



ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

**SCIENCES ET INGÉNIERIE DE
L'ENVIRONNEMENT**

PROJET DE MASTER

**DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL SIG PERMETTANT
D'IDENTIFIER LES ZONES PROPICES AU DÉVELOPPEMENT
DES RÉSEAUX THERMIQUES**

Version publique

WILL Sébastien

Prof. GOLAY François, responsable académique
VUILLEUMIER Vincent, responsable CSD Ingénieurs

CSDINGENIEURS+

Lausanne , le 24 juin 2022

Table des matières

Résumé	4
Abstract	6
1 Introduction	7
2 État de l’art	9
2.1 Réseau thermique	9
2.1.1 Avantages	12
2.1.2 Désavantages	12
2.1.3 Dimensionnement	13
2.1.4 Extension et densification des réseaux	14
2.2 Les sources de chaleur	14
2.2.1 Chaudières fossiles	15
2.2.2 Chaudière automatique à bois énergie	15
2.2.3 Rejets de chaleur industrielle	16
2.2.4 Eau usée à l’entrée des stations d’épuration	17
2.2.5 Air ambiant	17
2.2.6 Géothermie en faible et moyenne profondeur	17
2.2.7 Géothermie profonde	18
2.2.8 Eau des lacs	19
2.2.9 Solaire thermique	19
2.2.10 Accumulateurs d’énergie thermique	20
2.3 Optimisation des réseaux	21
2.4 Rentabilité d’un réseau thermique	21
2.5 La Suisse et les réseaux thermiques	22
2.6 Politique autour des réseaux thermiques	22
2.7 Perspectives chaleur	23
2.8 Innovation	23
3 Objectifs	24
4 Méthodologie	26
4.1 Périmètre d’étude	26
4.2 Horizon de l’étude	27
4.3 Sources de chaleur	27
4.3.1 Les aquifères à moyenne profondeur	27
4.3.2 Les nappes phréatiques	28
4.3.3 L’eau des lacs	29
4.3.4 STEP et rejets thermiques industriels	32

4.3.5	Ressources non-situationnelles	34
4.4	Besoins en chaleur	35
4.4.1	Besoins actuels	35
4.4.2	Prédictions des besoins en chaleur à l’horizon 2035	35
4.5	Contraintes aux réseaux thermiques	40
4.5.1	Parcs nationaux et autres sites de protection de la nature	40
4.5.2	L’inventaire fédéral des paysages et des monuments naturels	41
4.5.3	Sites marécageux	42
4.5.4	Rivières	43
4.5.5	Zones alluviales	44
4.5.6	Réseaux thermiques existants	45
4.5.7	Glissements de terrain, permanents et spontanés	46
4.5.8	Fortes déclivités	48
4.5.9	Sites pollués	50
4.5.10	Voies de chemins de fer	51
4.5.11	Grandes routes	52
4.5.12	Contraintes incertaines	54
4.6	Méthode de recherche de zones propices aux réseaux thermiques	58
4.6.1	Algorithme	58
4.6.2	Attribution des ressources d’énergie situationnelles	61
4.7	Réseaux froids	62
5	Données	63
6	Résultats	64
6.1	Besoins en chaleur en 2035	64
6.2	Zones propices aux réseaux de chaleur à distance en 2035	65
6.2.1	Affinement des zones propices	75
6.3	Contraintes incertaines	78
7	Discussion	80
7.1	Limites de la méthodologie	80
7.2	Limites liées à la qualité des données de travail	81
7.3	Limites liées aux contraintes de l’algorithme	82
7.4	Perspectives	83
8	Conclusion	84
	Remerciements	85
	Références	86
	Liste des abréviations	90
	Liste des figures	91
	Liste des tableaux	94
	Annexes	95
A	Etat de l’art	95
B	Méthodologie	97

C	Données	100
D	Résultats	101
E	Discussion	102

RÉSUMÉ

Stratégie énergétique 2050 • Perspectives chaleur du canton de Vaud • 2035 •
Réseaux thermiques • Zones propices • Systèmes d'information géographique (SIG)

VERSION FRANÇAISE

La prise de conscience de la dangerosité de l'énergie nucléaire suite à la catastrophe de Fukushima, l'augmentation mondiale des émissions de CO₂ et la dépendance énergétique envers les autres pays ont incité la Suisse à revoir sa stratégie énergétique. À présent, environ 50% de l'énergie brute consommée en Suisse est utilisée pour la production de chaleur, dont plus de 80% provient de sources fossiles [1]. La création de réseaux thermiques renouvelables est donc une solution permettant de décarboner le secteur de la chaleur et de réduire la dépendance suisse aux énergies fossiles.

Les précédents travaux sur les réseaux thermiques renouvelables se sont principalement focalisés sur l'évaluation d'un type de source de chaleur et la quantité d'énergie valorisable dans un réseau de chauffage à distance. Certaines études se sont penchées sur la recherche du meilleur tracé pour un réseau dans un milieu bâti. Néanmoins, il manque une méthode pour déterminer les zones les plus propices à l'implémentation de réseaux thermiques en opposition à des systèmes de chauffage décentralisés.

L'entreprise CSD Ingénieurs SA a été mandatée en 2020 pour inventorier les sources d'énergies renouvelables disponibles dans le canton de Vaud, ainsi que pour trouver les zones propices aux réseaux de chaleur à distance. La recherche de zones s'est basée uniquement sur les besoins thermiques. Tous les défis et les contraintes (techniques, géographiques, etc.) liés aux réseaux thermiques n'ont pas été pris en compte.

Ce projet de Master reprend la base de l'étude *Perspectives chaleur* et propose une méthode pour identifier des zones propices aux réseaux de chaleur à distance exploitant des sources renouvelables. Le but est de trouver les aires les plus prometteuses dans lesquelles il serait possible de construire rapidement des réseaux. Le cas d'étude de ce projet est le canton de Vaud à l'horizon 2035. Cependant, la méthode élaborée pourrait s'appliquer à n'importe quel autre canton ou région, ou à d'autres horizons d'étude.

La première étape fut d'évaluer les besoins futurs des bâtiments en fonction du taux de rénovation, des normes SIA et des nouvelles zones à construire. Les données de consommation des bâtiments ont été agrégées par maille hectométrique.

Dans un deuxième temps, les limitations au développement des réseaux thermiques pouvant être modélisées dans un logiciel de SIG, et disponibles sur un portail cartographique, ont été recensées. Ces dernières sont par exemple liées aux zones de protections de la nature, aux grandes routes, aux voies de chemin de fer ou aux fortes pentes. Toutes ces contraintes ont éliminé des zones du périmètre d'étude.

Les mailles restantes ayant des forts besoins en chaleur ont été regroupées en polygones tant que leur demande en chaleur moyenne dépasse 800 MWh/ha. Le nombre de réseaux potentiels trouvés étant élevé (environ 300), des contraintes supplémentaires sur des paramètres tels que la puissance minimale d'un bâtiment raccordé, la surface d'un potentiel réseau ou le nombre de clients ont été rajoutées. Finalement, une centaine de polygones représentant les potentiels réseaux ont été localisés.

Les résultats dépendent directement du choix des contraintes et des hypothèses posées. La méthodologie est réutilisable une fois que les zones trouvées auront été étudiées et qu'il faudra en trouver de nouvelles. De plus, le paramétrage des contraintes donne la possibilité de s'adapter à l'évolution des technologies qui pourraient permettre de créer des réseaux thermiques dans des zones actuellement jugées non-propices.

ABSTRACT

Stratégie énergétique 2050 • *Perspectives chaleur* of canton Vaud • 2035 •
Thermal networks • Suitable areas • Geographical Information System (GIS)

Given the nuclear disaster of Fukushima and the worldwide increase in CO₂ emissions, Switzerland decided to revise its energy strategy and reduce its dependency on imported fossil fuels. At present, about 50% of the gross energy consumed in the country is used for heat production, with more than 80% coming from carbonaceous sources such as natural gas. The shift to renewable energy sources in district heating networks (DHN) has the potential to significantly decarbonise the heating sector and promote the use of indigenous energy.

A review of the state-of-the-art shows that most works in this field aim at (i) evaluating the feasibility of integrating a given heat source in heating networks, (ii) quantifying the amount of energy that can be valorised, and (iii) finding the best topology in a built area. However, there is little work on how to *identify* the most suitable areas for implementing district heating systems instead of decentralised ones.

