique nécessaire pour faire circuler l'eau géothermale : 1 kWh électrique pour 10 kWh thermique, soit un coût de 5 €/MWh thermique environ.

Complément sur le cas des UIOM

Comme nous l'avons vu précédemment, d'un point de vue économique, les unités d'incinération d'ordures ménagères sont la meilleure source de chaleur que l'on puisse trouver en ville si la chaleur est utilisée pour remplacer du fioul ou du gaz.

En effet même si l'UIOM est distante du réseau de quelques kilomètres, utiliser la chaleur de l'UIOM directement plutôt que de passer par la production d'électricité est tellement intéressant qu'il est économique de transporter la chaleur sur plusieurs kilomètres depuis l'usine d'incinération jusqu'à une entrée sur le réseau. Si le coût du transport de la chaleur est de 5 €/MWh, la chaleur arrivera dans le réseau à 14 €/MWh (moins que les 17,6 €/MWh produits à partir de charbon). Une tuyauterie de vapeur de diamètre 300 mm, peut transporter 70 MW. Son coût, pose comprise est de 1500 €/m en zone difficile. Si cette chaleur est utilisée 2500 heures, la quantité utilisée sera de 175 GWh. Supposons que la distance soit de 10 km et qu'une partie du trajet traverse une zone sans difficulté. Le coût de la conduite sera de 10 M€. L'annuité correspondante, intérêt et capital à 4 % sur 20 ans est de 740 000 €, soit 4 €/MWh. En tenant compte des pertes 5 €/MWh rendu. Si la chaleur d'incinération est comptée pour 9 €/MWh, cela nous fait une chaleur arrivée sur le réseau à 12 €/MWh. Si la distance est de 20 km, le coût à l'arrivée sera de 17 €/MWh (Prévoit, 2006).

Enjeux sociétaux des réseaux de chaleur

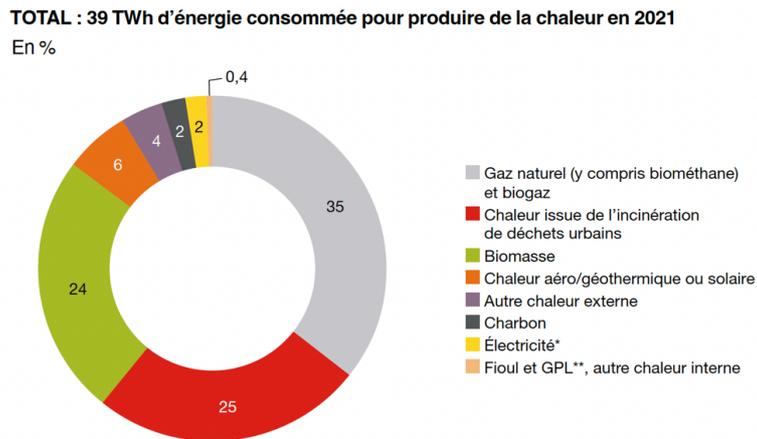
En 2023, les réseaux de chaleur ont livré aux consommateurs près de 30 TWh de chaleur (nette des pertes de distribution), soit 27 % de plus que l'année précédente (figure 7). À cette fin, ils ont consommé 39 TWh d'énergie. Le bouquet énergétique des réseaux demeure dominé par le gaz naturel, qui représente 35 % de leur consommation, suivi de la valorisation des déchets urbains (25 %) et de la biomasse (24 %). Si l'on considère toutefois l'ensemble des énergies renouvelables (incluant notamment par convention la moitié des déchets urbains), elles constituent la première forme d'énergie utilisée dans les réseaux⁶ (Ministère de la transition écologique, 2023).

Les réseaux de chaleur présentent l'intérêt de rendre possible l'utilisation de certaines sources d'énergie qui ne peuvent pas être acheminées jusque dans les immeubles. Si la France souhaite développer sa production d'énergie via les réseaux de chaleur, il faudra à fortiori améliorer son image aux yeux de la population. Cela se fera en :

⁶ En 2020, il y avait 833 réseaux de chaleur en France pour 25,4 TWh de chaleur nette livrée ; un taux d'énergie verte (EnR&R en production) de 60,5% et un taux CO2 moyen de 0,101 Kg/KWh. Ils fournissent 2,46 millions d'équivalents logements (43 945 bâtiments raccordés) au travers de 6 199 km de longueur totale de réseau.

- Montrant aux français que les réseaux de chaleur sont un moyen efficace de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, lorsqu'ils sont alimentés par la géothermie, la biomasse, la chaleur des usines d'incinération ou éventuellement, du charbon avec séquestration de gaz carbonique ou la chaleur fatale de la production d'électricité nucléaire.
- Montrant à la population les autres avantages : sécurité d'approvisionnement, suppression des risques d'incendie ou d'explosion, simplicité de gestion, lutte contre la pollution locale (dioxine, COV, NOx).

Figure 8 : Bouquet Énergétique des réseaux de chaleur en 2023

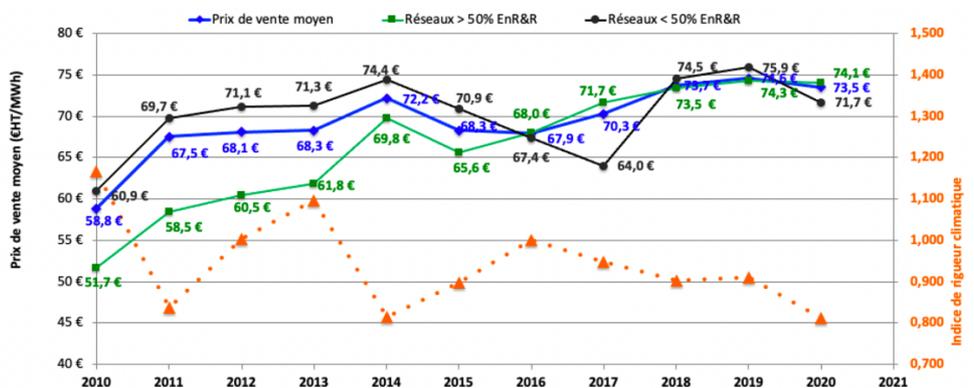


Source : Ministère de la transition écologique, 2021, p. 71

Par ailleurs, l'objectif affiché par le pays est de développer le recours aux ENR. En effet, ces ressources présentes de nombreux avantages, notamment :

- Une stabilité des prix de la chaleur renouvelable sur le long terme. Par rapport à des solutions de chauffage individuel par des énergies fossiles, la chaleur renouvelable offre une plus grande stabilité des prix. L'enquête prix de vente de la chaleur et du froid (2020) réalisé par Amorce/ADEME montre qu'en 2020, le prix moyen des réseaux de chaleur s'est élevé à 73,5€ HT/MWh et que depuis 2010, les évolutions de prix ont été maintenues entre 58,8€ et 73,5€ HT/MWh.

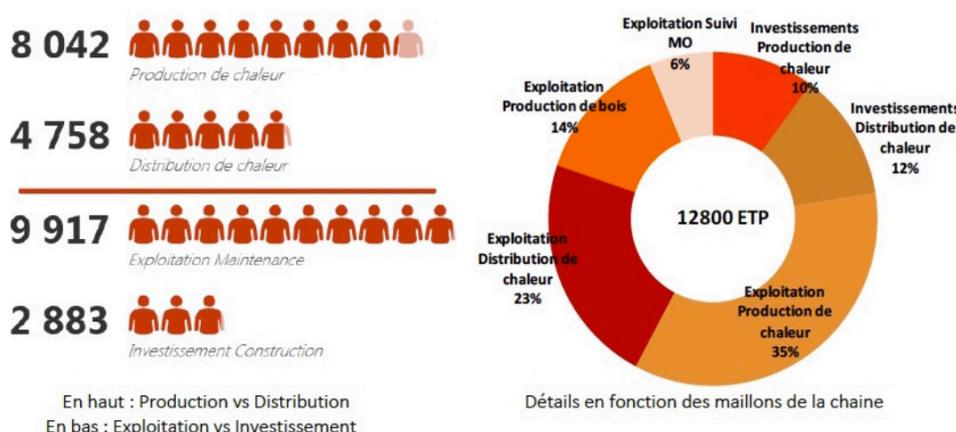
Figure 9 : Evolution du prix de vente moyen de la chaleur (2010 – 2020)



Source : AMORCE/ADEME, 2022

- *La création d'emplois locaux non délocalisables.* Les réseaux de chaleur alimentés en énergie renouvelable permettent de créer des emplois non délocalisables, concernant notamment le conseil et l'appui de projet, la construction, la maintenance. En 2019, l'ADEME a publié une étude montrant que les réseaux de chaleur avaient créé près de 12800 emplois dont 6800 directs sur le territoire national (figure 9). Parmi ces emplois créés sur le territoire national, 82% concernait l'exploitation (production et distribution confondues) et 56% renvoyait à la production de chaleur (exploitation et investissement confondus).

Figure 10 : Répartition des emplois directs et indirects



Source : ADEME (2019)

- *Une indépendance énergétique.* La mobilisation des énergies produites localement permet de diminuer les importations d'énergies fossiles et donc favorise l'indépendance énergétique de la France (Chambon, Corm, 2023).

- *Une économie d'échelle.* La captation de certaines sources d'énergie renouvelable, comme la géothermie profonde, nécessite des investissements massifs et n'est économiquement viable que par la création d'installations centralisées de tailles industrielles reliées à un réseau de chaleur desservant de nombreux utilisateurs (CEREMA, 2016).

- *Un pas marqué vers l'économie de la fonctionnalité.* Les réseaux de chaleur sont avant tout des investissements de collectivités territoriales à l'échelle locale (quartier ou blocs de quartier). Ces dernières deviennent donneuses d'ordre. De ce fait, elles vont jouer un rôle dans l'implantation des réseaux, garantir leur performance économique et organiser la coopération entre toutes les parties prenantes. Les réseaux de chaleur pourraient ainsi contribuer à la transition écologique en s'appuyant sur un modèle économique alternatif, l'économie de la fonctionnalité (Mothe, Grébert, Delfosse, 2022, 2021). Cette alternative suggère que l'offre ou la vente de l'usage d'un bien ou d'un service est plus important que le bien lui-même.

Pour ces différentes raisons, il devient évident qu'il faut rendre la chaleur non fossile des réseaux moins coûteuse au consommateur que la chaleur d'origine fossile. Aujourd'hui, la principale méthode utilisée par l'Etat est la subvention à

l'investissement. Cette méthode est efficace mais demande des mises de fonds importantes et peut induire un suréquipement. Par ailleurs, elle ne permet pas de tenir compte de l'évolution de l'économie de l'énergie, notamment de l'évolution des prix de la biomasse. De ce fait, il pourrait être intéressant de combiner deux modes de financement : la subvention et un prêt à taux variable indexé partiellement sur le prix du bois. Dès lors, il devient alors nécessaire de maximiser les ressources en bois ce qui peut se faire dans une certaine mesure en finançant les opérations de sylviculture par des avances ou des prêts remboursables à tout utilisateur de bois ou organisme intermédiaire (Prévot, 2006). La matrice SWOT présentée ci-dessous (tableau 3) recense les faiblesses, les forces, les opportunités et les contraintes des réseaux de chaleur en France. Elle est susceptible de constituer un outil d'aide à la décision dans la stratégie de transition énergétique des collectivités territoriales, notamment Clermont Auvergne Métropole.

Tableau 3 : Matrice SWOT des réseaux de chaleur pour la CAM

	Opportunités	Menaces
Forces	<ul style="list-style-type: none"> - Potentiel en géothermie - Ressources en bois - Création d'emplois à l'échelle locale - Rendre accessible une source d'énergie non disponible à l'échelle d'un immeuble 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût inférieur du chauffage individuel à partir d'énergies fossiles
Faiblesses	<ul style="list-style-type: none"> - Investissements importants pour les infrastructures en géothermie + pertes conséquentes entre source de production et de consommation - Ressources limitées de bois en France 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation du prix de la tonne de CO2 - Diminution des ressources en énergie fossile

Place des réseaux de chaleur au sein de Clermont Auvergne Métropole

Il existe actuellement quatre réseaux de chaleur (Beaumont, Royat, Croix de Neyrat, et La Gauthière), le réseau Saint-Jacques, en cours d'extension, constitue le 5^e réseau développé par la Métropole⁷.

Le réseau de chaleur de la Croix-de-Neyrat, Champratel et des Vergnes

Le réseau de Croix de Neyrat produit 41 GWh d'énergie thermique. Il est géré par Énergie Clermont-Ferrand Avenir (ECLA), une filiale d'ENGIE Solutions⁸. Il utilise deux types de chaudières : des chaudières à bois et des chaudières à gaz qui peuvent fonctionner au fioul en cas de grand froid.

Pour piloter le réseau et anticiper les dysfonctionnements, des outils de diagnostic sont déployés et mis au service de l'exploitant mais aussi de la ville :

⁷ <https://www.clermontmetropole.eu/fr/preserver-recycler/transition-energetique-et-ecologique/energie-et-changements-climatiques/developpement-des-reseaux-de-chaleur/>

⁸ Site internet Energie Clermont-Ferrand Avenir (ECLA), <https://www.rezomee.fr/energie-clermont-ferrand-avenir/>

- *La cartographie* : enregistrement de toutes les données dans un système d'information géographique qui permet d'exploiter les analyses et incidents éventuels afin d'élaborer une stratégie de maintenance préventive sur le long terme.
- *La thermographie* : le réseau est photographié au moyen de caméras infrarouges qui permettent de visualiser les déperditions thermiques.
- *L'endoscopie* : des caméras introduites dans les canalisations et les caniveaux de réseaux permettent de visualiser leur état ainsi que celui de l'isolant.

Les sous stations situées en pied d'immeuble ne génèrent ni bruit, ni risque d'incendie, ni désagréments liés aux combustibles fossiles (fioul, gaz, charbon). Ils permettent également de développer l'emploi local, la filière d'approvisionnement en combustible bois nécessitant 19 personnes à plein temps. Les installations sont exploitées par ECLA pour une durée de 24 ans. Les coûts et indexations sont négociés et formalisés par la ville de Clermont-Ferrand. C'est la garantie pour tous les usagers d'un tarif unique et de l'égalité de traitement. C'est aussi l'assurance d'une meilleure stabilité des coûts du chauffage en s'affranchissant des fluctuations du prix des énergies fossiles.

SOVEN, filiale de Cofely, est chargée de la mise en œuvre du plan d'approvisionnement en combustible de la chaufferie. Ce sont ainsi chaque année près de 23000 tonnes de bois qui sont collectées dans un rayon de 50 km autour de Clermont-Ferrand. Le combustible est ensuite mélangé et stocké sur la plateforme de Combronde avant d'être acheminé jusqu'à la chaufferie de Clermont-Ferrand. Ce stockage permet de tenir plusieurs jours en cas d'une éventuelle rupture d'approvisionnement. Le bois représente un bilan carbone neutre. Pour le traitement des fumées, elles passent au travers d'un système de filtration élaboré qui garantit des performances supérieures aux exigences réglementaires. Les poussières et cendres sont valorisées en amendement, en produit d'épandage afin d'améliorer le cycle végétal.