CSD Ingénieurs SA was commissioned in 2020 to conduct an inventory of the renewable energy sources available in the canton of Vaud for further integration in DHNs. The identification of potential DHN areas was based only on the average heating demand of potential customers, and did not consider any technical or geographical constraints.

This Master's project builds on the study *Perspectives chaleur* and proposes a methodology to identify the most promising areas for renewable district heating networks.

The canton of Vaud was taken as a case study, considering the time frame of 2035, and discretised into cells of 100 meters length. In a first step, the thermal demand of the buildings present in each cell was estimated, considering the renovation rate, the SIA standards and the new building zones.

In a second step, practical limitations to the deployment of heating networks were investigated in details and used to discard some areas from further analysis. The focus was on the constraints that can be modelled in a GIS software and are available on a cartographic portal. The excluded zones correspond to nature protection areas or regions with large roads, railways or steep slopes.

In a third step, the remaining grid cells were aggregated iteratively into polygons as long as their average heat demand exceeds 800 MWh/ha.

As the number of potential networks reached nearly 300, other constraints, such as the minimum number of customers to be connected, were added to refine the results. Finally, about 100 polygons representing the most promising DHNs were identified.

The results strongly depend on the starting assumptions and constraints. It is worth noting that the model can easily be adapted - for example, it could be customised to account for future technological developments that would extend the potential of district heating networks.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La catastrophe nucléaire de Fukushima en 2011 a provoqué une prise de conscience de la dangerosité de l'énergie nucléaire face aux aléas naturels. En conséquence, le peuple suisse a approuvé en 2017 la nouvelle révision de la loi fédérale sur l'énergie. Cette dernière interdit la construction de nouvelles centrales nucléaires, et vise à promouvoir les énergies renouvelables, à réduire la consommation d'énergie et à améliorer l'efficacité énergétique.

Le conseil fédéral a donc élaboré la Stratégie énergétique 2050, l'objectif étant de se défaire des énergies fossiles et à tendre vers plus de sobriété énergétique à l'horizon 2050 [2]. Les mesures principales comprennent la sortie progressive du nucléaire, l'utilisation rationnelle de l'énergie, encouragée par des mesures incitatives, ainsi que l'accélération de la transformation du réseau électrique pour répondre aux nouveaux besoins du marché.

La Suisse dépend à plus de 70% des imports d'énergies de l'étranger : un recours accru aux énergies renouvelables et indigènes est donc nécessaire pour améliorer son autonomie. De plus, les sources d'énergie sont principalement non-renouvelables comme le montre la figure 1.1 ci-dessous issue du dernier rapport "Statistique globale Suisse de l'énergie" [1]. En termes d'énergie brute, le pétrole et le gaz représentent à eux seuls 47.1%, suivis par le nucléaire avec 25.0%.

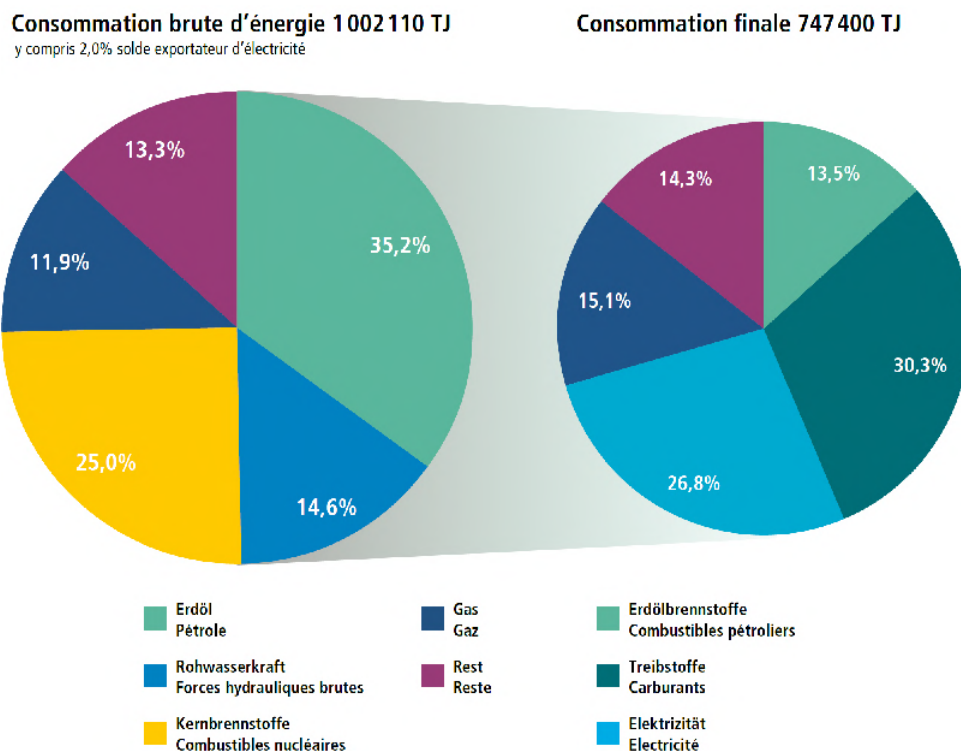


FIGURE 1.1 – Consommation brute et consommation finale d'énergie en Suisse en 2020. Source : [1]

En parallèle d'une production d'énergie renouvelable plus importante, une diminution de la consommation, une augmentation de l'efficacité énergétique et une réduction du gaspillage énergétique aideront à atteindre le but final de la Stratégie énergétique 2050. Tous les secteurs (industrie, bâtiment et transport) et agents énergétiques (chaleur, électricité et produits pétroliers) sont concernés.

La chaleur provient principalement de sources fossiles comme le gaz et le mazout, responsables pour une forte part des émissions de CO₂ du pays. Les besoins en chaleur représentent environ 50% de l'énergie totale consommée dans le canton de Vaud [3], dont seulement 17% sont d'origine renouvelable. Le canton désire atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, avec, comme objectif intermédiaire pour 2030, un taux de pénétration de 35% d'énergie thermique renouvelable dans la production de chaleur [4].

L'objectif cantonal ne sera qu'atteint avec une mise en place rapide et intelligente de nouveaux moyens de production d'énergies renouvelables. Un de ces moyens, encouragé par le COCEn [4], est la création de réseaux thermiques alimentés par des sources renouvelables. Dans cette optique, le canton de Vaud a mandaté l'entreprise CSD Ingénieurs SA pour réaliser une étude sur la revalorisation des ressources indigènes et renouvelables disponibles dans le canton. Intitulée *Perspectives chaleur*, cette étude propose une répartition des ressources renouvelables dans le canton [5]. Les zones ayant une forte demande en chaleur, dans lesquelles il serait imaginable de créer un réseau de chaleur à distance (CAD), ont été recherchées. Ce projet de Master se focalise sur la faisabilité de la mise en place des réseaux thermiques dans le canton de Vaud, et plus particulièrement sur la recherche de zones propices aux réseaux thermiques, alimentés par des ressources renouvelables.

CONFIDENTIALITÉ

Cette version du rapport est la version publique du rapport dans laquelle une partie des résultats ont été enlevés. De ce fait, certaines figures ou certains fonds de carte manquent et des noms d'endroits sont remplacés par "localisation X".

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

L'état de l'art propose un panorama des connaissances et des pratiques en matière de planification des réseaux thermiques, en particulier pour le cas de la Suisse.

La première section 2.1 explique ce qu'est un réseau thermique. La deuxième section 2.2 passe en revue les sources de chaleur. Ensuite, les sections 2.3 à 2.6 sont à propos de différents aspects liés aux réseaux thermiques. Finalement, la section 2.7 parle du travail sur lequel se base le présent projet et la section 2.8 explique l'innovation apportée par cette recherche.

2.1 RÉSEAU THERMIQUE

Un réseau thermique, appelé également réseau de chauffage à distance (CAD), est une installation consistant en un réseau de conduites transportant de la chaleur provenant d'une à plusieurs sources vers des utilisateurs. Cette chaleur peut être utilisée pour le chauffage résidentiel, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) ou, dans certains cas, dans des procédés industriels, et est distribuée via un fluide caloporteur, généralement de l'eau. Ce fluide est en circulation constante entre les chaufferies et les clients, entre la température de distribution (température à laquelle l'eau sort de la chaufferie) et de retour (température à laquelle l'eau revient à la chaufferie). Des sous-stations permettent le transfert de chaleur entre le fluide principal et le réseau de distribution interne du quartier ou du bâtiment.