Le réseau de chaleur du quartier de la Gauthière

La Gauthière est un quartier populaire qui abrite 5000 habitants au nord-est de Clermont-Ferrand. Il s'agit du premier quartier clermontois équipé d'un réseau de chaleur (dans les années 1960), avec d'abord une chaufferie au fioul puis une chaufferie gaz associée à une cogénération gaz (en 1998)⁹.

Avec environ 70 % d'énergies renouvelables, Clervia, le réseau de chaleur de Clermont-Ferrand est récompensé par le label « éco-réseau de chaleur » pour son efficacité. Le label « éco-réseau de chaleur » met en lumière les réseaux alimentés par plus de 50 % d'énergies renouvelables, ayant un tarif compétitif par rapport aux autres

⁹ *Chaufferie biomasse et extension du réseau de chaleur du quartier de La Gauthière – Clermont-Ferrand – 63*, ADEME, <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2018/07/FICHE-2012-77-MW-Clermont-Auvergne-M%C3%A9tropole-63.pdf>

solutions de chauffage et ayant mis en place un lieu de concertation et d'information avec les usagers.

Filiale de Dalkia France, Clervia est chargée de la délégation de service public du réseau urbain du quartier de la Gauthière à Clermont-Ferrand. D'une longueur de 5,2 km, le réseau de chaleur alimente l'ancien hôtel de la région Auvergne, la cité scolaire Camille Claudel, le musée d'art Roger Quillot, les immeubles de Logidôme, Auvergne Habitat et SCIC Habitat ainsi que le site de Michelin la Combaude en export de chaleur.

La chaufferie, installée depuis 2012, est composée d'une chaudière à bois de 7 MW. L'appoint/secours est assuré par des chaudières gaz (15 MW au total) et par la cogénération gaz (1,5 MWh). Avec un tarif moyen de 64 euros TTC/MWh en 2016, Clervia propose une solution compétitive par rapport au gaz ou au fioul collectifs de 10 à 25 % plus chers¹⁰.

Les 12 000 tonnes/an de bois consommées par la chaufferie sont fournies par BERAM, filiale à 100 % de Dalkia. La plaquette forestière couvre 80 % de l'approvisionnement et le bois de recyclage 20 %. Le bois provient de la plateforme Veolia Propreté d'Aubiat (à 27 km). Le bois est stocké dans un silo de 980 m³ équipé d'un grappin. Le bois est acheminé dans les chaudières par convoyeur. En plein hiver, l'autonomie est de 4 jours. Grâce à 11.800 tonnes de bois énergie qui proviennent du Puy-de-Dôme, 70 % des besoins énergétiques sont satisfaits par des énergies renouvelables. L'installation permet ainsi d'éviter l'émission de 5.000 tonnes de CO₂ par an soit, l'équivalent de 3.000 véhicules retirés de la circulation.

Les fumées sont traitées par un filtre multicyclone couplé à un filtre à manches. Les niveaux d'émissions sont conformes à la réglementation (contrôlés par Atmo Auvergne de 2010 à 2016). Les cendres sous foyer sont épandues en agriculture. Le réseau initial a été étendu de 3,3 km pour atteindre 6,2 km (38 sous-stations, 4 000 équivalents-logements). Il délivre entre 40 000 et 42 000 MWh/an.

Le réseau de chaleur de Royat

Le réseau de chaleur de Royat est long de 700 m alimenté au gaz et permet ainsi de livrer 7 GWh d'énergie thermique. Le réseau est délégué par la ville à la Société Thermique de Royat. Il permet de desservir environ 750 logements dans les alentours¹¹.

¹⁰ Frédéric Douard, *Une chaudière Compte R. de 7,7 MW sur le réseau de chaleur de la Gauthière à Clermont-Ferrand*, Bioénergie International, 7/12/2012, <https://www.bioenergie-promotion.fr/25390/un-chaudiere-compte-r-de-77-mw-sur-le-reseau-de-chaleur-de-la-gauthiere-a-clermont-ferrand/>

¹¹ *L'annuaire des réseaux de chaleur et de froid*, Via Sèva, édition 2016/2017 <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-28507-annuaire-reseau-chaleur-froid.pdf>

Le réseau de chaleur du Masage à Beaumont

Sur la commune de Beaumont, on trouve un réseau de chaleur d'une longueur de 700m dans le quartier du Masage qui distribue de la chaleur sur 550 logements. Le réseau de Beaumont et celui de Royat sont tous deux alimentés par du gaz et possède de la cogénération qui produit aux alentours de 4 GWh. Ce qui permet de livrer près de 5 GWh d'énergie thermique par la délégation de service public confiée à Dalkia. Un projet est en cours pour étendre ces deux réseaux, qui permettra de chauffer 4 000 logements supplémentaires d'ici la fin 2023. Les acteurs principaux de cette expansion sont Engie Solutions (ECLA) et DALKIA (Clervia), les délégataires énergétiques chargés de la mise en œuvre et de la gestion du service.

Le réseau de chaleur HLM Saint-Jacques

Le réseau HLM Saint Jacques est le seul réseau de chaleur dont le maître d'ouvrage n'est pas Clermont Métropole mais est HLM 63-OPAC de Clermont-Ferrand. Ce réseau, géré par Dalkia, est long de 5 km et livre 17 GWh d'énergie thermique à 1800 logements. La chaudière fonctionne au gaz et présente de la cogénération, ce qui permet de produire une production électrique totale de presque 10 GWh.

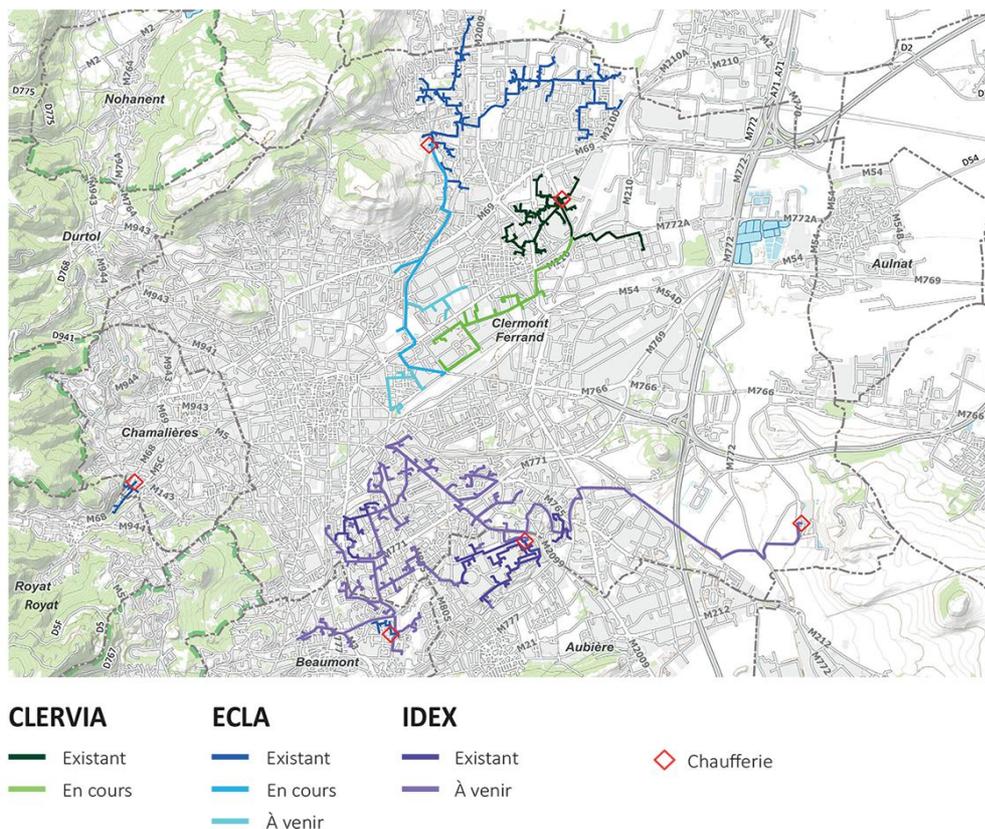
Tableau 4 : récapitulatif des réseaux de chaleur de Clermont Auvergne Métropole

Réseau	RÉSEAU ECLA	QUARTIER LA GAUTHIÈRE	RÉSEAU DE ROYAT	QUARTIER DU MASAGE	HLM SAINT-JACQUES
Maître d'ouvrage	Commune de Clermont-Ferrand	Commune de Clermont-Ferrand	Commune de Royat	Commune de Beaumont	HLM 63-OPAC de Clermont-Ferrand
Société gestionnaire	ECLA	CLERVIA	STR	DALKIA	DALKIA
Longueur du réseau (km)	12,2	4,6	0,7	0,6	5
Equivalents-logements desservis	4132	3687	744	551	1798
Livraisons totales (MWh)	38900	34709	7001	5191	16930
Bouquet énergétique	Biomasse 93% Gaz fossiles 6%	Biomasse 61% Gaz fossiles 39%	Gaz fossiles 100%	Gaz fossiles 100%	Gaz fossiles 100%
Présence de cogénération	Non	Oui	Non	Oui	Oui
Production électrique totale (MWh)	/	5017	/	4138	9974
Emissions de CO2 (kg/kWh)	0,018	0,085	0,231	0,223	0,210

Les extensions du réseau de chaleur

Après Royat et Clermont nord, la chaleur renouvelable se déploie dans le sud de la ville, vers le quartier Saint-Jacques, une partie de Beaumont et d'Aubière.

Figure 11 : Carte des réseaux de chaleur de Clermont Auvergne Métropole¹²



Une extension de 15 km, en cours de déploiement, permettra d'ici fin 2023 – début 2024, d'alimenter 4 000 logements supplémentaires sur les secteurs de Estaing, de la gare, de république, jusqu'au 92e RI ou le site Cataroux Michelin. Une extension est prévue sur le quartier Saint-Jacques, Beaumont et Aubière. 34 km de canalisation devront alimenter le Campus des Cézeaux, le CHU Montpied, le Centre Jean-Perrin, le CROUS. Ce grand projet prévoit également la démolition de la chaufferie connectée aux logements d'Assemblia.

Le réseau sera géré par la société d'économie mixte à opération unique (Semop), créée en partenariat entre la métropole et la société Idex, retenue à l'issue d'un processus de mise en concurrence. Il affichera une longueur de 34 km (dont 26 km nouveaux) et permettra d'alimenter en eau chaude 12 000 équivalents-logements. Un rythme de travaux soutenu est prévu, avec 15 km de réseau créés en 2023, puis 11 km en 2024. Après l'extension, le taux global d'énergie renouvelable sur les deux réseaux clermontois sera de 75 %. Ce nouveau réseau de chaleur permettrait d'économiser

¹² Extension des réseaux de chaleur urbains, Clermont Métropole, <https://www.clermontmetropole.eu/fr/grands-projets/grands-projets-pour-la-transition-energetique/extension-des-reseaux-de-chaleur-urbains/>

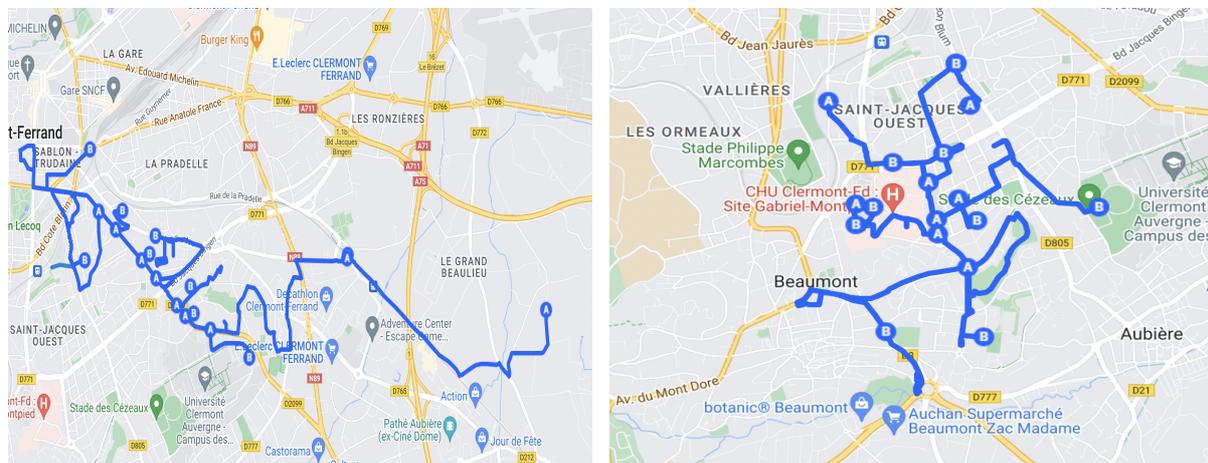
environ 25 000 t supplémentaires de CO₂ par an (Valtom, 2022, Vernéa, 2022). Le déploiement du réseau se fera depuis l'incinérateur de déchets du Valtom (100-140 GWh/an), afin de récupérer une partie de l'énergie qu'il produit, jusqu'à la ZAC du Massage de Beaumont, en passant par les quartiers Fontaine du Bac, Oradou, Cézeaux, Lafayette, Léon Blum, Saint-Jacques, CHU et Mairie de Beaumont (la métropole clermontoise a investi près de 47 millions d'euros pour ce réseau.)

Les réseaux de chaleur jouent donc un rôle crucial dans l'effort de Clermont Métropole pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et favoriser la transition énergétique. Ils illustrent également comment les acteurs locaux, tels que les municipalités, les fournisseurs d'énergie et les entreprises de services publics, peuvent travailler ensemble pour développer des solutions d'énergie durable à l'échelle locale. Cette forme de symbiose industrielle et urbaine repose sur une restructuration complète des flux de matière et d'énergie (optimisation des déchets de l'incinérateur) qui existent sur le territoire, via une source d'énergie durable (incinérateur de Valtom) et le positionnement de l'acteur principal (acteur public, Clermont Auvergne Métropole).

Le réseau Saint Jacques : Méthodologie et résultats

L'étude porte principalement sur l'impact socio-économique et environnemental du tracé du réseau de chaleur du quartier Saint-Jacques, alimenté par l'incinérateur de Valtom.

Figure 12 : Visualisation du tracé du réseau de chaleur



Toutefois, nous avons souhaité aller au-delà de la commande publique, qui visait à réunir une base de données afin de quantifier l'ensemble des flux (matières, énergie), économiques...) du réseau¹³.

¹³ Cette étude repose sur la mobilisation d'une boîte à outils que nous avons développée dans le cadre d'une formation universitaire et d'un projet de recherche financé par l'AUF (Diemer, 2023). Le projet IATBLOOP (*Integrated Assessment Tools Box for Living On One Planet*), notamment la conception d'une toile numérique visant à capturer toutes les données du territoire), entend permettre aux collectivités publiques d'accéder à des outils leur permettant d'évaluer leurs politiques publiques (Diemer, Batisse, Chan, 2023).