La température de distribution de l'eau dépend des besoins des clients et de contraintes pratiques du réseau. Le minimum est d'environ 40°C pour assurer un chauffage au sol, 60°C pour la production d'eau chaude sanitaire, afin d'éviter des maladies telles que la légionelle. De ce fait la température de distribution des CAD se situe souvent aux alentours des 70°C[6] et peut connaître des variations saisonnières. En termes techniques, on parle d'« eau chaude » lorsque la température ne dépasse pas 110°C, et d'« eau surchauffée » au-delà, lorsqu'elle est utilisée pour des processus industriels.

Il existe également des réseaux à basse température, qui sont appelés « réseaux anergies »[6]. Le fluide caloporteur est, le plus souvent, de l'eau à une température entre 6 et 20°C. L'eau de ces réseaux est utilisée pour le chauffage à l'aide d'une pompe à chaleur, ce qui permet de délivrer de la chaleur à une température plus élevée, ou pour du refroidissement (passif, ou actif avec une pompe à chaleur (PAC) qui refroidit). Dans le réseau anergie, le surplus de chaleur d'un client permet d'en chauffer un autre. On parle également de "système LowEx" pour le chauffage à distance basse température.

Les réseaux thermiques sont capables de satisfaire des besoins en refroidissement. Ils fonctionnent selon le même principe qu'un CAD mais en apportant un fluide refroidi. Cela s'appelle du "froid à distance" (FAD).

Le choix d'un réseau CAD, FAD ou anergie se fait en fonction des besoins des clients.

Les réseaux de froid à distance (FAD) sont propices lorsque les conditions suivantes sont réunies [7] :

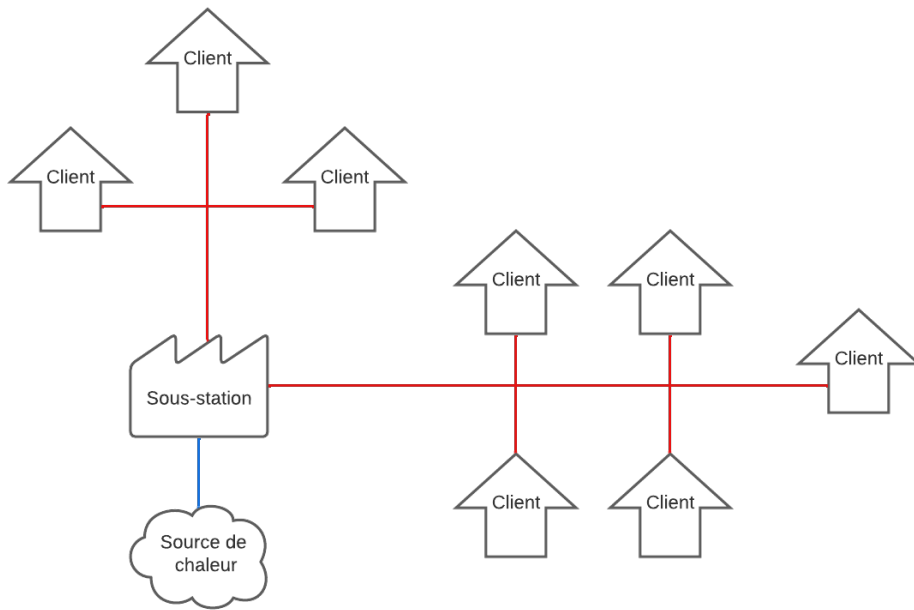
- La demande en froid dépasse 30% des besoins thermiques totaux
- La demande en ECS est basse
- Moins de 100 bâtiments
- Le chauffage nécessite une température de moins de 60°C

Les réseaux de chaleur à distance (CAD) sont propices lorsque les conditions suivantes sont réunies [7] :

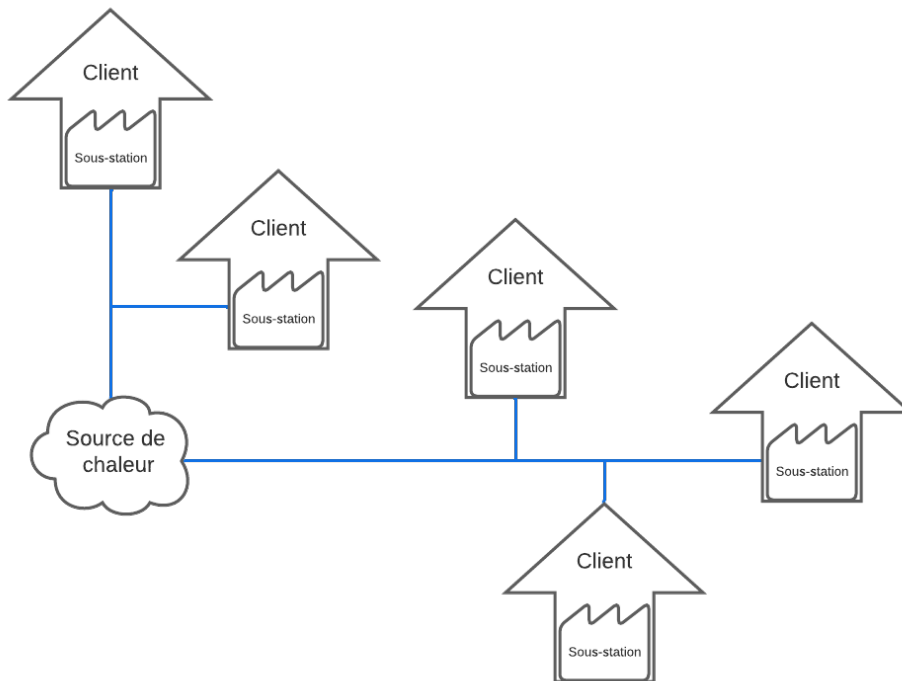
- La demande en froid est inférieure à 30% des besoins thermiques totaux
- La demande en ECS est élevée
- Plus de 100 bâtiments

Le choix n'est pas limité aux trois variantes (CAD, FAD ou anergie). Il est possible de développer des configurations hybrides de ces réseaux en fonction des besoins des clients, notamment par la création de sous-réseaux avec des découplages hydrauliques.

Un réseau est dit "centralisé" lorsque la production de chaleur (ou de froid) se fait en un seul endroit, ou avec un nombre limité de chaufferies, puis est acheminée chez les clients avec des conduites de fluide caloporteur. Le réseau est dit "décentralisé" lorsque la production se fait en plusieurs lieux, en général chez les clients. Les deux schémas ci-dessous illustrent ces architectures de réseau.



(a) Réseau centralisé



(b) Réseau décentralisé

FIGURE 2.1 – Illustration d'un réseau centralisé (a) et d'un réseau décentralisé (b) alimenté par une source de chaleur renouvelable dont la température doit être augmentée par une PAC dans une sous-station. Les traits bleus symbolisent les conduites de fluide froid (température de la source) et les traits rouges symbolisent les conduites de fluide réchauffé (température requise par les clients). Les conduites ne sont pas doublées sur les schémas pour simplifier la lecture.

La température de distribution de la chaleur est réductible (cascades de température) lorsque les clients ont des besoins différents.

La température délivrée dépend en partie du choix de la source de chaleur. En effet, tous les modes de production de chaleur ne permettent pas d'atteindre des températures élevées, et chacun a un rendement optimal dans des conditions différentes. Par exemple, les pompes à chaleur sont optimales pour une production de chaleur à une température peu élevée (jusqu'à 90°C) tandis qu'un couplage chaleur-force (CCF) au bois permet d'atteindre des températures bien plus élevées¹

Selon une étude sur les scénarios d'économie d'énergie [8], les réseaux de basse température sont ce qu'il faut construire en priorité pour le futur. Cette conclusion provient du constat que les réseaux en haute température vont devenir de moins en moins utiles à cause des économies d'énergie thermique faites dans les bâtiments. En même temps le potentiel des réseaux devrait augmenter de dix fois par rapport au potentiel de 2019. La recherche et les investissements doivent se concentrer sur les réseaux en basse température.