Encadré 1 : La transition écologique et énergétique de Clermont Auvergne Métropole

TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Expérimenter pour dessiner le Saint-Jacques de demain

Le projet de grand parc métropolitain fait l'objet d'expérimentations au sein du quartier Saint-Jacques, à Clermont-Ferrand. L'objectif ? Imaginer un parc durable pour l'avenir.



Le quartier Saint-Jacques est le théâtre de nombreuses expérimentations, dans le cadre du projet de renouvellement urbain de Clermont Auvergne Métropole, financé par l'ANRU (Agence nationale pour la rénovation urbaine). Élément phare de ce projet, la déconstruction des bâtiments de la muraille de Chine et de l'Allée des Dômes, remplacés par un grand parc urbain.

"Le paysagiste nous a conseillé des plantations avec des essences résistantes aux changements de climat dans les 50 prochaines années", explique Véronique Delgado, cheffe du projet à la Métropole. Un projet de recherche a donc été proposé en collaboration entre le cabinet urbaniste-paysagiste Devillers & Associés, la Métropole et le Laboratoire UMR-PIAF de l'INRAE et l'UCA. Parmi les critères étudiés : la sécheresse et la résistance au gel.

Les chercheurs du laboratoire mènent actuellement deux actions. La première consiste à suivre les enregistrements de dix capteurs qui ont été placés sur des tilleuls situés au nord et au sud de la muraille de Chine. Ils mesurent la croissance et le stress hydrique (son besoin en eau, NDLR) de l'arbre au quotidien. "Ces données nous permettent par exemple de voir qu'il y a des signes

de dépérissement sur les tilleuls exposés plein sud", détaille Thierry Arneglio, qui a passé 30 ans à mettre au point ces capteurs. Le chercheur aimerait continuer à enregistrer les données une fois que la muraille sera détruite (privant ainsi les arbres de son ombre ou de son effet pare-vent), afin de suivre l'évolution de son expérience sous de nouvelles conditions climatiques.

La deuxième action, elle, se passe au sein du laboratoire. "On va extraire une quinzaine d'essences en partie présente sur le quartier et en proposer d'autres. Nos outils de recherche vont nous permettre de tester leur résistance aux contraintes hydriques et thermiques", résume Thierry Arneglio. Parmi celles envisagées se trouvent notamment le micocoulier (un arbre de Provence) ou encore le chêne vert, une essence également méditerranéenne. "Nous allons être obligés de faire de la migration assistée pour faire face à la vitesse des changements climatiques, ce qui veut dire planter des espèces plutôt venues du sud", constate le chercheur.

Le choix des essences se fera ensuite en concertation entre le laboratoire, le paysagiste et la Métropole. La livraison du parc est prévue début 2026. D'ici-là, la Métropole souhaite présenter aux habitants le résultat des expérimentations à la maison du projet.

LA TOILE SE TISSE ...

Et si le quartier Saint-Jacques pouvait se dupliquer sur un espace numérique sur lequel observer les flux énergétiques entrants et sortants ? C'est le principe d'une toile énergétique imaginée par la direction de la Métropole Intelligente et la direction du Développement Durable et Énergie de la Métropole. Cet outil servirait entre autres à identifier les leviers d'action au niveau local pour réduire la part de consommation d'énergie non renouvelable et augmenter celle de l'énergie renouvelable. Grâce aux mutations en cours dans le quartier, des données énergétiques ont déjà été récoltées, permettant d'envisager le projet. En début d'année, des étudiants de l'Université Clermont Auvergne iront notamment à la rencontre des habitants du quartier Saint-Jacques pour recueillir des données sur les caractéristiques des habitations et leur mode de chauffage.

JANVIER / FÉVRIER 2023 | MÉTROPOLIS | 25

En effet, au fur et à mesure que nous constituons cette base de données, nous nous sommes aperçus que la métropole n'avait aucune information sur ce que représentait l'énergie du point de vue des usagers (en l'occurrence les résidents). Dans un contexte de hausse des prix de l'énergie (conflit entre l'Ukraine et la Russie), il nous est apparu pertinent de réaliser une enquête auprès des résidents, vivant à proximité du futur réseau de chaleur afin d'appréhender leur équipement (chaudière à gaz ou à fioul, chauffage électrique...), de mettre en lumière le coût de l'énergie (factures des usagers et des commerçants), la date du bâti (dans une perspective de rénovation thermique des bâtiments) et surtout replacer les impacts du futur réseau en termes d'investissements publics. Ce qui justifie principalement l'investissement dans un réseau de chaleur, c'est la volonté des métropoles de réduire leurs gaz à effet de serre et de sécuriser leur approvisionnement en énergie. Concrètement, cela signifie que le tracé du réseau de chaleur suit les points de surconsommation d'énergie. Il s'agit principalement d'infrastructures telles que les patinoires, les piscines, les hôpitaux, les résidences d'étudiants, les logements collectifs... De ce fait, les habitations

individuelles sont très souvent écartées du périmètre du réseau de chaleur, et très peu d'études estiment le coût de raccordement des usagers au réseau de chaleur. Lors de notre enquête, nous nous sommes ainsi aperçus que les résidents étaient très peu informés sur l'usage de la chaleur, la plupart des personnes sondées nous ont demandé quand leur logement serait raccordé au réseau. D'une certaine manière, ils subissaient au quotidien les travaux du tracé du réseau en prenant conscience qu'ils ne tireraient pas de profil individuel de ces investissements.

Notre méthodologie repose sur les 4 axes structurants suivants : 1° la réalisation d'un questionnaire et d'une enquête de terrain (porte-à-porte) afin d'approfondir nos connaissances du système énergétique local ; 2° la restructuration de la base de données (brutes) sous la forme un data management afin de cerner les indicateurs pertinents au niveau de l'évaluation des politiques publiques ; 3° la construction de diagrammes de boucles causales afin d'appréhender toutes les interdépendances ; 4° la mobilisation du récit et des scénarios pour projeter une image du futur de la métropole.

La réalisation du questionnaire et les principaux résultats de l'enquête de terrain

La première étape de notre méthodologie a consisté en une enquête de terrain. Nous avons effectué un tracé sur le réseau (voir figure 11) et interrogé les résidents et les commerçants du quartier. Nous leur avons demandé de remplir un questionnaire qui comprenait des questions sur le type d'énergie utilisé, le type de chauffage (individuel ou collectif), la consommation en kWh par mois, le coût de l'énergie, le nombre de personnes dans le ménage, le type de rénovation récente, la superficie de la maison ou de l'appartement, et l'ancienneté du bâtiment (annexe 1) :

- *Type d'énergie utilisée* : Il est important de connaître le type d'énergie utilisé par chaque ménage et commerce pour comprendre le mix énergétique actuel du quartier. Cela nous aide à évaluer la prévalence des sources d'énergie renouvelables et non renouvelables et à identifier les opportunités de transition vers des sources d'énergie plus durables.
- *Chauffage individuel ou collectif* : Cette information nous aide à comprendre comment le chauffage est organisé dans le quartier, ce qui est crucial pour l'évaluation de l'efficacité énergétique et le potentiel d'amélioration.
- *Consommation en kWh par an*: Cette donnée nous donne une idée de la quantité d'énergie consommée par chaque ménage ou commerce, ce qui est essentiel pour évaluer l'efficacité énergétique et l'impact environnemental.
- *Facturation par mois* : En connaissant les coûts énergétiques mensuels, nous pouvons évaluer l'impact économique des différents types d'énergie et identifier les opportunités de réduction des coûts.

- *Nombre de personnes dans le ménage* : Cela nous permet d'évaluer la consommation énergétique par personne, ce qui est un indicateur important de l'efficacité énergétique.
- *Type de rénovation récente* : Cette information nous aide à comprendre comment le quartier évolue en termes d'efficacité énergétique.
- *Surface de l'appartement ou de la maison* : Cela nous donne une idée de la taille des espaces chauffés, ce qui est crucial pour l'évaluation de l'efficacité énergétique.
- *Ancienneté du bâtiment* : Les bâtiments plus anciens ont tendance à être moins efficaces sur le plan énergétique que les bâtiments plus récents. Cette information nous permet d'identifier les bâtiments qui pourraient bénéficier le plus d'améliorations en matière d'efficacité énergétique.

Afin de nettoyer et d'analyser les données de notre base, nous avons utilisé un code Python. Grâce à ce code, nous avons pu explorer et comprendre en profondeur les différentes colonnes de notre base, ce qui nous a fourni des informations précieuses pour notre simulation.

Figure 13 : Extrait du code Python

```
data[data["Type"] == "Collectif"]["Type"] = 'Collectif'
data[data["Type"] == "Individuel"]["Type"] = 'Individuel'
```

```
<ipython-input-37-eae35616b0d4>:1: SettingWithCopyWarning:
A value is trying to be set on a copy of a slice from a DataFrame.
Try using .loc[row_indexer,col_indexer] = value instead

See the caveats in the documentation: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/user_guide/indexing.html#returning-a-view-versus-a-copy
data[data["Type"] == "Collectif"]["Type"] = 'Collectif'
<ipython-input-37-eae35616b0d4>:2: SettingWithCopyWarning:
A value is trying to be set on a copy of a slice from a DataFrame.
Try using .loc[row_indexer,col_indexer] = value instead

See the caveats in the documentation: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/user_guide/indexing.html#returning-a-view-versus-a-copy
data[data["Type"] == "Individuel"]["Type"] = 'Individuel'
```

```
data.columns
```

```
Index(['nom', 'Adresse', 'Commune', 'Type Local', 'Nombre de logements',
      'Ancienneté du bâti', 'Type', 'Type d'énergie',
      'Superficie du logement m²', 'Consommation totale d'électricité',
      'Consommation énergétique (par an) 2022',
      'Facturation énergétique par an 2022(en euro)'],
      dtype='object')
```

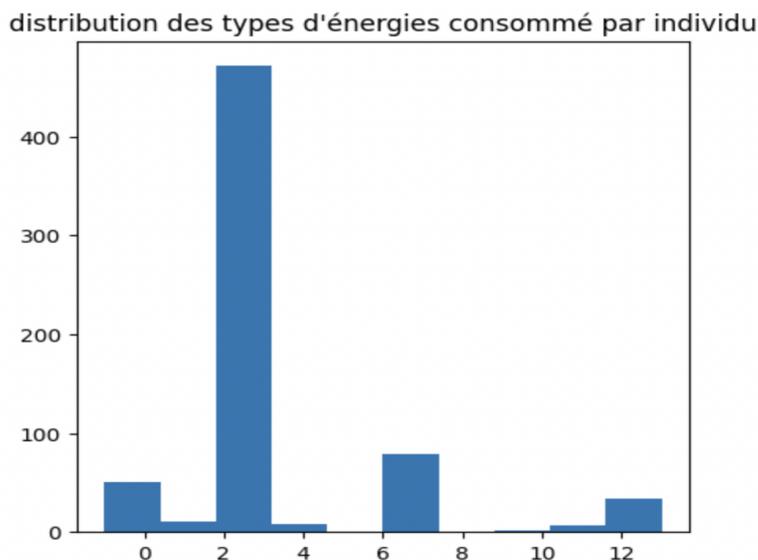
```
for col in data.columns:
    if col != "Consommation énergétique (par an) 2022" :
        data[col] = data[col].fillna('non renseigné')
```

```
a = data["Type"].unique()
a
```

Source : Les auteurs

L'une des principales motivations derrière l'élaboration de ce code était de nettoyer les données en éliminant les valeurs manquantes, les doublons et les incohérences. En effectuant cette étape cruciale, nous avons pu obtenir des données fiables et de haute qualité, sur lesquelles nous pouvions baser nos analyses et nos conclusions. En utilisant les bibliothèques et les fonctions appropriées du langage Python, nous avons pu représenter ces données sous forme de graphiques et de visualisations.

Figure 14 : Répartition des sources d'énergie utilisées dans les logements

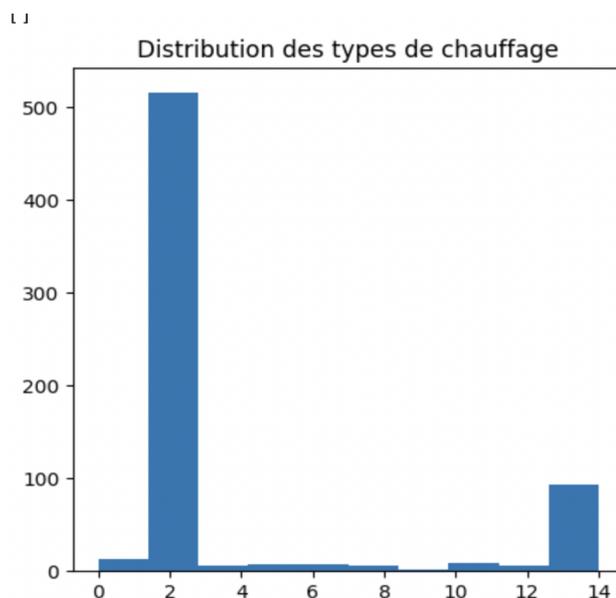


Le graphe représente la répartition des sources d'énergie utilisées dans les logements, avec les catégories suivantes : électrique (0), électrique/gaz (1), gaz (2), électrique/poêle à bois (3), fioul (4), électrique (5), non spécifié (6), électricité (7), électricité + gaz (8), fioul + électricité (9), électricité (10), chauffage urbain (11), mixte (gaz + élec) (12) et autre (13). Dans ce graphe et dans les suivants, les valeurs non-renseignées sont remplacées par 0.

L'analyse complète des données sur les différents types de chauffage révèle plusieurs informations intéressantes. Tout d'abord, le chauffage au gaz est clairement le plus répandu dans l'échantillon, avec 471 individus (environ 69,6%) l'ayant adopté. Cette prévalence peut s'expliquer par la disponibilité et la rentabilité du gaz comme source d'énergie pour le chauffage domestique. En revanche, le chauffage électrique est moins fréquent, avec seulement 16 individus (environ 2,4%) l'utilisant comme principale source de chaleur. Cela peut être dû à des facteurs tels que le coût potentiellement plus élevé de l'électricité par rapport au gaz, ainsi qu'à des considérations environnementales liées à la production d'électricité. Parmi les autres types de chauffage, nous observons des utilisations moins répandues. Par exemple, le chauffage électrique combiné à un poêle à bois n'est utilisé que par un seul individu. De même, le chauffage au fioul est choisi par seulement 8 individus. Ces types de chauffage moins courants peuvent être influencés par des facteurs tels que la disponibilité des ressources (comme le bois ou le fioul) ou les préférences individuelles des utilisateurs. Il convient de noter que 35 individus n'ont pas renseigné le type de chauffage qu'ils utilisent, ce qui représente environ 5,2% de l'échantillon. Ces données manquantes peuvent avoir un impact sur l'analyse et la compréhension complètes des tendances de chauffage dans la population étudiée. Il est donc important de prendre en compte cette lacune lors de l'interprétation des résultats.