2.1.1 AVANTAGES

La valorisation de chaleur dans un réseau est nécessaire pour plusieurs sources de chaleur renouvelables, comme par exemple la géothermie profonde, l'utilisation de l'eau du lac ou une usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) car elles nécessitent des grandes infrastructures. De plus, le rendement atteint par de grandes installations est plus élevé que celui des petites installations individuelles², ce qui permet également un plus faible facteur d'émission par quantité de chaleur produite. Le traitement de l'éventuelle pollution causée par la source de chaleur, par exemple les émissions d'oxydes d'azote (NOx) dérivant du bois, est meilleur dans une grande installation que dans une petite chaudière individuelle.

Un autre avantage non-négligeable est le gain de place chez le client. En effet, toute la production de chaleur se fait en dehors de son habitation et l'espace de la chaudière plus d'un éventuel ballon de stockage est libéré. Le raccordement à un réseau thermique renouvelable permet aux clients n'ayant pas la place d'installer une chaudière renouvelable de tout de même être chauffé par une source propre³. Le coût de l'entretien est également négligeable. La puissance cumulée sur une zone de desserte du réseau est plus faible que si chaque habitation avait sa propre installation. Le foisonnement permet de réduire la puissance totale des installations. Finalement, il est possible d'avoir plusieurs sources de chaleur différentes, dont une pour la demande de base, et une facilement modulable pour les demandes de pointe.

2.1.2 DÉSAVANTAGES

Les réseaux de chaleur à distance présentent certains défauts. Les coûts d'investissement sont généralement plus élevés en comparaison avec une solution fossile individuelle et représentent plus de 50% du coût total [6]. Cette différence est due à la plus grande complexité de l'installation et aux coûts de raccordement. Les pertes thermiques dans le réseau de distribution ne sont pas négligeables et peuvent représenter 5 à 10% de la chaleur distribuée. Dans le cas de l'utilisation d'une énergie renouvelable telle que le solaire, les pertes sont jugées acceptables car l'énergie est "gratuite", mais elles sont problématiques lorsque l'énergie est d'origine fossile (ex : gaz), bois ou électrique, à cause des coûts du combustible plus élevés.

Un résumé de l'ASCAD sous forme de matrice SWOT est disponible dans les annexes A à la figure ii

1. Les nouvelles technologies permettent parfois des exceptions, comme par exemple les nouvelles pompes à chaleur haute température qui atteignent des centaines de degrés.

2. Cela ne comprend pas les pertes de chaleur lors du transport.

3. Les systèmes de chauffage émettant moins de CO₂ qu'un chauffage fossile prennent souvent plus de place, entre autre à cause du stockage de combustible ou chaleur nécessaire inhérent au mode de production de chaleur.

2.1.3 DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement du réseau se fait en fonction des besoins des clients, en prenant en compte les demandes en énergie et en puissance. Idéalement, il faudrait connaître leur demande horaire sur plusieurs années mais cette information est souvent inconnue ou partielle. Le "Guide du chauffage à distance" [9] recommande de se baser sur les consommations antérieures pour la quantité d'énergie et sur la courbe caractéristique de la demande pour la puissance (si elle est connue). Ensuite, les besoins en énergie inconnus peuvent être estimés avec la norme SIA380/1 [10] et ceux en puissance avec la norme SIA 384.201 [11].

Afin de connaître des puissances thermiques plus spécifiques, les besoins en chaleur sont divisés par les heures d'exploitation. L'estimation des puissances de pointes se base sur 4000 à 6000 heures en fonction des tampons. La puissance de pointe doit également prendre en compte la température extérieure (une moyenne sur 10 ans par exemple). En plus de cela, il faut ajouter 5 à 10% de marge qui ne dépendent pas du bâtiment.

Dans les modélisations, les bâtiments sont souvent classés en deux groupes : anciens (avant 1970) et modernes (Minergie 2015).

La puissance requise par un bâtiment n'est pas constante durant l'année et se compose d'une demande de base et d'une demande variable. Afin de minimiser l'utilisation d'énergie fossile sans surdimensionner l'installation, il est fréquent d'avoir un système utilisant des énergies renouvelables en combinaison avec une 2ème source d'énergie. Cette dernière est caractérisée par une meilleure réactivité (temps de réponse faible), typiquement une chaudière à combustible fossile (gaz ou mazout), pour gérer les pointes en puissance. Une chaudière avec une faible puissance permet généralement de couvrir une part significative des besoins en chaleur. La source renouvelable couvre entre 50 et 90% des besoins en chaleur en ne produisant que 10 et 60% de la puissance maximale demandée [6]. Le reste de la puissance nécessaire pour satisfaire les demandes de pointes est couverte par le système secondaire, une chaudière fossile, ou un accumulateur de chaleur.

La figure 2.2 ci-dessous illustre une courbe de charge annuelle selon le pourcentage de la puissance (axe y). La partie bleue serait couverte par la source renouvelable et la partie orange serait couverte par un appoint.

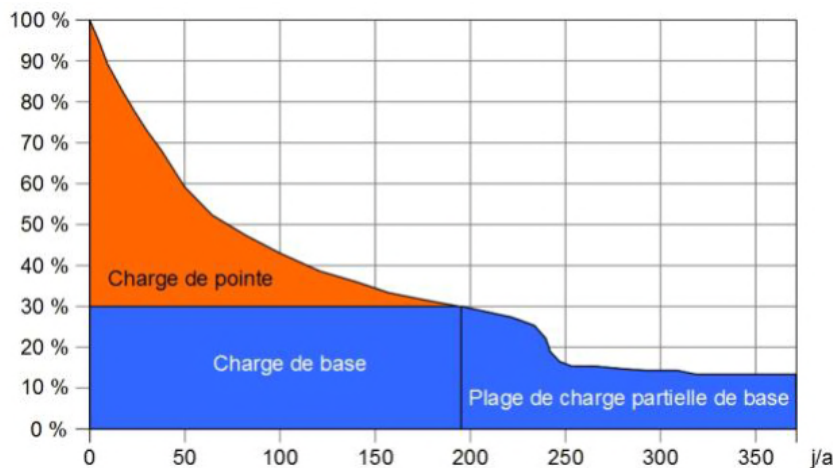


FIGURE 2.2 – Représentation d'une courbe de charge annuelle typique. Source : [6]

Une deuxième figure se trouve dans l'annexe A (figure iii) et illustre le cas où la source renouvelable peut fonctionner selon deux niveaux de puissance.

La répartition des besoins en chaleur entre la production d'ECS et le chauffage d'un bâtiment résidentiel récent est disponible dans l'annexe A, figure iv.

La température de distribution d'eau influence les pertes thermiques, le diamètre des conduites, la vitesse d'écoulement, les pertes de charges et donc les coûts des conduites. Il est impératif de bien dimensionner tout le réseau.

2.1.4 EXTENSION ET DENSIFICATION DES RÉSEAUX

Actuellement, une part des réseaux CAD sont alimentés par des sources non-renouvelables, qui doivent donc être remplacées par des sources renouvelables pour décarboner la production de chaleur. Le remplacement est parfois compliqué en raison du manque de place dans les sous-stations pour installer une production d'énergie renouvelable.

Cependant, le Livre Blanc de l'ASCAD [12] prévoit que d'ici 2060 toute structure adaptée aux CAD soit majoritairement approvisionnée à partir d'énergies renouvelables et ceci de façon rentable.

La demande en chaleur par utilisateur est amenée à diminuer. Les réseaux actuels vont perdre une part de la demande en chaleur des clients en raison de l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments⁴. De ce fait, il sera nécessaire de densifier les réseaux en trouvant de nouveaux clients pour maintenir la demande en chaleur totale.

2.2 LES SOURCES DE CHALEUR

Les réseaux thermiques ont besoin d'être alimentés par des sources de chaleur (ou de froid pour un réseau FAD). Il existe un grand nombre de sources utilisables dans les réseaux thermiques. Elles peuvent être fossiles ou renouvelables, localisées à un endroit précis, ou transportables, utilisables directement ou nécessitant une augmentation de la température.

L'ASCAD a évalué le potentiel de plusieurs sources de chaleur, selon leur lieu d'utilisation.