Une analyse plus approfondie pourrait être effectuée pour étudier les facteurs qui influencent le choix des différents types de chauffage. Cela pourrait inclure l'examen des caractéristiques socio-économiques des individus, telles que le niveau de revenu ou le type de logement, ainsi que des facteurs géographiques tels que la localisation et le climat. Une telle analyse pourrait fournir des informations précieuses pour les décideurs politiques et les fournisseurs d'énergie afin de promouvoir des solutions de chauffage durables, efficaces et économiques.

Figure 15 : Répartition de types de logement



Le graphe représente la répartition des types de logement ou établissements, avec les catégories suivantes : collectif(0), individuel(1), individuel(2), tabacs/bars(3), pharmacies/laboratoires (4), établissements scolaires (5), restaurations (6), boulangeries (7), boucheries (8), supermarchés (9), résidence étudiante (10), banques (11), autres (12), collectif (13) et mixte (base + appoint) (14)

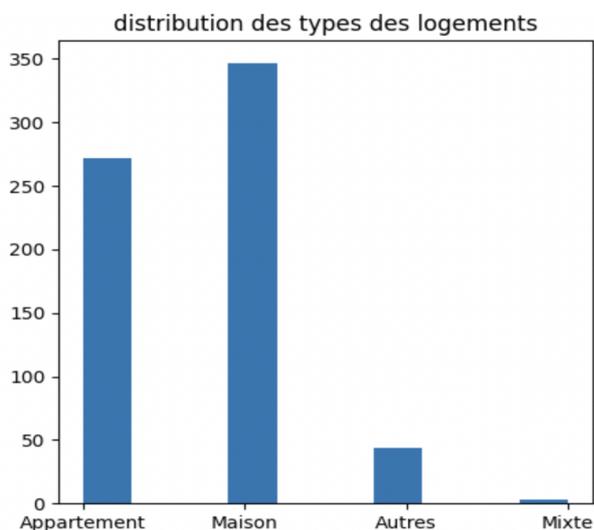
L'analyse complète des données sur les différents types de chauffage révèle les informations suivantes. Parmi les individus étudiés, 5 d'entre eux (environ 0,7%) utilisent un chauffage collectif, tandis que 8 individus (environ 1,2%) optent pour un chauffage individuel. Il est intéressant de noter que 516 individus (environ 76,9%) ont également été répertoriés comme utilisant un chauffage individuel. D'autre part, nous constatons que certains types de bâtiments ou d'établissements utilisent des types de chauffage spécifiques. Par exemple, 2 individus (environ 0,3%) associés à des tabacs/bars ont été répertoriés comme utilisant un type de chauffage spécifique à leur secteur d'activité. De même, 4 individus (environ 0,6%) associés à des pharmacies/laboratoires ont été répertoriés avec un type de chauffage particulier. Cette tendance se poursuit avec d'autres types d'établissements, tels que les établissements scolaires (7 individus), les restaurants (8 individus), les boulangeries (3 individus), les boucheries (3 individus), les supermarchés (2 individus), les résidences étudiantes (3 individus), les banques (6 individus), et autres catégories (6 individus).

En outre, il est important de noter que 90 individus (environ 13,4%) ont été répertoriés comme utilisant un chauffage collectif. Ce type de chauffage est souvent associé aux bâtiments résidentiels ou aux complexes d'appartements où plusieurs unités sont chauffées par un seul système central. Ces chiffres démontrent la diversité des types de chauffage utilisés dans l'échantillon étudié.

Cette analyse descriptive des données sur les différents types de chauffage révèle une diversité de méthodes de chauffage utilisées dans l'échantillon étudié. Le chauffage au gaz est le plus couramment utilisé, suivi du chauffage électrique. D'autres types de chauffage, tels que le fioul, le chauffage urbain et les systèmes mixtes, sont également présents mais moins répandus. De plus, il est intéressant de noter que certains types d'établissements ont des préférences spécifiques en matière de chauffage, ce qui suggère une certaine adaptation aux besoins et aux contraintes de chaque secteur. Cependant, il est important de prendre en compte les cas où les données sont mal renseignées ou mal classées, car cela peut affecter la fiabilité des résultats.

Cette analyse descriptive des données constitue une première étape pour mieux comprendre la répartition des types de chauffage dans cet échantillon spécifique. Des analyses plus avancées peuvent être effectuées pour explorer les relations entre les types de chauffage et d'autres variables, telles que la consommation énergétique, la superficie du logement ou le coût de l'énergie, afin de fournir des informations plus approfondies et utiles pour les décisions futures en matière d'énergie et de politique environnementale.

Figure 16 : Répartition des types de logement dans le quartier Saint Jacques



Le graphique représentant la répartition des types de logements dans le quartier Saint Jacques nous offre une vision claire de la composition du quartier en termes de logements, notamment les maisons, les appartements et les autres types de bâtiments. Cette information est cruciale pour comprendre les besoins énergétiques spécifiques

de la région. En observant la proportion de chaque type de logement, nous pouvons commencer à évaluer les différentes demandes énergétiques qui existent dans le quartier. Par exemple, les maisons individuelles peuvent avoir des profils de consommation d'énergie distincts par rapport aux appartements, en raison de leur taille, de leur conception ou du nombre de résidents. De même, les bâtiments non résidentiels, tels que les commerces ou les bureaux, peuvent avoir des besoins énergétiques spécifiques. Lors de notre enquête sur les points de raccordement au réseau de chaleur, nous avons constaté que les maisons du quartier Saint-Jacques ne seraient pas raccordées au réseau de chaleur. Cette constatation peut être décevante pour les résidents, étant donné le nombre significatif de maisons représentées dans le tracé du nouveau réseau de chaleur. Il est donc intéressant de proposer un scénario alternatif où les maisons seraient raccordées au réseau de chaleur, afin qu'elles puissent bénéficier des avantages offerts par ce système. En incluant les maisons dans le réseau de chaleur, nous pourrions optimiser l'utilisation de cette infrastructure énergétique. Les maisons pourraient profiter des économies d'énergie, de la réduction des émissions de CO₂ et des autres avantages liés à l'utilisation du réseau de chaleur. De plus, cela permettrait d'assurer une transition énergétique plus globale dans le quartier Saint-Jacques, en intégrant tous les types de logements dans une approche cohérente et durable.

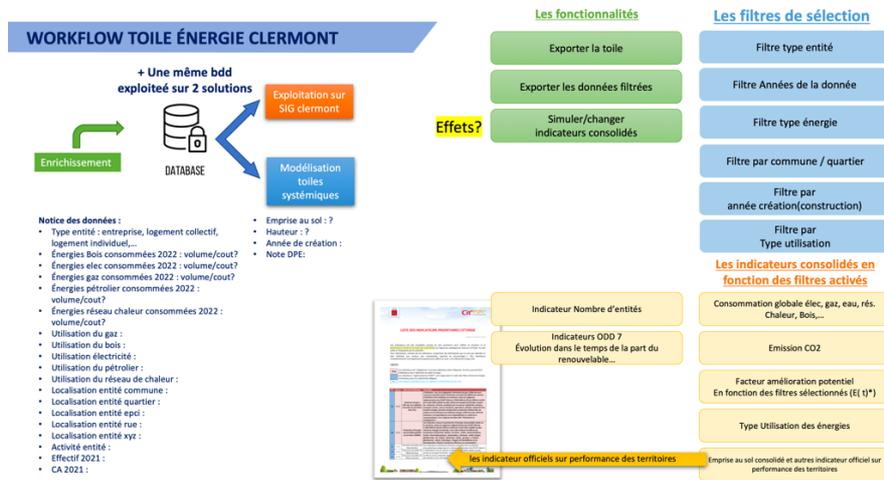
Proposer un scénario où les maisons seraient raccordées au réseau de chaleur nécessiterait cependant une évaluation plus approfondie des coûts, des infrastructures nécessaires et des impacts potentiels. Il serait également important de prendre en compte les préférences et les besoins des résidents concernés. Cependant, cela pourrait constituer une opportunité intéressante pour la Métropole Clermontoise de promouvoir une solution énergétique plus complète et de maximiser les avantages du réseau de chaleur dans le quartier Saint-Jacques.

La structuration de la base de données autour de la toile énergétique

A partir des résultats de notre enquête, nous avons travaillé en étroite collaboration avec les autorités locales, notamment Clermont Métropole. Cela nous a permis d'accéder à des données publiques précieuses qui ont complété les informations recueillies lors de notre enquête. Ces données incluent des informations sur l'infrastructure énergétique du quartier, les projets de rénovation énergétique, et les politiques énergétiques locales. Une fois les données collectées, nous les avons organisées dans un fichier Excel, les classant par catégorie pour faciliter leur analyse. Nous avons distingué les données de stock et de flux pour mieux comprendre les différents aspects de la consommation énergétique du quartier. Nous avons ensuite mis en place des indicateurs énergétiques pertinents pour évaluer l'efficacité de nos actions et orienter nos décisions. Ce travail a permis d'identifier la pertinence et les retombées potentielles d'une construction de la toile numérique. Le data-management trouve des applications intéressantes pour visualiser et analyser l'ensemble des données spatiales (c'est le Système d'information Géographique, SIG, qui permet de

comprendre la répartition géographique de la consommation d'énergie dans le quartier et de repérer les zones où des actions pourraient être menées pour améliorer l'efficacité énergétique) et appréhender le système énergétique local (raisonnement en termes de systémique).

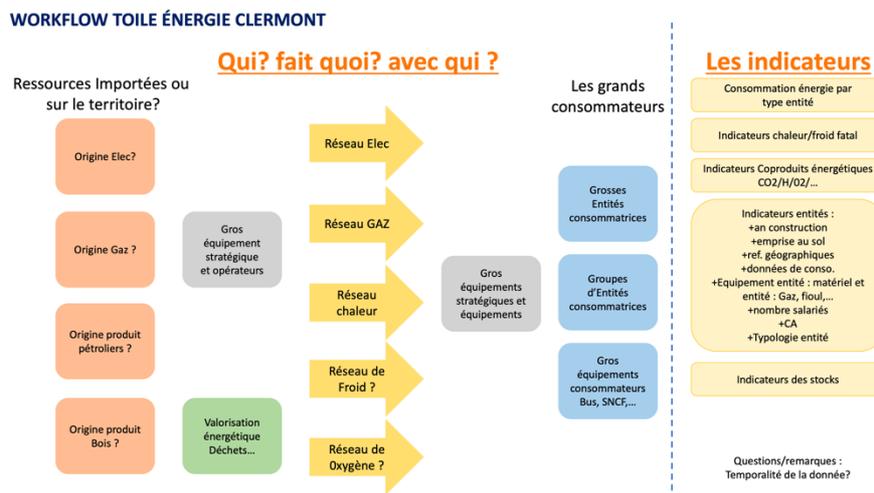
Figure 17 : Configuration de la toile numérique



Source : Les auteurs

La toile numérique constitue un moyen de structurer la base de données, par entités (acteur, infrastructures) et par flux (matières, énergie...). Elle permet de comprendre qui fait quoi et avec qui (Diemer, Batisse, Chan, 2023). On y décèle les ressources mobilisées, les grands producteurs et distributeurs, les grands consommateurs et utilisateurs, ainsi que les indicateurs que l'on souhaite mettre en évidence.

Figure 18 : Intégration des entités et des flux



Source : Les auteurs

La base de données constituée contient 666 entrées (figure 17), représentant des bâtiments résidentiels. Elle est composée de 12 colonnes qui fournissent différentes informations sur ces bâtiments.

Figure 19 : Structuration de la Database

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	nom	Adresse	Commune	Type Local	Nombre de logements	Année de construction	Type	Type d'énergie	Surface du logement m ²	Consommation totale d'électricité	Consommation énergétique (par m ²) 2022	Facturation énergétique par an (2022(en euro))
1	logement	13 Paul Pochet Lagaye	Clemon-Ferrand (p 63000)	Appartement	N/A	N/A	Collectif	Electrique	25	N/A	N/A	600-1000
2	logement	17bis Boulevard Lafayette	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	169	N/A	N/A	1000-1500
3	logement	31 rue Berrux	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	130	N/A	N/A	>1500
4	logement	25 rue Armande Belgin	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1920	Individuel	Electrique+Pois a bois	75	N/A	N/A	600-1000
5	logement	70 rue neuf soie	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1920	Individuel	Electrique	170	N/A	N/A	1000-1500
6	logement	50 rue neuf soie	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1920	Individuel	Electrique	87	N/A	N/A	>1500
7	logement	58 rue neuf soie	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1937	Individuel	Electrique	130	N/A	N/A	>1500
8	logement	20 rue Neuf soie	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1922	Individuel	Electrique	70	N/A	N/A	1000-1500
9	logement	60 rue neuf soie	Clemon-Ferrand (p 63000)	Appartement	1	1922	Individuel	Electrique	140	N/A	N/A	1000-1500
10	logement	17 Paul Pochet Lagaye	Clemon-Ferrand (p 63000)	Appartement	N/A	N/A	Collectif	Electrique	30	N/A	N/A	600-1000
11	logement	19 Paul Pochet Lagaye	Clemon-Ferrand (p 63000)	Appartement	N/A	N/A	Collectif	Electrique	25	N/A	N/A	600-1000
12	logement	Ale de Migot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	70	N/A	N/A	1000-1500
13	logement	48 Alle de Rochefaille	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	90	N/A	N/A	>1500
14	logement	Rue Chereuil	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	70	N/A	N/A	1000-1500
15	logement	Rue Chereuil	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	70	N/A	N/A	1000-1500
16	logement	Rue Chereuil	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1925	Individuel	Electrique	39	N/A	N/A	600-1000
17	logement	24 rue Armande Belgin	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	160	N/A	N/A	>1500
18	logement	Rue Alevs Piron	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	37	N/A	N/A	1000-1500
19	logement	Rue Alevs Piron	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	70	N/A	N/A	>1500
20	logement	Rue Alevs Piron	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	110	N/A	N/A	>1500
21	logement	Rue Alevs Piron	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	70	N/A	N/A	1000-1500
22	logement	Rue Alevs Piron	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	40	N/A	N/A	600-1000
23	logement	Rue des garulilles	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	25	N/A	N/A	>1500
24	logement	Rue des garulilles	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1933	Individuel	Electrique	120	N/A	N/A	>1500
25	logement	Boulevard Claude Bernard	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1930	Individuel	Electrique	67	N/A	N/A	1000-1500
26	logement	Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1950	Individuel	Electrique	110	N/A	N/A	1000-1500
27	logement	Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1950	Individuel	Electrique	260	N/A	N/A	>1500
28	logement	Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1950	Individuel	Electrique	120	N/A	N/A	>1500
29	logement	Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1938	Individuel	Electrique	100	N/A	N/A	1000-1500
30	logement	Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	30	N/A	N/A	600-1000
31	logement	Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	N/A	Individuel	Electrique	60	N/A	N/A	>1500
32	logement	Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	45	N/A	N/A	>1500
33	logement	Rue des Lorientis	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	54	N/A	N/A	1000-1500
34	logement	Rue des Lorientis	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	120	N/A	N/A	1000-1500
35	logement	Rue Berrux	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1970	Individuel	Electrique	142	N/A	N/A	600-1000
36	logement	Rue Berrux	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	30	N/A	N/A	>1500
37	logement	Rue Gaspard Morge	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Fioul	60	N/A	N/A	1000-1500
38	logement	Rue Gaspard Morge	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1950	Individuel	Electrique	90	N/A	N/A	>1500
39	logement	25 bis rue Docteur Vignaud	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	24	N/A	N/A	>1500
40	logement	23 bis rue Docteur Vignaud	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	60	N/A	N/A	>1500
41	logement	37 rue Docteur Vignaud	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1932	Individuel	Electrique	72	N/A	N/A	1000-1500
42	logement	37 rue Docteur Vignaud	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1932	Individuel	Electrique	65	N/A	N/A	1000-1500
43	logement	37 rue Alevs Piron	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1959	Individuel	Electrique	140	N/A	N/A	>1500
44	logement	16 rue Docteur Vignaud	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	200	N/A	N/A	>1500
45	logement	120 avenue Leon Blum	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	25	N/A	N/A	>1500
46	logement	10 rue Armande Belgin	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	148	N/A	N/A	>1500
47	logement	12 rue des neufs soie	Clemon-Ferrand (p 63000)	Maison	1	1960	Individuel	Electrique	70	N/A	N/A	>1500
48	logement	17 (sept-38) Bd Paul Pochet Lagaye	Clemon-Ferrand (p 63000)	Appartement	N/A	N/A	Collectif	Electrique	20	N/A	N/A	N/A
49	logement	17 Bd Paul Pochet Lagaye	Clemon-Ferrand (p 63000)	Appartement	N/A	N/A	Collectif	Electrique	25	N/A	N/A	N/A
50	logement	2 Rue Henri Pourrat	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Collectif	Electrique	N/A	N/A	N/A	N/A
51	Tabac Presse Le Mugliano	2 Rue Henri Pourrat	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Tabac/Bars	Electrique	N/A	N/A	N/A	N/A
52	Bar abas Couchoux	67 Rue Alexandre Ribot	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Tabac/Bars	Electrique	N/A	N/A	N/A	N/A
53	Pharmacie Duval	1 Rue Henri Pourrat	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Pharmacie/Laboratoire	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
54	Pharmacie des Lorientis	30 Rue des Lorientis	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Pharmacie/Laboratoire	Electrol	N/A	N/A	N/A	N/A
55	Pharmacie des Neuf Soies	82 Av. Leon Blum	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Pharmacie/Laboratoire	Electrol	N/A	N/A	N/A	N/A
56	Laboratoire Maxou Mymet	7 Pl. Henri Durant	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Pharmacie/Laboratoire	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
57	Ecole Primaire Jean Meot	14 Rue Berrux	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
58	Ecole Maternelle et primaire Jean Juvelé	14 Rue Albert Mallet	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
59	FSP (institut de formation)	1 Rue des Pâlis	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
60	La Ronde	1 Bd Winston Churchill	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
61	Pharmacie de Médecine	28 Pl. Henri Durant	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
62	Pharmacie de Médecine	26 Av. Leon Blum	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
63	Pharmacie de Médecine	41 Bd Claude Bernard	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
64	Pharmacie de Médecine	16 Rue George Risler	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Etablissements scolaires	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
65	Pharmacie de Médecine	15 Rue des Pâlis	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Restaurants	Electrical + Gaz	N/A	N/A	N/A	N/A
66	Le Relais Gourmand 2	90 Av. Leon Blum	Clemon-Ferrand (p 63000)	Autres	N/A	N/A	Restaurants	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

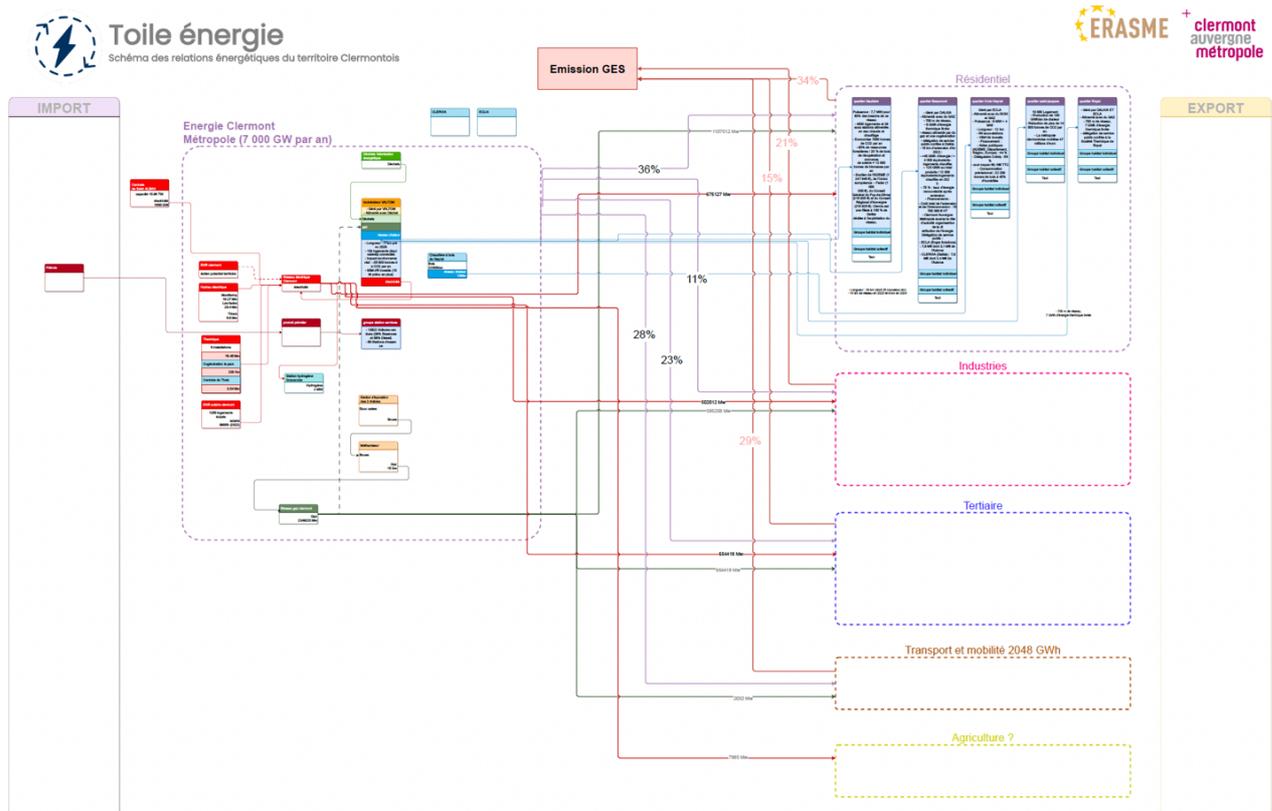
Source : les auteurs

La colonne "nom" contient les noms des individus ou des bâtiments. La colonne "Adresse" indique l'adresse de chaque bâtiment, tandis que la colonne "Commune" donne la commune où se trouve chaque bâtiment. La colonne "Type Local" spécifie le

type de local ou de bâtiment étudié. On retrouve également la colonne "Nombre de logements" qui indique le nombre de logements présents dans chaque bâtiment. Cependant, il convient de noter que cette colonne comporte quelques valeurs manquantes. L'ancienneté des bâtiments est renseignée dans la colonne "Ancienneté du bâti", exprimée en années. Elle permet d'évaluer la durée depuis la construction de chaque bâtiment. L'une des informations clés de cette base de données concerne le type de chauffage utilisé dans chaque bâtiment, renseigné dans la colonne "Type". Les différents types de chauffage incluent l'électrique, le gaz, le fioul, le chauffage urbain, ainsi que des combinaisons de ces sources d'énergie. La colonne "Type d'énergie" précise le type d'énergie utilisé pour le chauffage, correspondant aux types de chauffage mentionnés. D'autres colonnes de la base de données incluent des informations sur la superficie des logements, la consommation totale d'électricité, la consommation énergétique annuelle de 2022 et la facturation énergétique annuelle en euros.

Ces données, structurées autour d'un fichier Excel par entités et d'un fichier Excel par flux croisés, a permis de proposer une première ébauche de la toile énergétique (Diemer, 2023).

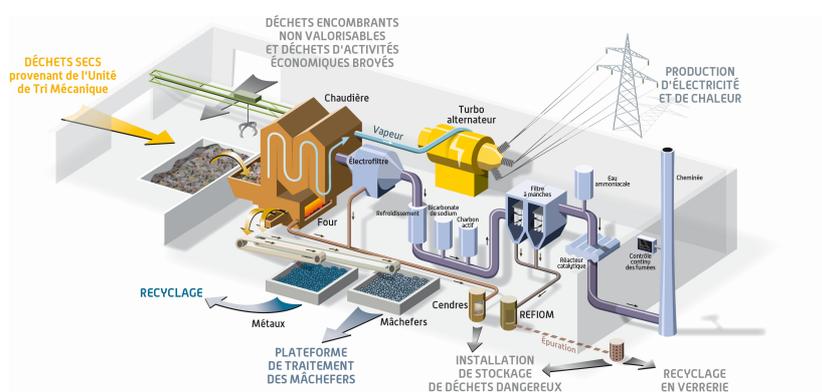
Figure 20 : Illustration d'une première toile énergétique



Source : Les auteurs

Dans le cas de l'unité de valorisation énergétique, les déchets secs sont définis par un leur pouvoir calorifique. C'est grâce à leur combustion que l'on va produire de l'électricité. La chaleur produite par la combustion (900°C à 1100°C) transforme l'eau en vapeur. La vapeur actionne un turbo-alternateur qui produit de l'électricité. Cela produit l'équivalent des besoins en électricité de 85 000 habitants (la moitié de Clermont-Ferrand) hors chauffage, soit 120 000 MWh/an. Une partie permet le fonctionnement du pôle (16% à 18%), le reste est revendu sur le réseau électrique local. L'unité de valorisation énergétique permet de valoriser une tonne de déchet sous la forme de chaleur et de production d'électricité, soit l'équivalent de 450 kWh, ou encore de 220 kg de fuel (de ce fait, on peut dire qu'une tonne de déchet a le même pouvoir calorifique que 220 kg de fuel).

Figure 23 : L'unité de valorisation énergétique de Valtom



Source : Valtom (2022)

La compréhension de cet écosystème industriel nécessite que l'on soit capable de :

- 1° cartographier l'ensemble des déchets collectés et valorisés par Valtom (c'est une sorte d'étude du métabolisme territorial qui revient à structurer une base de données et à la visualiser sous la forme d'un diagramme Sankey) ;
- 2° mettre en système sous la forme d'un diagramme de boucles causales toutes les interactions entre les acteurs et les flux matière, énergie, économiques et d'information. Ces boucles causales permettent de reproduire la dynamique de l'écosystème, en identifiant les drivers (moteurs), les points leviers, les points de basculement et les archétypes (comportements répétés des systèmes complexes) et de mettre en lumière le potentiel des réseaux de chaleur en termes de symbioses industrielles et urbaines (Korhonen, 2001, Kim & al., 2006, Ajah & al., 2007, Chae & al., 2010 ; Earley, 2015).
- 3° modéliser la valorisation des déchets afin de scénariser le mix énergétique de Clermont Auvergne Métropole à l'horizon 2030 - 2050 et de mieux appréhender la place des réseaux de chaleur dans la transition écologique.
- 4° évaluer les politiques publiques car la construction d'un réseau de chaleur est avant tout un investissement public financé par des impôts. La définition d'indicateurs (notamment ceux qui sont associées aux objectifs du développement durable) constitue un excellent moyen de suivi des trajectoires menant aux objectifs pressentis dans les différents scénarios.

La mise en CLD des réseaux de chaleur à la toile numérique des déchets

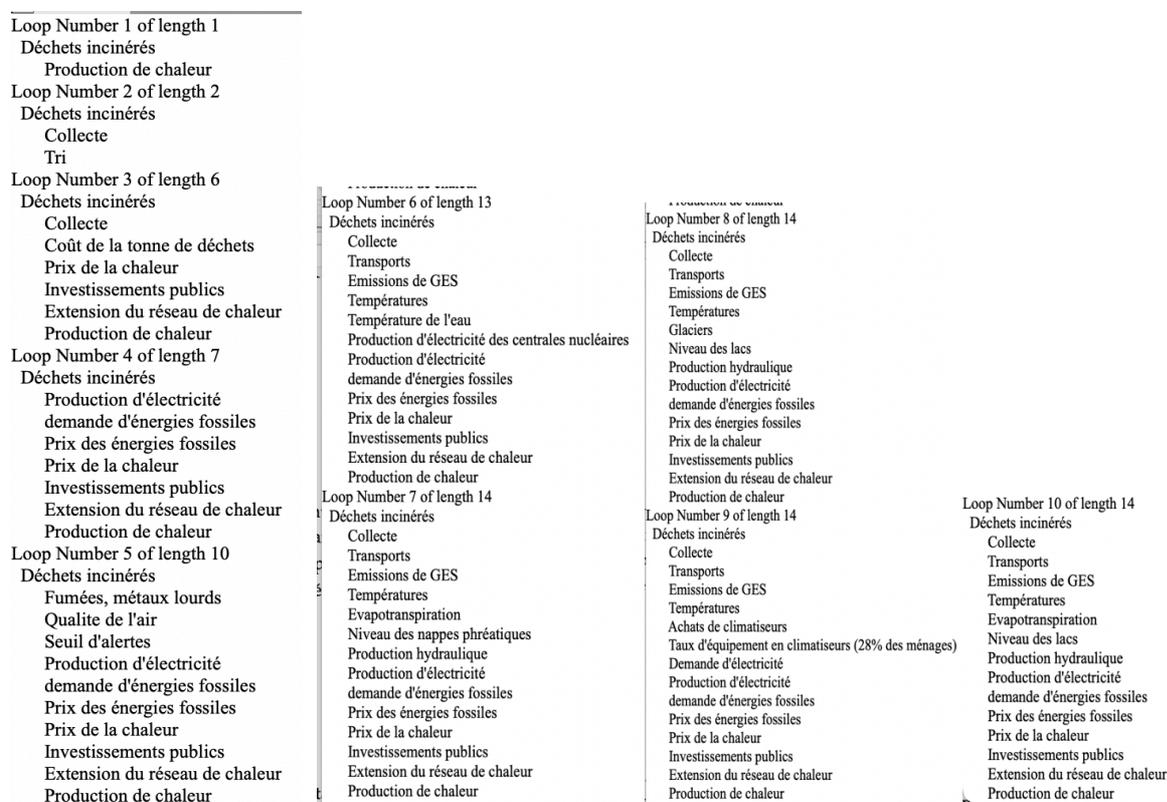
Une manière de cerner les relations d'interdépendance entre les variables qui constituent le système énergétique, et de projeter une image du futur, repose sur la conception d'un diagramme de boucles causales (CLD, *Causal Loops Diagram*). En dynamique des systèmes (Forrester, 1969, Meadows & al., 2008, Ford, 2019), les diagrammes de boucle causale identifient et visualisent les boucles de rétroaction pour faciliter la compréhension, le raisonnement dynamique et la modélisation formelle (Sterman, 2001). Par lien causal, nous entendons ici une flèche qui décrit le sens de direction dans une relation entre deux variables (la variable à l'origine de la cause et la variable impactée) et la nature de l'impact (même direction de changement ou direction de changement opposée). La polarité d'un lien causal (le signe positif + ou le signe négatif -) indique la direction de l'impact de la variable motrice sur la variable impactée. Une polarité + indique que la variable impactée évolue dans le même sens (augmentation ou diminution) que la variable motrice. Une polarité - indique que la variable impactée évolue dans la direction opposée (augmentation ou diminution) à la variable motrice. Le diagramme des boucles causales est un outil qui représente des boucles fermées de liens de cause à effet. Il est destiné à illustrer la manière dont les variables du système interagissent et dont les variables externes les influencent (Lane, 2016). Les boucles à polarité positive renforcent le système (notées Reinforcing Loop, R) alors que les boucles à polarité négative régulent le système (on parle de Balancing Loop, notées B)

Le diagramme des boucles causales (CLD) que nous avons développé, rend compte des interdépendances entre différents flux à travers des chaînes de causalité. La place du réseau de chaleur est ici stratégique. Ainsi, les réseaux de chaleur ont besoin d'une source d'émission (chaufferie, incinérateur), ils contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ils offrent une alternative plus propre au chauffage traditionnel. En utilisant des sources de chaleur renouvelables ou de récupération, ces réseaux permettent de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de favoriser une transition énergétique durable. En examinant les interconnexions entre les différents éléments du système énergétique de Clermont-Ferrand, nous pouvons comprendre les rétroactions et les influences mutuelles. Par exemple, l'incinérateur de déchets peut fournir de la chaleur pour le réseau de chaleur, réduisant ainsi les besoins en production de chaleur à partir de sources moins durables. De même, la production d'électricité peut être optimisée en utilisant la chaleur résiduelle générée par les centrales thermiques du réseau de chaleur.