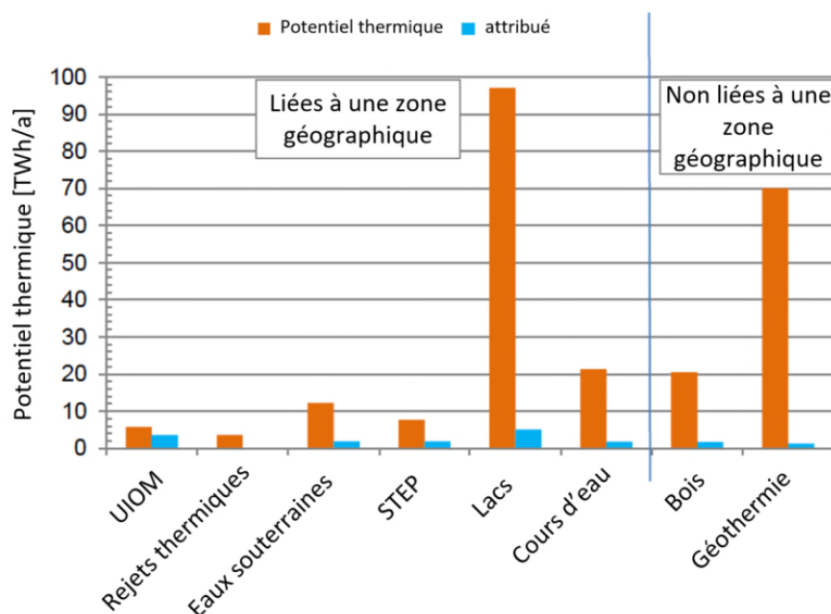


FIGURE 2.3 – Potentiel thermique des énergies renouvelables (orange) et volume attribué aux zones de chauffage de proximité et à distance (bleu clair) estimé pour 2050 par le Livre Blanc de l'ASCAD [12].

4. Les bâtiments rénovés diminuent leur consommation d'énergie.

Il en ressort que l'eau des lacs et la géothermie sont les sources renouvelables les plus importantes. En 2050, les CAD pourraient couvrir 38% de la demande, dont 69% en basse température [6]. L'utilisation massive de PAC nécessitera une quantité significative d'électricité, de l'ordre d'un tiers à un quart de la demande en chaleur. Il est prévu d'utiliser des CCF au biogaz et au bois pour augmenter la quantité d'électricité renouvelable en Suisse.

BASSE TEMPÉRATURE

Les principales sources de chaleur en basse température sont l'air ambiant, la géothermie à faible profondeur et l'eau des lacs. Les eaux usées peuvent également être utilisées. Les sources de chaleur en basse température sont valorisées en combinaison avec une pompe à chaleur. Il n'y a pas de définition stricte de la basse température. Dans ce rapport, la limite de 70°C sera utilisée car elle sépare les sources directement utilisables⁵ de celles dont la température doit être augmentée.

HAUTE TEMPÉRATURE

Certaines sources de chaleur sont disponibles à une température supérieure à 100°C, telles que les UIOM, les CCF au biogaz ou les centrales à bois-énergie. Dans ces cas, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à une pompe à chaleur car la température est suffisamment élevée pour que la chaleur soit directement injectée dans un CAD.

Les sources de chaleur en haute température peuvent également être exploitées pour la production d'électricité, avec des turbines ou par cogénération⁶, ce qui permet de produire de l'électricité et de valoriser les rejets de chaleur restants dans un CAD [13].

2.2.1 CHAUDIÈRES FOSSILES

Les chaudières fossiles, au gaz naturel ou au mazout, sont souvent utilisées pour répondre aux demandes de pointe. Ces dernières ont l'avantage de pouvoir être mises en retour en un très court intervalle de temps pour répondre aux variations de demande dans le réseau. Le désavantage évident est l'utilisation des énergies fossiles qui n'est pas désirable dans un contexte de décarbonation de la chaleur. L'utilisation unique d'énergie fossile dans un réseau de chaleur à distance est même devenu illégal au niveau fédéral.

Dans la mesure du possible, les chaudières fossiles sont conservées uniquement pour satisfaire la demande de pointe lorsque la source renouvelable n'arrive pas à fournir suffisamment de chaleur.

2.2.2 CHAUDIÈRE AUTOMATIQUE À BOIS ÉNERGIE

Le bois est considéré comme étant une source d'énergie renouvelable car son exploitation est jugée neutre en carbone. Les arbres absorbent du CO₂ au cours de leur cycle de vie et le stockent sous forme de bois. Le quantité de CO₂ émise lors de la combustion du bois est la même que si l'arbre se décomposait naturellement après sa mort.

Plusieurs types de chaudières automatiques existent sur le marché. Pour les réseaux on utilise principalement des chaudières à bois déchiqueté ou aux plaquettes de bois. Les pellets sont plutôt utilisés dans les petites chaudières chez des privés. Le transport des pellets entre le lieu de croissance du bois, celui de la fabrication des pellets et l'endroit où ils seront consommés est une source d'émission de CO₂ indirecte, mais non-négligeable.

5. Dans un CAD qui fournit de l'ECS.

6. La cogénération est également appelée "Couplage Chaleur-Force", abrégé CCF dans la suite du rapport.

Différents types de bois sont utilisables dans les chaudières à bois : les copeaux de bois (bois humide), les résidus de bois de taille et composition variable, le vieux bois, notamment celui de démolition, considéré comme pollué. Certaines chaudières à bois sont équipées de filtres spéciaux qui permettent de retenir les particules de pollution provenant de bois ayant absorbés des produits toxiques⁷.

Le raccordement d'un CCF à un CAD est bénéfique à la revalorisation de la chaleur. En étant raccordé à un CAD, le CCF peut fonctionner selon les besoins en électricité et revaloriser la chaleur dans le CAD. L'ASCAD préconise même une utilisation du bois uniquement en cas de production simultanée d'électricité [9].

La puissance des chaudières à bois est modulable. Toutefois, la demande de modification de la puissance est progressive. La variation est d'environ 1% de la puissance par minute [6]. Un accumulateur de chaleur est tout de même nécessaire pour faire face aux variations de demande.

L'investissement pour une centrale à bois est très élevé. Un minimum de 2 MW est généralement requis afin que la centrale puisse être rentable[6].

Le potentiel du bois énergie dans le canton de Vaud est de 285'000 t/an, soit environ 1200 GWh [4]. Actuellement on exploite 180'000 t/an. Les 105'000 t/an restants sont plus difficilement exploitables en raison des propriétés privées et du morcellement de la forêt.

2.2.3 REJETS DE CHALEUR INDUSTRIELLE

Les rejets de chaleur industrielle doivent être de préférence des rejets de grande puissance et dont les propriétés (température, énergie et puissance) soient assez constantes dans le temps pour que la revalorisation dans un CAD soit rentable. Le type de rejet dépend directement de l'industrie. La température minimale pour la revalorisation est de 30°C [14].

Le principal problème de ce type de source d'énergie est la durée d'investissement. Un réseau thermique est fait pour durer 40 ans et les investissements doivent être rentables sur cette période. À l'opposé, les industries font quant à elles des investissements qui doivent être rentables beaucoup plus rapidement, par exemple avec des temps de retour de 3 ans. Ce temps plus court est lié à la rapide évolution possible de l'industrie qui peut changer ses processus voire même être délocalisée. Les sources de chaleur issue de rejets industriels sont de ce fait des sources sur lesquelles le réseau ne doit pas être basé. En effet, elles peuvent disparaître alors que le réseau est encore en fonction.

L'utilisation des rejets thermiques est possible sans réseau mais la chaleur doit être consommée sur place. Le réseau permet de transporter la chaleur, et par la même occasion, d'augmenter le taux de revalorisation.

Les rejets thermiques des grands centres de calculs (datacenter) sont une source d'énergie revalorisable dans les réseaux de CAD. Il est même possible d'utiliser directement la chaleur pour chauffer l'ECS [15], [16].

Les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) sont de très bonnes sources de chaleur à haute température. Néanmoins, elles se situent souvent en dehors des villes (pour des raisons esthétiques et pour éviter les transports en ville) ou leurs rejets thermiques sont déjà exploités en interne [12]. L'évaluation du potentiel des UIOM n'est pas très fiable. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) évolue en fonction de la composition de nos déchets. Le plastique et les déchets biogènes ont un PCI élevé mais leur proportion dans les sacs poubelles diminue avec l'augmentation du tri des déchets [12].

7. Ce bois est souvent nommé bois "problématique"

Une étude de 2020 sur l'utilisation des rejets de chaleur industrielle dans les réseaux thermiques en Suisse a évalué le potentiel de réutilisation en prenant en compte les contraintes temporelles et spatiales [17]. Dans cette étude, le potentiel de stockage saisonnier a été pris en considération. Il en ressort que, selon le scénario pris en compte, 7.7 à 10.5 TWh/an d'énergie thermique peuvent être revalorisés dans des réseaux thermiques, ce qui représente 64 à 88% des rejets thermiques des industries. Le reste correspond à des contraintes spatiales, temporelles ou technologiques⁸. Selon l'étude, le stockage saisonnier et l'utilisation de l'énergie à basse température est important pour optimiser l'utilisation des rejets thermiques.

2.2.4 EAU USÉE À L'ENTRÉE DES STATIONS D'ÉPURATION

L'eau des stations d'épuration des eaux usées (STEP) est une source de chaleur très importante. La température de cette source de chaleur est bien plus élevée que celle d'un lac ou de la géothermie peu profonde, car cette eau contient une partie d'eau chaude sanitaire usée. A titre d'exemple, le débit minimal mesuré à la STEP de Morges est de 80 l/s et la température minimale de l'eau est 10.5°C en hiver [18]. La création d'un CAD grâce à la STEP permet de produire chaque année 1400 MWh de chaleur.

Les gaz d'épuration de STEP sont également une source d'énergie pour produire de l'électricité à l'aide d'un CCF. La chaleur produite par les moteurs est injectable dans le réseau. La cogénération s'utilise pour quelques kW à plus de 1 GW électrique.

Le potentiel de revalorisation de la chaleur des nouvelles STEP est très important. En effet, beaucoup de STEP arrivent en fin de vie et seront rénovées ou reconstruites afin de répondre aux nouveaux standards de traitement de l'eau.

2.2.5 AIR AMBIANT

L'air ambiant est une source de chaleur disponible que l'on trouve presque partout, mais dont le défaut principal est la variabilité de la température. De ce fait, cette source n'est pas utilisée toute l'année de manière optimale et peut devenir indisponible si la température de l'air est trop basse. Deux autres inconvénients non-négligeables en fonction du lieu d'utilisation sont les émissions sonores et le rejet de chaleur. Les PAC en ville sont une source de nuisance sonore et de potentiels îlots de chaleur selon leur emplacement. Il est donc préférable de les utiliser en dehors des villes. L'utilisation de PAC sur l'air est déconseillée en altitude (>1000m) car la température de la source de chaleur (l'air) peut descendre en-dessous des valeurs d'utilisation préconisées par les constructeurs.

2.2.6 GÉOTHERMIE EN FAIBLE ET MOYENNE PROFONDEUR

La géothermie en basse température va chercher une source de chaleur à faible profondeur dont la température est stable au cours de l'année. La température choisie se situe entre 12 et 15°C et se trouve à une profondeur allant généralement de 100 à 300 m⁹. Un captage en très faible profondeur (p. ex. 1.5 m) sur une grande surface est également réalisable mais la température en hiver sera plus basse que dans un forage plus profond.

Le potentiel maximal est calculable en supposant un forage tous les 5 m avec profondeur maximale de 200 m et un cumul maximal de 2 km par hectare [19]. La modélisation du potentiel d'Alina Walch montre que la géothermie en faible profondeur est peu disponible en zone urbaine en raison du manque de surfaces disponibles pour les forages. Des forages profonds sont préférables dans ces endroits. Son étude montre également qu'il y a une grande densité de chaleur autour du lac de Neuchâtel et du lac Léman.

8. À cause des niveaux de température et limitations)

9. Les forages jusqu'à 400 m sont considérés comme « faible profondeur », au-delà nous parlons de « géothermie profonde ».

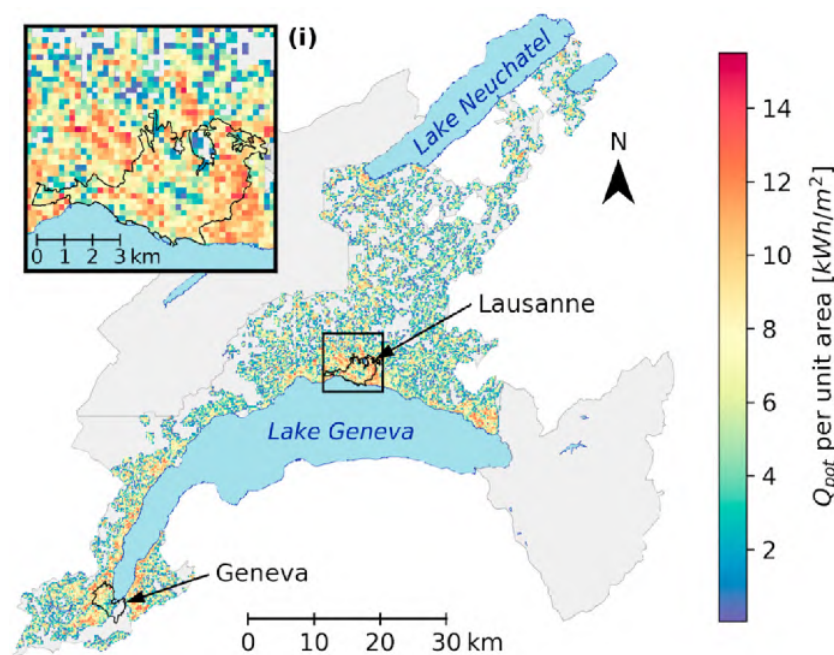


FIGURE 2.4 – Estimation du potentiel géothermique par surface de 200x200m, en [kWh/m²], en prenant en compte la place disponible pour les installations. Source : [19].

Le potentiel à moyenne profondeur (400 à 3000m) dans les aquifères est élevé selon l'étude de la COCen [4]. En effet, la chaleur de cette ressource pourrait couvrir 4400 GWh thermique par an, soit environ 20% des besoins de 2015.

En Suisse, nous n'avons pas de couche assez chaude en faible profondeur facilement accessible pour exploiter directement la chaleur sans devoir passer par une PAC, le gradient géothermique étant de seulement 30°C par km en moyenne.

Le sol a également la capacité de stocker la chaleur de manière saisonnière. Il est par exemple possible d'extraire la chaleur d'un bâtiment en été pour le refroidir et de la réinjecter dans le sol. Le solaire thermique est parfois utilisé pour réalimenter le sol en chaleur car la source peut s'épuiser sur le long terme.

Une autre façon d'exploiter la chaleur du sol est de pomper directement l'eau présente dans ce dernier. Un minimum de 100kW est souvent requis afin que le projet soit rentable. Selon [12], la Suisse contient 1233 km² de zones d'eaux souterraines d'au moins 10m d'épaisseur, soit 3% du territoire. L'énergie revalorisable, en prenant en compte les panaches thermiques, varie selon les études, mais une valeur de 1.5 W/m² est garantie pour la chaleur ambiante spécifique.

2.2.7 GÉOTHERMIE PROFONDE

La géothermie profonde va chercher de la chaleur en profondeur dans le sol. Les forages sont complexes et coûteux. Il faut donc une augmentation de la température d'au moins 50°C/km afin que le forage soit rentable [6], ce qui est supérieur au gradient observé en moyenne en Suisse. Il existe différentes méthodes pour exploiter la chaleur, dont les plus connues sont les suivantes : la géothermie hydrothermale qui utilise l'eau chaude dans le sol, les sondes géothermiques profondes et la méthode "Hot-Dry-Rock" (HDR) qui consiste à exploiter la chaleur dans la roche chaude et sèche avec un puits d'injection d'eau et un forage qui récupère la chaleur. En terme de place, une surface de 5400 m² est nécessaire pour le forage [12].

La géothermie profonde est également utilisée pour produire de l'électricité grâce à la haute température de l'eau qui peut être turbinée¹⁰. Lorsque l'eau chaude (ou vapeur) n'est pas turbinée, elle est directement injectée dans un réseau CAD.

Le potentiel de production pétrothermale est quant à lui estimé à 360 GWh thermique et 120 GWh électrique [4]. Une plus grande prudence est nécessaire pour cette ressource, à cause de la fracturation nécessaire de la roche pouvant provoquer des secousses sismiques involontaires.

Plus globalement, la géothermie (faible, moyenne et profonde) occupe, au niveau du canton, la deuxième place en termes de potentiel énergétique.

Selon [20], la Suisse serait l'un des pays avec la plus grande densité de puissance géothermique. L'étude parle de 45 kW/km². Pour l'ensemble de la Suisse, cela représentait une puissance 2197 MW thermique avec une production annuelle de 3962 GWh.