Le diagramme des boucles causales (figure 24) permet de visualiser et de comprendre les interactions complexes entre les différents acteurs et éléments du système énergétique de Clermont Auvergne Métropole. Plusieurs boucles causales semblent jouer un rôle important dans la dynamique du système énergétique et des réseaux de chaleur de la CAM.

Par exemple, la boucle biomasse se présente comme une solution complémentaire à la production de chaleur, notamment lors de l'entretien et du nettoyage de l'incinérateur (c'est notamment la construction d'une chaudière biomasse sur le site des Cézeaux). La boucle optimisation de l'incinération des déchets en vue de produire une chaleur toujours plus importante, pourrait amener VALTOM à couvrir plus de distance pour collecter les déchets¹⁴, ce qui aurait l'inconvénient d'augmenter les émissions de GES du transport des déchets (le secteur des déchets est déjà l'un des principaux émetteurs de GES sur le territoire de la CAM). La boucle rénovation thermique des bâtiments offre de réelles opportunités à la nouvelle couverture du réseau de chaleur. La figure 25 est une traduction de quelques boucles tirées du CLD, elle montre que certaines boucles reproduisent des liens de causalité impliquant un très grand nombre de variables.

Figure 25 : Durée des boucles dans le CLD



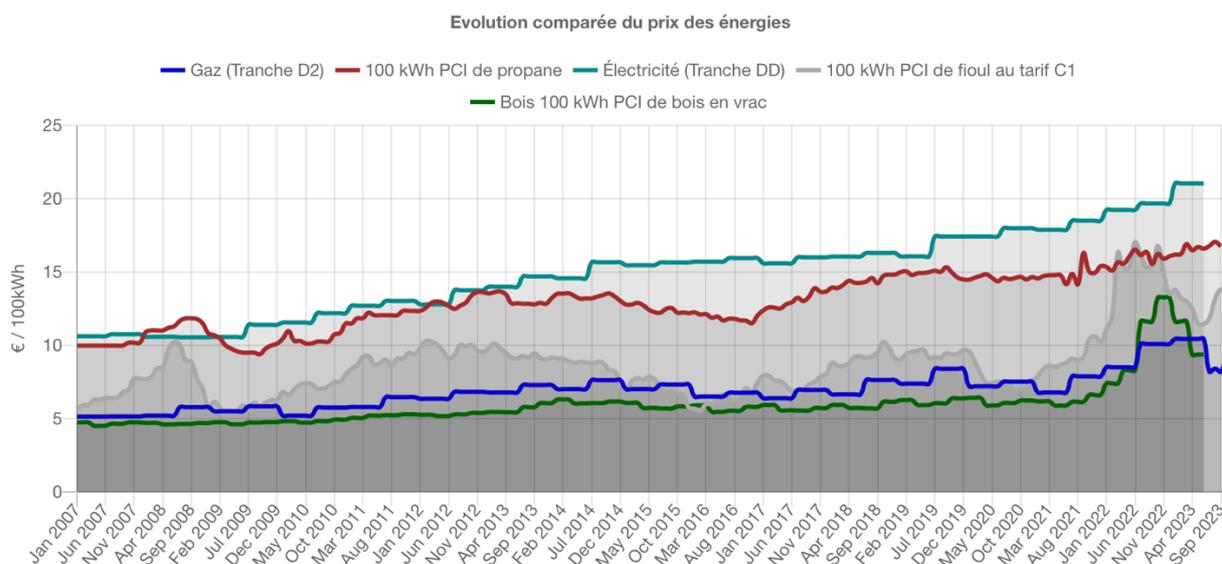
Source : Les auteurs

L'ensemble de ces boucles permet d'appréhender les différents leviers sur lesquels la CAM peut agir. Il s'agit d'enjeux importants pour la métropole Clermont Auvergne : la sécurité énergétique via un mix énergétique basé sur les ENr, la lutte contre les émissions de GES, la rénovation des bâtiments, la combinaison Biomasse - chaleur et la stabilisation du prix de la chaleur.

¹⁴ Le pôle VERNEA reçoit 50 à 200 camions par jour.

Ce dernier point pourrait bien jouer un rôle important dans les scénarios 2030 et 2050. En effet, le chauffage urbain est économique pour l'utilisateur : il coûte de 0,05 € /kWh à 0,08 € /kWh selon les villes, soit environ deux fois moins cher que le prix de l'électricité. Pour ordre de comparaison, le prix du bois est très bon marché (0,045€ TTC), même s'il requiert une certaine logistique de stockage. Le gaz naturel est la deuxième énergie présentant le prix du kWh le plus bas (0,0880 €TTC). C'est l'énergie privilégiée par les réseaux de raccordement. Le propane est la solution la plus naturelle, il est plus cher par kWh (0,1415€ TTC) mais plus écologique que le fioul (0,0880 € TTC) qui devrait disparaître en 2030.

Figure 26 : Comparatif du prix du kWh des énergies



Source : Ministère de la Transition Ecologique (2023)

Bien entendu, le prix de la chaleur reste liée à l'indexation sur le prix du gaz, aux investissements publics et au coût (soit 115,60€ HT en 2022) de la tonne de déchets (en 2022, l'unité de valorisation énergétique des déchets de Valtom a produit près de 110 389 MWh d'électricité). Par ailleurs, le raccordement à un réseau de chaleur représente un coût non négligeable (entre 500 € et 2000 € par logement selon AMORCE, 2015). Ces frais peuvent être en partie absorbés par le dispositif des aides (de 450 € à 750 € selon les foyers) et la durée d'amortissement (1 à 5 ans environ selon les ménages et l'ancien mode de chauffage utilisé grâce aux économies réalisées). Le raccordement au réseau de chaleur urbain de Clermont Auvergne Métropole doit ainsi permettre une valorisation thermique des déchets de près de 70 GWh/an. L'injection de biogaz dans le réseau de GRDF produit par le méthaniseur devrait être opérationnel au printemps 2024 (VERNEA, 2022).

Le tableau ci-dessous présente toutes les variables (flux stocks) du modèle structurel. Ces variables sont à la fois des drivers pour le CLD que nous avons construit, mais également des leviers du modèle Flux et stocks.

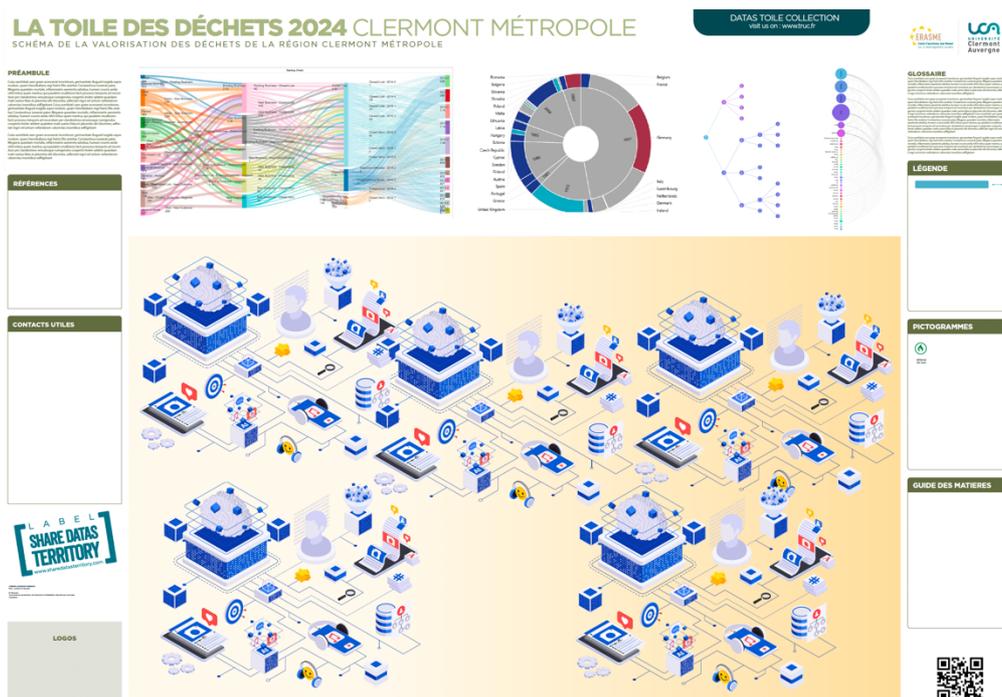
Tableau 5 : Description des variables du modèle structurel

Variables	Ex/End/Par	Qual/Quant	Flux/stocks	Point levier
Utilisation d'électricité	End	Quant	Flux	Non
Utilisation de chaleur	End	Quant	Flux	Non
Extension du réseau	End	Quant	Flux	Non
Émission de GES	End	Quant	Stock	Non
Production D'électricité	Ex	Quant	Flux	Non
Incinération des Déchets	Ex	Quant	Stock	Non
Cogénération	Ex	Quant	Stock	Non
Importation en électricité et gaz	Ex	Quant	Flux	Oui
Crise énergétique extérieure	Ex	Quant	Flux	Oui
Nouveaux raccordements	End	Quant	Stock	Oui
Evolution des technologies	Ex	Qual	Flux	Non
Scénario Mix énergétique	End	Qual	flux	Oui
Sécurité énergétique	End	Qual		Oui
Rénovation thermique	End	Quant	Flux	Oui
Investissement initial	Ex	Quant	Flux	Non
Prix de la chaleur	End	Quant		Oui
Biomasse	End	Quant	Stocks	Oui
Coût de la tonne de déchets	End	Quant		Oui

Le modèle stocks flux, le diagramme des boucles causales, le diagramme Sankey ou encore la constitution d'un tableau d'indicateurs renvoient à ce que nous avons appelé la boîte à outils d'évaluation des politiques publiques (Diemer, 2023 ; Diemer, Batisse, 2023). Dans cette boîte à outils, la réalisation d'une toile numérique des déchets est un enjeu primordial pour comprendre les impacts socio-économiques et environnementaux¹⁵ d'un réseau de chaleur. Cette toile suppose une traçabilité détaillée des flux et des stocks, ainsi qu'une labellisation territoriale de la donnée collectée.

¹⁵ Il convient cependant de noter que la plupart des villes qui ont investi dans les réseaux de chaleur, ont réalisé ces études d'impacts en même que la construction du réseau.

Figure 27 : Première ébauche d'une toile des déchets pour la CAM

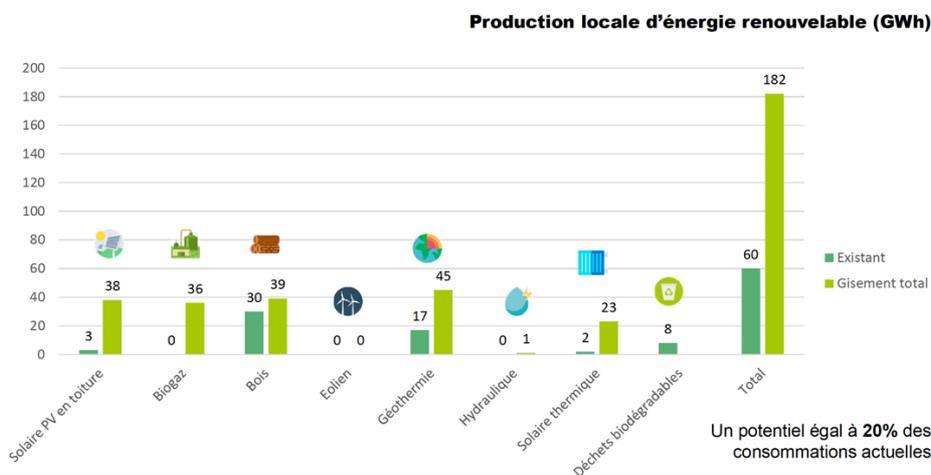


Source : Les auteurs

Scénariser la place des réseaux de chaleur dans le mix énergétique de la CAM

Dans le diagnostic de territoire 2020 – 2025 du PCAET (Plan Climat Air Energie territorial), Clermont Auvergne Métropole estimait que le potentiel de production local d'énergies renouvelables se situait entre 180 et 190 GWh, avec des enjeux importants sur le solaire (toiture), le biogaz et la géothermie .

Figure 28 : Le potentiel des ENr pour Clermont Auvergne Métropole

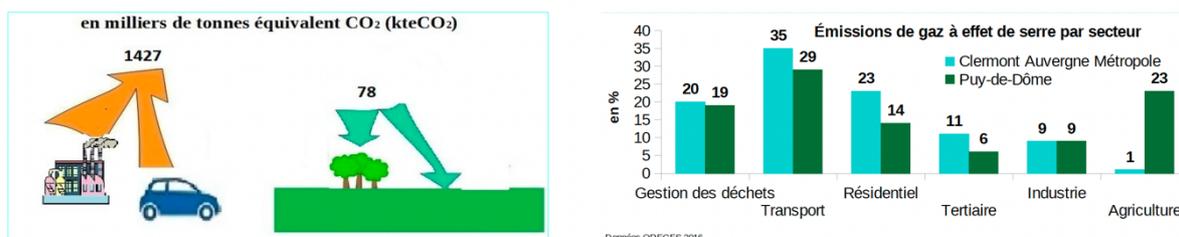


Source : PCAET (2020, p. 29)

Il existe bien entendu des gains énergétiques à réaliser dans les installations solaires, le biogaz, la biomasse (même si cette dernière représente déjà 63% de la production énergétique renouvelable) et les réseaux de chaleur.