2.2.8 EAU DES LACS

L'eau des lacs est une bonne source de chaleur qui peut être utilisée toute l'année si la température est stable. Pour cela, des conduites vont chercher de l'eau en profondeur dans les lacs (aux alentours de 60m nous avons une température stable d'environ 5°C). L'OFEV autorise de rafraîchir l'eau de 3K. L'eau peut aussi servir au refroidissement des bâtiments en utilisant le refroidissement passif. Une conduite de retour d'eau est nécessaire afin de rejeter l'eau utilisée.

Le lac Léman est la plus grande source de chaleur du canton [21].

2.2.9 SOLAIRE THERMIQUE

L'énergie solaire thermique est une bonne source de chaleur présente partout. Les panneaux solaires thermiques ont une puissance moyenne de 125 W/m² et une production annuelle de 1100 kWh/m². Leur rendement typique, en prenant en compte le stockage, se situe entre 50 et 60% [21].

Cette énergie n'est que peu utilisée à cause du déphasage entre la production et les besoins, tant horaire que saisonnier. L'ensoleillement maximal journalier est quand le soleil est au zénith, soit vers midi, alors que les plus demandes de chaleur les plus fortes ont lieu le matin et le soir (dans les habitations). L'irradiation solaire est plus élevée en été mais les besoins thermiques, principalement pour le chauffage des bâtiments, sont atteignent leur maximum en hiver. Pour ces deux raisons, le solaire thermique n'est pas une source d'énergie pratique pour satisfaire les besoins thermiques du secteur résidentiel. Une façon d'y remédier est de recourir à un stockage d'eau chaude dans un ballon, ce qui permet de couvrir les besoins d'ECS. Néanmoins, ces derniers ne représentent que de 5 à 12% des besoins en chaleur totaux d'une "ancienne" habitation ou à 25% d'une habitation moderne.

Le préchauffage de l'eau est un moyen de maximiser la rentabilité. Si le solaire thermique est combiné avec de la géothermie, le surplus de production en été est réinjecté dans le sol pour le réchauffer en prévision de l'hiver.

Des capteurs non-vitrés sont utiles pour refroidir le bâtiment durant les nuits estivales.

Le couplage de panneaux solaires thermiques avec une PAC sol-eau augmente significativement le coefficient de performance (COP) global de la PAC sol-eau. Les coûts d'investissement augmentent mais le temps de retour sur investissement diminue grâce aux coûts d'opération plus faibles et à la production de chaleur plus élevée¹¹. Ce couplage est particulièrement utile dans les zones "froides" qui sont bien ensoleillées, donc les zones montagneuses en Suisse.

10. L'utilisation des cycles organiques de Rankine (ORC) est souvent conseillée grâce à leur meilleur rendement à des températures modérées

11. Il était de 8.5 à 23 ans en 2015 [22].

2.2.10 ACCUMULATEURS D'ÉNERGIE THERMIQUE

La différence temporelle entre la production et la demande en chaleur est problématique pour les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire. Une solution pour y faire face est le stockage de l'énergie qui permet un découplage dans le temps en compensant les pics et les chutes de production ou de demandes. Le stockage d'énergie renouvelable permet de ne pas devoir faire appel à une énergie fossile pour satisfaire les demandes de pointe.

Le stockage le plus répandu est le stockage de chaleur sensible, qui est une méthode mature et peu coûteuse. Nous la connaissons souvent sous la forme d'un ballon d'eau chaude pour un stockage de courte durée. L'eau est stockée à des températures allant de 0 à 100°C. Il est possible de monter plus haut, jusqu'à 2000°C en théorie, en stockant à haute pression, au détriment de coûts plus onéreux [6]. Les huiles thermiques permettent de stocker à plus haute température, entre 100 et 400°C, en restant à pression atmosphérique. La capacité thermique, c'est-à-dire la quantité de chaleur pouvant être stockée par kg du fluide caloporteur, est néanmoins deux fois plus faible que celle de l'eau. Un mélange d'huile et de roche permet d'augmenter le stockage. Pour les hautes températures on utilise plutôt des matériaux solides comme le béton ou la céramique. Le froid est généralement stocké avec de l'eau glycolée afin de pouvoir descendre en dessous de 0°C tout en évitant le gel.

Le stockage saisonnier dans le sol est une méthode récente qui a fait ses preuves. Le sol possède de bonnes propriétés thermiques avec une chaleur spécifique de 0.42 à 0.78 kWh/m³K et une conductivité thermique de 1 à 3 W/mK.

Il existe cependant d'autres technologies de stockage pour d'autres niveaux de température, durée de stockage, capacité ou encore puissance. Les accumulateurs de chaleur latente et les accumulateurs thermochimiques sont des exemples de ces technologies. Ces derniers permettent de stocker de plus grandes quantités de chaleur pour la même masse de stockage, et les matériaux à changement de phases sont particulièrement prometteurs.

Malheureusement, beaucoup de ces technologies ne sont pas encore matures, ou ne sont utilisées que dans des centrales thermiques à grande échelle, et de ce fait ne sont pas utilisées dans les réseaux thermiques. C'est pourquoi elles ne seront pas prises en compte dans ce travail.

2.3 OPTIMISATION DES RÉSEAUX

Il existe plusieurs études traitant de la création des générations automatiques de tracé de réseau. Dans sa recherche [23], Jérémie Unternährer a utilisé la programmation MILP (mixed integer linear programming) et la théorie des graphes de Johnson et Kruskal pour générer des tracés. La fonction objective à minimiser était la distance totale entre les bâtiments d'un même cluster (fonction ILP). Afin de pouvoir faire fonctionner le programme, il est nécessaire de créer des clusters préliminaires pour permettre le calcul sans atteindre la limite de mémoire. La méthode utilise les routes pour définir les possibilités de tracés des conduites. La liaison entre les maisons et les routes a un taux d'erreur d'environ 4% à prendre en compte. Des évaluations économiques ont également été réalisées en se basant sur un travail de C. Reidhav et S. Werner [24]. Malheureusement, le programme ne peut pas créer de redondance pour la sécurité du réseau. La conclusion de ce travail est que le programme fonctionne pour une évaluation préliminaire mais ne peut pas remplacer un prédimensionnement traditionnel.

2.4 RENTABILITÉ D'UN RÉSEAU THERMIQUE

La rentabilité d'un réseau thermique se calcule avec le prix de vente de l'énergie. Le réseau est rentable lorsqu'il est possible de vendre l'énergie aux clients, soit lorsque le prix de vente du kilowattheure est attractif. Les différents types de coûts à prendre en compte sont ceux de la construction du réseau, ceux de l'opération et ceux de la maintenance. Le calcul de la rentabilité tient compte des paramètres financiers tels que les intérêts ou l'inflation. Une méthode détaillée est disponible dans le "Guide du chauffage à distance" [6].

Le calcul exact de rentabilité du réseau n'est pas possible dans le cadre de ce projet car la prospection de zones ne permet pas d'atteindre le niveau de détails nécessaires au calcul de rentabilité. Cependant, le choix des clients permet presque de garantir la rentabilité du réseau. Les maisons individuelles ont une consommation trop faible (15 à 30 kWh/m²SRE/an) pour que le raccordement soit rentable [9]. Les zones d'immeubles locatifs et les grands consommateurs sont intéressants si leur consommation est au-dessus de 70 kWh/m²SRE/an. Entre 50-70 kWh/m²SRE/an le raccordement est discutable et en dessous de 50 kWh/m²SRE/an il ne sera pas rentable.

La localisation du réseau influence énormément les coûts du génie civil, par exemple, une fouille pour des conduites en ville coûte plus du double qu'une fouille en dehors de la ville.

L'estimation du coût des conduites avec le génie civil est difficile à chiffrer de manière certaine. Le prix moyen d'une conduite dans un CAD, en prenant en compte le génie civil, était de [7] :

- 1060 CHF/MW dans un réseau 8°C aller et 5°C retour
- 870 CHF/MW dans un réseau 70°C aller et 50°C retour
- 720 CHF/MW dans un réseau 150°C aller et 70°C retour

Ces valeurs sont très approximatives et servent uniquement à chiffrer de façon rudimentaire le coût des conduites.