Cependant, la consommation d'énergie et les émissions de GES par secteur d'activité tendent à montrer que le scénario « Territoire à énergie positive 2050 » est loin de constituer un long fleuve tranquille.

Figure 29 : émissions de GES de la CAM

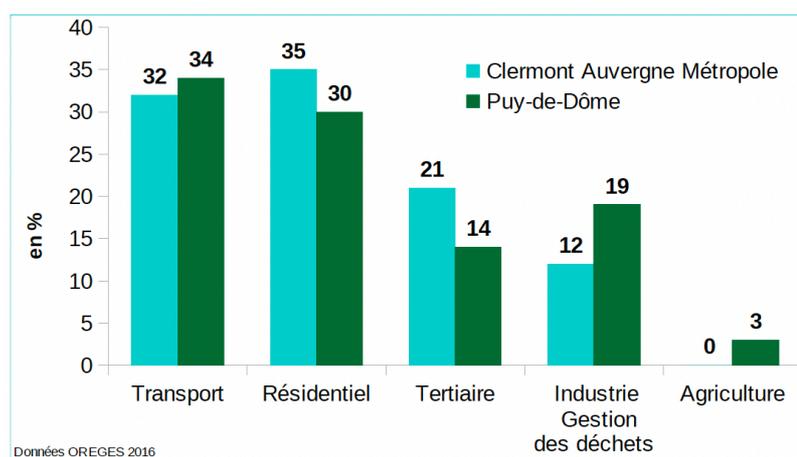


Source : DDT (2022, p. 13)

Ce simple bilan tend à souligner que les émissions totales de GES avoisinent les 1427 kteCO₂ (le secteur des transports et celui du résidentiel sont les plus forts émetteurs de gaz à effet de serre, respectivement 36% et 23%) et que les surfaces agricoles et naturelles (prairies, forêts) du territoire ne peuvent fixer que 79 kteCO₂. La cure d'amaigrissement semble donc très importante.

La consommation d'énergie par secteur d'activité (6400 GWh au total) renforce ce sentiment, en soulignant les dépenses excessives des secteurs du transport et du résidentiel.

Figure 30 : La consommation d'énergie par secteur d'activité

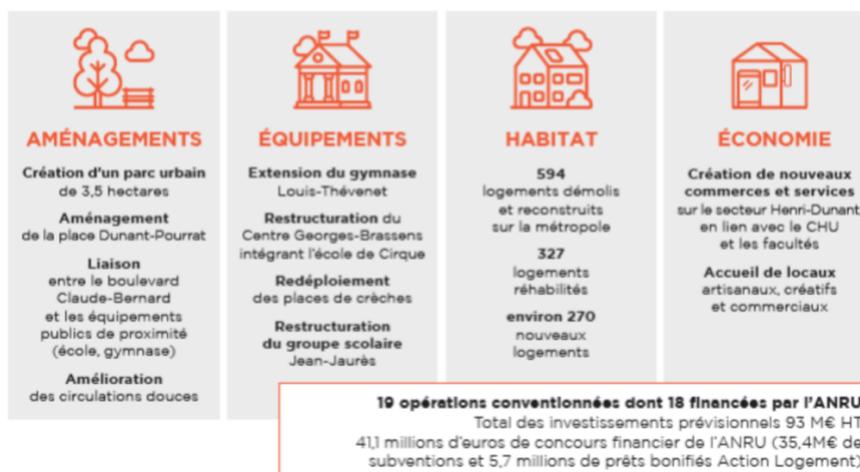


Source : DDT (2022, p. 13)

Bien entendu, les attentes ne concernent pas uniquement la réduction des émissions de gaz à effet de serre et les gains énergétiques, la diminution de la précarité énergétique et l'amélioration du cadre de vie font également partie des objectifs socioéconomiques du renouvellement du quartier Saint Jacques.

Le réseau de chaleur se fonde dans un projet d'aménagement du territoire plus vaste (destruction de la muraille de Chine en juin 2023), qui entend rendre le quartier plus agréable à vivre, développer les mobilités durables, diversifier l'offre d'habitat et ouvrir le quartier Saint Jacques sur le centre-ville.

Encadré 2 : Les axes du projet 2019 - 2030



Source : <https://clermont-ferrand.fr/renouvellement-urbain-du-quartier-saint-jacques>

Le réseau de chaleur mis en place dans la métropole clermontoise aura plusieurs impacts significatifs.

(i) *Réduction des émissions de gaz à effet de serre* : L'utilisation de déchets comme source d'énergie pour le réseau de chaleur permettra de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Avec une réduction de plus de 14 000 tonnes de CO2 par an, le réseau de chaleur contribuera à atténuer le changement climatique en remplaçant des sources d'énergie plus polluantes.

(ii) *Amélioration de la qualité de l'air* : En utilisant une source d'énergie renouvelable telle que les déchets, le réseau de chaleur réduira également les émissions de polluants atmosphériques tels que les particules fines et les oxydes d'azote. Cela entraînera une amélioration de la qualité de l'air dans la métropole clermontoise, ce qui est bénéfique pour la santé des résidents.

(iii) *Réduction de la dépendance aux énergies fossiles* : En utilisant les déchets comme source d'énergie, le réseau de chaleur réduit la dépendance aux énergies fossiles telles que le gaz naturel ou le pétrole. Cela contribue à renforcer la résilience énergétique de la région et à réduire les risques liés à la volatilité des prix des combustibles fossiles.

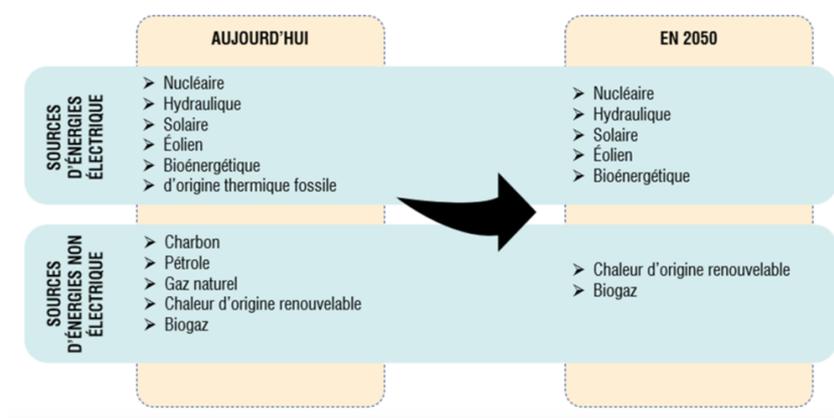
(iv) *Amélioration de l'efficacité énergétique* : Les réseaux de chaleur permettent une meilleure utilisation de l'énergie en centralisant la production de chaleur à partir d'une source principale. Cette approche offre plusieurs avantages en termes d'efficacité énergétique. Tout d'abord, la production de chaleur dans une centrale de cogénération (si elle est utilisée) permet de récupérer une partie de la chaleur résiduelle générée lors de la production d'électricité, ce qui augmente l'efficacité globale du système. De plus,

la chaleur peut être produite à grande échelle, permettant l'utilisation d'équipements plus efficaces et l'optimisation des processus de production. En évitant les pertes d'énergie associées à la production décentralisée de chaleur dans chaque bâtiment, le réseau de chaleur réduit la consommation d'énergie globale et favorise une utilisation plus efficiente des ressources énergétiques.

(v) *Stimulant économique local* : La mise en place du réseau de chaleur dans la métropole clermontoise représente un investissement considérable, tant pour la construction des infrastructures que pour le raccordement des bâtiments. Cela se traduit par une création d'emplois locaux dans les secteurs de la construction, de l'ingénierie, de la maintenance et de l'exploitation du réseau de chaleur. De plus, l'exploitation continue du réseau nécessitera un personnel qualifié pour assurer son bon fonctionnement. L'activité économique locale est stimulée par ces investissements et l'entretien régulier du réseau, avec des retombées positives pour les entreprises locales, les fournisseurs de services et les travailleurs de la région.

L'impact économique ne se limite pas à la création d'emplois. Les bâtiments raccordés au réseau de chaleur bénéficieront également de coûts énergétiques réduits. Comparé à des systèmes individuels de chauffage, tels que des chaudières individuelles, le réseau de chaleur offre souvent une solution plus économique. Cela est dû à l'utilisation de sources d'énergie moins coûteuses à grande échelle, à l'optimisation des processus de production et à la répartition des coûts d'exploitation entre plusieurs utilisateurs. Les économies réalisées sur les factures énergétiques permettent aux propriétaires de bâtiments et aux résidents de disposer de ressources financières supplémentaires pour d'autres dépenses, ce qui stimule l'économie locale de manière plus générale. D'une certaine manière, le réseau de chaleur ne représente pas à lui seul la solution à nos émissions de GES et à nos excès de consommation énergétique, surtout si la consommation d'énergie électrique explose dans les 30 prochaines années (elle pourrait se rapprocher des 600 TWh en 2050). Il s'agit d'une véritable transformation du mix énergétique qui s'apparente à un changement de paradigme.

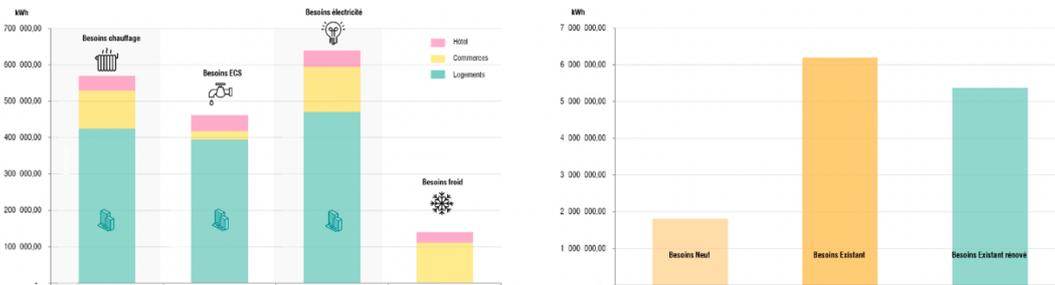
Figure 31 : Evolution des sources d'énergie



Source : Visea (2023)

Dans le cas du quartier Saint Jacques, le diagramme des boucles causales renvoie à l'analyse des besoins énergétiques, soit les besoins de chauffage (des bâtiments), les besoins en eaux chaudes sanitaires, les besoins en froid (rafraîchissement des bâtiments) et les besoins d'électricité pour les logements existants, les logements neufs et les logements en rénovation.

Figure 33 : Evaluation des besoins en fonction de l'état des logements



Source : Suteau (2023, p. 7)

La stratégie énergétique revient à dresser une typologie des logements collectifs et individuels, des équipements publics, des commerces, des hôtels présents sur le tracé du réseau.

Figure 34 : Programmation de la stratégie énergétique

Typologie	SDP (m ²)
Logements collectifs	15 181
Logements individuels	3 633
Commerces	2 754
Hôtel	1 500
TOTAL	23 068

Le scénario « Réseau de chaleur » correspond au scénario 3 (Visea, 2022).

Figure 35 : Le scénario réseau de chaleur

4.2.1 Scénario 1

Scénario 1 : PAC aérodynamique				
Typologie	Système productif	Chauffage	ECS	Froid
Habitat individuel	PAC air/eau	100%	100%	
Habitat collectif	PAC air/eau	100%	100%	
Commerces	PAC air/air	100%		100%
	Ballon électrique		100%	
Hôtel	PAC air/eau	70%	70%	100%
	Appoint gaz	30%	30%	

4.2.2 Scénario 2

Scénario 2 : PAC aérodynamique + solaire thermique				
Typologie	Système productif	Chauffage	ECS	Froid
Habitat individuel	PAC air/eau	100%	50%	
	Solaire thermique		50%	
Habitat collectif	PAC air/eau	100%	50%	
	Solaire thermique		50%	
Commerces	PAC air/air	100%		100%
	Ballon électrique		100%	
Hôtel	PAC air/eau	70%	70%	100%
	Appoint gaz	30%	30%	

4.2.3 Scénario 3

Scénario 3 : réseau de chaleur				
Typologie	Système productif	Chauffage	ECS	Froid
Habitat individuel	PAC air/eau	100%	100%	
Habitat collectif	Réseau de chaleur	100%	100%	
Commerces	Réseau de chaleur	100%	100%	
	Groupe froid			100%
Hôtel	Réseau de chaleur	100%	100%	
	Groupe froid			100%

4.2.4 Scénario 4

Scénario 4 : biomasse				
Typologie	Système productif	Chauffage	ECS	Froid
Habitat individuel	Poêle à bois	70%		
	Radiateur électrique		30%	
Habitat collectif	Ballon thermodynamique		100%	
	Chaudière bois	80%	80%	
	Appoint gaz	20%	20%	
Commerces	PAC air/air	100%		100%
	Ballon électrique		100%	
Hôtel	PAC air/eau	70%	70%	100%
	Appoint gaz	30%	30%	

Source : Suteau (2023, p. 34)

Le suivi de ce scénario implique de retenir des indicateurs économiques (investissement total, subventions, investissement non subventionné, coût moyen de l'énergie, entretien moyen sur plusieurs années, maintenance moyenne sur plusieurs années) et environnementaux (énergie primaire, énergie finale, part des EnR, émissions de GES). Comme nous l'avons mentionné plus haut, les coûts associés à ce scénario sont relativement important, un investissement avoisinant les 1 070 000 euros, des frais d'entretien et de maintenance qui pourraient avoisiner les 60 €/MWh et un coût de l'énergie proche de 33 €/MWh (ce coût reste étroitement dépendant du prix de la chaleur).

Figure 36 : Frais annuels du réseau de chaleur

Montant des subventions perçues (k€ HT)	0	10 683
% du montant éligible	0%	25%
R1 (€ HT/MWh)	32,62	32,62
R21 (€ HT/kW)	1,92	1,92
R22 (€ HT/kW)	19,75	19,75
R23 (€ HT/kW)	3,46	3,46
R24 (€ HT/kW)	47,74	47,74
R24sub (€ HT/kW)	-8,97	-8,97
R24cee (€ HT/kW)	-3,46	-3,46
R25 (€ HT/kW)	0,59	0,59
R2 (€ HT/kW)	61,04	61,04

Source : Clermont Auvergne Métropole (2022)

De ce fait, si le réseau de chaleur s'inscrit bien dans les choix de production d'énergie renouvelable de Clermont Auvergne Métropole, il s'avère de plus en plus que le mix énergétique composé de la biomasse (63% d'énergie bois dans la production des EnR), des installations de pompes à chaleur (16% de la production des EnR), des panneaux photovoltaïques..) et de la valorisation des déchets (12% de la production des EnR) constituera le fer de lance du Plan Climat Air Energie Territorial des 15 prochaines années. Dans l'attente d'avancées sur le volet géothermie (qui demeure un potentiel énergétique sous employé), la valorisation énergétique des déchets fait partie des alternatives au fossile.

Conclusion

L'implémentation d'un réseau de chaleur dans la métropole clermontoise, basée sur les caractéristiques et les besoins des bâtiments du quartier étudié, pourrait avoir un impact significatif sur la réduction des émissions de CO₂, l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction des coûts énergétiques et le développement socioéconomique d'un éco-quartier. Ces impacts restent à quantifier via la collecte des données auprès des parties prenantes et la structuration d'une base de données. Ces informations sont essentielles pour guider les décideurs publics et les acteurs du

secteur de l'énergie dans la planification et la mise en œuvre de solutions énergétiques durables dans la métropole clermontoise. Dans la perspective des agendas 2030 et 2050, la simulation (et donc la démarche prospective) joue un rôle crucial dans les études. Il s'agit ni plus ni moins d'évaluer les impacts environnementaux et socioéconomiques d'un réseau de chaleur au niveau du quartier Saint-Jacques mais également des choix du mix énergétique de la métropole clermontoise. En utilisant un échantillon représentatif et des données issues de notre enquête approfondie, nous avons pu cerner les principaux défis qu'il convient de relever.

Les résultats du diagnostic territorial et la mobilisation d'une boîte à outils appropriés (Diemer, Batisse, 2024) montrent que la mise en place d'un réseau de chaleur apporte des avantages significatifs pour la métropole auvergnate. Il permettrait de réduire les émissions de CO₂, d'améliorer l'efficacité énergétique, de réduire les coûts énergétiques, d'initier un véritable plan d'équité énergétique (ce que les anglo-saxons appellent Energy Justice) et de poser les bases d'une stratégie de résilience écologique du territoire. Au-delà des enjeux environnementaux et socioéconomiques¹⁶, le réseau de chaleur s'inscrit surtout dans une perspective plus large, celle de l'émergence d'une symbiose urbaine (reconfiguration du quartier Saint Jacques, démolition de la muraille de Chine, revégétalisation de l'espace...) et industrielle (incinération des déchets au Valtom et au sein du pôle VERNEA) dont l'acteur public serait le principal moteur.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2019), *Les réseaux de chaleur et de froid, Etat des lieux de la filière, marchés, emplois et coûts*, Rapport final, mai. 89 p.

ADEME (2016), *Se raccorder à un réseau de chaleur*, L'habitat, Avril, 8 p.

ADEME (2012), *Industriels, investissez dans la performance énergétique*, Efficacité énergétique, récupération de chaleur, énergies renouvelables, 8 p.

ADEME (2009), *Guide de l'utilisateur du chauffage urbain*, octobre, 24 p.

AJAH A.N, PATILA A.C, HERDERA P.M, GRIEVINK J. (2007), Integrated conceptual design of a robust and reliable waste-heat district heating system. *Appl Therm Eng*, vol 7, 1158-64.

AMORCE/ADEME (2022), *Enquête sur le prix de vente de la chaleur et du froid en 2020*, série économique, réf AMOR E RCE 38, Février, 45 p.

AMORCE (2017), *L'élu et les réseaux de chaleur*, 72 p.

¹⁶ Si les coûts économiques du réseau de chaleur restent très élevés, il est encore trop tôt pour évaluer les impacts économiques d'un tel projet, la question du prix de la chaleur et des frais de maintenance (entretien) du réseau sont encore difficiles à estimer. Par ailleurs, l'ensemble de ces coûts est subordonné à d'autres actions (rénovations thermiques des logements, coûts d'extension du réseau, intégration du coût de transport des déchets et de la tonne carbone...).

- AMORCE (2017), *Guide de création d'un réseau de chaleur, éléments clés sur le maître d'ouvrage*, série technique, réf RCT 46, mars 55 p.
- AMORCE (2015), *Schéma directeur d'un réseau existant de chaleur et de froid, guide de réalisation*, Série politique, RCP 24, novembre, 31 p.
- AuRA-EE (2018), *Un Schéma de transition énergétique et écologique pour Clermont Auvergne Métropole (63), Fiche Adaptation au Changement Climatique*, Septembre, 4 p.
- BERRY M. (2017), *Les réseaux de chaleur dans les éco quartiers*, CEREMA, https://reseaux-chaleur.cerema.fr/sites/reseaux-chaleur-v2/files/fichiers/2022/05/180216_Rapport_Ecoquartier_DGEC_final.pdf
- BESSALEM C., DIEMER A., BATISSE C. (2022), *les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective*, *Revue francophone du développement durable*, n°19, mars, 1 - 67.
- BESSALEM C., DIEMER A. (2023), *Scénariser les transitions énergétiques de la France à l'horizon 2050, une revue de littérature*, *International Journal of Economic Studies and Management*.
- CABINET CASTELNAU (2012), *Etude sur les réseaux de chaleur en Ile-de-France*, Contributive à l'élaboration du schéma régional climat air énergie, Rapport, 8 octobre, 56 p.
- CAM (2020), *Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET) - 2020 - 2025, Diagnostic du territoire*. 63 p.
- CAM (2020), *Fiches actions du PCAET*, 49 p.
- CANTAT O. (2004), *L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps*, *Environnement, Aménagement, Société*, vol 191, 75 - 102.
- CHABANNE-POUZYNIN L. (1994), *Les réseaux de chaleur*, Université de Tours, UFR Droit, d'économie et des sciences sociales.
- CHAE S.H, KIM S.H, YOON S.G, Park S. (2010), *Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park*, *Applied Energy*, vol 87, 1978-1988.
- CHAMBON G., CORM M. (2023), *Les réseaux de chaleur, un levier essentiel pour une transition énergétique réussie*, *La Tribune*, 30 mai, <https://www.latribune.fr/opinions/tribunes/les-reseaux-de-chaleur-un-levier-essentiel-pour-une-transition-energetique-reussie-964116.html>
- CAM (2019), *Transition énergétique et écologique, Fiches actions*. 49 p.
- CLERMONT-COMMUNAUTE (2014), *PAECT - Plan Air Energie Climat Territorial Clermont Communauté*, déposé en préfecture le 28 octobre 2014, 56 p.
- COLOMBERT M., DIAB Y. (2017), *Evolution du rôle des acteurs des réseaux de chaleur dans la conception urbaine*, *Géographie, Economie, Société*, vol 19, 197 - 220.
- DDT (2021), *Portrait de territoire, Clermont Auvergne Métropole*, 18 p.

- DIEMER A. (2024), Structurer la gestion des déchets autour des symbioses industrielles, le cas de Valtom-Vernéa, *Revue Francophone du Développement Durable*, mars (à venir).
- DIEMER A., BATISSE C. (2024), *Une Boîte à outils multicritères au service des collectivités territoriales*, Editions Oeconomia (à venir).
- DIEMER A., BATISSE C., CHAN D. (2023), *Une boîte à outils multicritères au service de la résilience des territoires et de l'évaluation des politiques publiques*, in Cafarelli F. (dir), *La résilience des territoires exposés aux risques naturels*, Mare et Matins Editions.
- DIEMER A. (2023), *IATBLOOP – Outil Multicritères d'Evaluation des Politiques Publiques des Villes à l'aune des Objectifs du Développement Durable*, Rapport Scientifique, Appel à projet « INTENSCIFS », AUF, 20 p.
- EARLEY K. (2015), Industrial Symbiosis : Harnessing waste energy and materials for mutual benefit, *Renewable Energy Focus*, vol 16, n°4, october, 75-77
- FOISSARD X. (2015), *L'ilôt de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise*, thèse, Géographie, Université Rennes 2.
- FORRESTER J.J (1969), *Urban Dynamics*, MIT Press.
- FORD D.N (2019), A System Dynamics Glossary, *System Dynamics Review*, vol 35, 369 – 379.
- HAMPIKIAN Z. (2017), Structuration urbaine d'un réseau de chaleur et énergie fatale : la proximité comme variable dynamique, *Flux*, n°109 – 110, 9 – 22.
- IEA (2023), *World Energy Outlook*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf>
- INDDIGO (2019), *Schéma de transition énergétique et écologique, Potentiel Air, Energie, Climat, Ecologie*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Janvier, 69 p.
- INDDIGO (2018), *Schéma de transition énergétique et écologique, Stratégies et objectifs*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Février, 23 p.
- INDDIGO (2018), *Schéma de transition énergétique et écologique, Synthèse*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Août, 14 p.
- INDDIGO (2018), *Schéma de transition énergétique et écologique, Plan d'actions*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Août, 27 p.
- INDDIGO (2018), *Schéma de transition énergétique et écologique, Evaluation environnementale et stratégique du projet de Plan Climat Air Energie Territorial*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Juillet, 25 p.
- INDDIGO (2018), *Schéma de transition énergétique et écologique, Evaluation environnementale et stratégique du projet de Plan Climat Air Energie*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Mars, 107 p.

- INDDIGO (2018), *Schéma de transition énergétique et écologique, Note d'enjeux*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Janvier, 13 p.
- INDDIGO (2017), *Schéma de transition énergétique et écologique, Mise en perspective des politiques actuelles de développement durable*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, septembre, 15 p.
- INDDIGO (2017), *Schéma de transition énergétique et écologique, Diagnostic Air, Energie, Climat, Ecologie*, Clermont Auvergne Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Octobre, 77 p.
- KALEIDO'SCOP (2018), *Bilan de la concertation – Schéma de transition énergétique et écologique*, Clermont Métropole, ville de Clermont-Ferrand, Mars, 80 p.
- KORHONEN J. (2001), Co-production of heat and power : an anchor tenant of a regional industrial ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, vol 9, 509–517.
- KIM S., CHAE S., YOON S, PARK S (2006), Development of an industrial complex steam network optimization method using steam networking matrices (SNMs). *Journal Control, Autom, Syst Eng*, vol 1, p. 1184–90.
- INSEE (2020), Toujours plus d'habitants dans les unités urbaines, INSEE Focus, n°210, octobre, 7 p.
- LANE D.C. (2016), What we talk about when we talk about “systems thinking”, *Journal of Operational Research. Soc.*, 67, 527–528.
- MEADOWS D.H., WRIGHT D. (2008), *Thinking in Systems: A Primer*; Taylor & Francis [CAM]: London, UK, 2008.
- MINISTERE DE LA TRANSITION ENERGETIQUE (2023), *Chiffres clés de l'énergie, édition 2023*, septembre, 88 p.
- MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2019), *Réseaux de chaleur et de froid, une filière d'avenir*, Dossier Presse, octobre, 22 p.
- MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE (2013), Guide pratique de la procédure de classement des réseaux de chaleur et de froid, janvier, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/reseaux-chaleur>
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER (2017), *Courrier aux Maires pour la mobilisation sur les réseaux de chaleur*, 9 janvier, 2 p.
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER (2016), Fonds Chaleur et Réseaux de chaleur dans la dynamique de la transition énergétique, 9 décembre, Communiqué de presse, 3 p.
- MOTHE C., GREBERT F., DELFOSSE E. (2022), Economie de la fonctionnalité et réseaux de chaleur : vers une innovation au niveau territorial, *Innovations*, n°67, 135 – 162.

MOTHE C., GREBERT F., DELFOSSE E., BOCQUET A.M (2021), L'analyse de données textuelles assistée par ordinateur, les discours sur les réseaux de chaleur, *Revue Française de Gestion*, n°295, 11 - 37.

MRAE (2018), *Avis délibéré de la Mission Régionale d'Autorité Environnementale Auvergne-Rhône-Alpes relatif au Plan Climat Air Energie Territorial de Clermont Auvergne Métropole*, avis n°2018-ARA-AUPP-00471, 17 p.

OLIVIER A. (2023), *Environnement, comment fonctionne le marché du carbone européen*, <https://www.touteleurope.eu/environnement/environnement-comment-fonctionne-le-marche-du-carbone-europeen/#:~:text=Combien%20coûte%20une%20tonne%20de,90%20euros%20en%20mars%202023>.

ORCAE (2023, 2022, 2021), *Clermont Auvergne Métropole – Profil Climat Air Energie*.

PREVOT H. (2006), Les réseaux de chaleur, Rapport du conseil général des Mines, 29 mars, 108 p. https://medias.vie-publique.fr/data_storage_s3/rapport/pdf/064000732.pdf

SNCU (2012), *Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid, restitution des statistiques*, Edition nationale.

STERMAN J.D. (2001), *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*; Irwin McGraw-Hill: Boston, MA, USA.

SUTEAU M. (2022), *Etude d'approvisionnement en énergie renouvelable et de récupération*, 29 juin, Réf 2020 - 1084-E03B, 49 p.

VALTOM (2022), rapport d'activité 2022, <https://www.valtom63.fr/wp-content/uploads/2023/11/RA2022WEBlit.pdf>

VERNEA (2022), Rapport d'activité 2022. <https://www.valtom63.fr/wp-content/uploads/2023/11/Rapport-Vernea-2022-VF.pdf>

WISEA (2023), *Quelle projection pour le mix énergétique français à l'horizon 2050*, <http://www.vizea.fr/actualites/actus/1188-quelle-projection-pour-le-mix-energetique-francais-a-l-horizon-2050.html#:~:text=Les%20données%20ci%20Daprès%20sont,atteindre%20930%20TWh%20en%202050>.

Site internet

<https://www.aduhme.org/wp-content/uploads/2016/06/fiche-ecla.pdf>

<https://www.dhcnews.com/poursuite-extension-reseau-chaleur-clermont-auvergne-metropole/>

<https://www.clermontmetropole.eu/fr/preserver-recycler/transition-energetique-et-ecologique/energie-et-changements-climatiques/consommation-energetique-et-reduction-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre/>

<https://www.clermontmetropole.eu/grands-projets/grands-projets-pour-la-transition-energetique/extension-des-reseaux-de-chaleur-urbains/>

<https://www.demainlaville.com/vaxjo-ville-verte-eu>

<https://www.c40.org/case-studies/cities100-copenhagen-carbon-neutral-district-heating/>

ANNEXES

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
nom	Adresse	Commune	Type Local	Nombre de logements	Année(s) de bâti	Type	Type d'énergie	Superficie du logement m²	Consommation totale d'électricité	Consommation énergétique (par an) 2022	Facturation énergétique par an 2022(en euro)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
41											
42											
43											
44											
45											
46											
47											
48											
49											
50											
51											
52											
53											
54											
55											
56											
57											
58											
59											
60											
61											
62											
63											
64											
65											
66											

ANNEXE 1

Questionnaire

1/ statut

- Propriétaire
- Locataire

2/ Taille du ménage

- Une personne seule (adulte)
- Une personne (adulte) et un enfant
- Deux personnes (adultes)
- Deux personnes (adultes) et un enfant
- Deux personnes (adultes) et deux enfants
- Plus de 4 personnes

3/ Ancienneté du bâti

4/ Superficie du logement

5/ Type de chauffage

- Electrique
- Gaz
- Autre (précisez)

6/ Avez-vous une idée de votre consommation énergétique (kw) par an ?

- Non
- Oui ... si oui combien ?

7/ Facture énergétique par an

- Inférieure à 600 euros
- De 600 à 1000 euros
- De 1000 à 1500 euros
- Plus de 1500 euros