Le coût des matières premières pour la fabrication du réseau (entre autres de l'acier) était presque stable. Depuis la crise sanitaire du Covid et la guerre en Ukraine ces prix varient de jour en jour et il n'est pas possible de les prévoir.

Les ruptures technologiques sont susceptibles d'augmenter la rentabilité d'un réseau mais il n'est malheureusement pas possible de les prévoir de manière certaine.

2.5 LA SUISSE ET LES RÉSEAUX THERMIQUES

En 2020, la Suisse comptait plus de mille réseaux CAD. Ceux-ci fournissaient 6 à 8 TWh/an, soit 6 à 8% des besoins en chaleur [25].

En comparaison avec d'autres pays d'Europe, ce pourcentage est faible. 20% des habitants du Danemark, de la Suède, de la Finlande, de l'Islande, de la Pologne, de la République Tchèque et de l'Autriche étaient déjà chauffés par les CAD en 2018 [6].

Selon la "Perspectives énergétiques 2050+", élaboré pour l'OFEN par un consortium de sociétés (Prognos SA, TEP Energy Sàrl, Infrasa SA et Ecoplan SA) [26], les besoins en chaleur seront de 74 TWh par an. Cette estimation est basée sur le scénario "zéro net" qui estiment 45 TWh pour la chaleur ambiante, 10.5 TWh pour l'ECS et 18.5 TWh pour la chaleur des processus industriels.

Actuellement, les réseaux CAD existants se situent principalement en ville et sont alimentés par la chaleur des IUOM pour la demande de base et une énergie fossile s'occupe des demandes de pointes. En campagne, nous trouvons de petits réseaux basés sur la biomasse, également avec du fossile pour les demandes de pointes.

L'ASCAD s'attend à ce que les réseaux thermiques couvrent 14 à 24% des 74 TWh de chaleur prévus en 2050 (soit 10 à 18 TWh). Afin d'y arriver efficacement en matière d'énergie et que cela soit économiquement attrayant, l'ASCAD propose d'approvisionner 50 à 80% de la demande en chaleur des quartiers des villes par des réseaux CAD, ainsi que jusqu'à 50% de la chaleur des agglomérations densément peuplées ou très industrialisées. Ce changement de mode de chauffage devrait diminuer les coûts d'investissement de 20 à 25% par rapport aux solutions décentralisées actuellement en place [27].

Les consommateurs clés, ceux dont le coût du raccordement est rapidement rentable, sont ceux dont la demande de 50 KW ou plus pendant 2000 heures par an, soit 100 MWh/an.

En termes de densité énergétique, soit la demande en chaleur annuelle par surface, l'ASCAD préconise d'atteindre au moins 700 MWh/ha/an.

La densité linéaire est également utilisée pour prendre en compte le tracé des conduites. On vise une densité énergétique linéaire de 2 MWh/m/an dans l'ensemble du réseau.

Dans une zone de raccordement, 50 à 80% des clients potentiels choisiront de se raccorder au réseau suite à la proposition.

2.6 POLITIQUE AUTOUR DES RÉSEAUX THERMIQUES

La loi sur le CO2 exigeait une réduction de 20% des émissions d'ici à 2020 et de 50% d'ici à 2030 en se basant sur les valeurs de 1990.

Le canton souhaite avoir une production décentralisée, de l'autoconsommation et des micros-réseaux, aussi bien pour le thermique que pour l'électricité [4].

La production d'énergie renouvelable est encouragée via diverses incitations financières. Ces incitations se font souvent sous la forme de subventions.

Au niveau des soutiens financiers, l'ASCAD pense que l'OFEN ferait mieux d'apporter un soutien sur plusieurs années avec un taux réduit plutôt que les soutiens financiers élevés à court terme qui n'apportent pas de garantie sur le long terme.

Lors de la création d'un CAD renouvelable, les propriétaires des bâtiments neufs ont l'obligation de se raccorder à moins qu'ils couvrent déjà leurs besoins avec une source d'énergie renouvelable. Il en va de même pour les bâtiments ayant subi des transformations importantes. Le raccordement au réseau est imposable moyennant un délai approprié [28].

La Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie (EnDK) mentionne dans son Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC) que "Les communes et les entreprises actives dans l'approvisionnement énergétique sont tenues de participer à la planification énergétique." [28]. Cela montre le souhait d'une planification globale et rationnelle. Une entreprise est à même d'influencer cette planification si elle propose des projets qui s'intègrent dans la stratégie du canton. Les ressources thermiques dans le canton de Vaud ne sont pas illimitées. Une coordination vis-à-vis de leur revalorisation est donc nécessaire afin de ne pas les gaspiller.

2.7 PERSPECTIVES CHALEUR

L'étude *Perspectives chaleur* [3] a défini de larges zones dont les besoins moyens en chaleur sont supérieurs à 800 MWh/an (voir la figure 3.1 au chapitre 3. Ces zones propices aux réseaux thermiques se situent principalement dans les grosses agglomérations.

En ce qui concerne les sources de chaleur, elles seront ¹² réparties dans des zones géographiques définies par le rapport mais il n'y a pas de lieu d'exploitation précis.

2.8 INNOVATION

Les recherches réalisées à ce jour ont principalement permis de trouver des sources de chaleur et de la quantifier. L'étude *Perspectives chaleur* propose une répartition des sources dans différentes régions du canton.

En ce qui concerne le bon emplacement d'un réseau, les recherches réalisées jusqu'à ce jour se sont plutôt focalisées sur le tracé optimal afin de minimiser les coûts ou les pertes de chaleur.

Toutes les connaissances nécessaires à la création d'un réseau de chaleur renouvelable sont disponibles. Les éléments manquants sont plutôt les zones dans lesquelles des réseaux doivent être créés. Actuellement, les clients potentiels désirant se chauffer avec une source renouvelable contactent les ingénieurs pour prévoir un réseau thermique et évaluer les possibilités de raccordement. De cette façon, de nouveaux réseaux se créent mais ne sont néanmoins pas optimaux ¹³. En commençant par chercher la zone en premier et en ciblant indirectement les clients, il est possible de créer les réseaux de manière optimale en fonction des besoins des bâtiments. Cette approche devrait permettre de raccorder les plus gros consommateurs d'énergie à un réseau de chaleur à distance renouvelable.

La recherche de zones propices permet de s'intéresser en premier lieu aux réseaux thermiques qui sont les plus faciles à mettre en place. Un grand nombre de réseaux peut donc être créé en peu de temps, facilitant la transition énergétique.

12. Cela n'a encore été fait.

13. Ils sont construits pour alimenter les clients à l'origine de la demande en premier lieu et parfois ils s'étendent vers d'autres clients se situant à proximité.

CHAPITRE 3

OBJECTIFS

Les recherches scientifiques faites jusqu'à ce jour ont permis de trouver des sources de chaleurs pour les réseaux thermiques et de les quantifier. Certaines personnes ont travaillé sur l'optimisation technique des réseaux, telle que la recherche du meilleur tracé de conduites. La partie manquante dans ces recherches est le choix des zones où il faut créer les réseaux thermiques. Cette recherche de zones propices aux réseaux CAD est le coeur de cette étude.

Ce projet de Master s'intègre dans la suite de l'étude *Perspectives chaleur* du canton de Vaud [3]. L'étude a mis en évidence les zones qui, en 2035, auront une forte demande en chaleur¹. Parallèlement, l'étude a fait l'inventaire des sources de chaleurs renouvelables disponibles dans le canton et les a réparties par aire géographique. Malheureusement, cette étude n'a pas pu améliorer la précision des zones propices au développement des réseaux thermiques. Actuellement, la dimension des zones est trop importante pour envisager une étude de faisabilité de CAD sur toutes ces surfaces. La figure 3.1 sur la page suivante montre les zones propices aux réseaux de chaleur à distance en 2035.

La région lausannoise est recouverte de mailles propices au développement de CAD, mais la création d'un CAD sur toute l'agglomération est actuellement utopique. Un très grand nombre de contraintes techniques, économiques et légales n'ont pas été considérées dans l'étude *Perspectives chaleur*. De ce fait, le potentiel de développement du CAD est largement surestimé.

La suite de l'étude *Perspectives chaleur* consiste à affiner la recherche de zones propices en ajoutant des contraintes dans la modélisation. L'objectif est, dans un premier temps, de trouver des zones précises exemptes de potentiels problèmes, et, dans un second temps, de conduire un prédimensionnement de réseaux thermiques pour valider la faisabilité technico-économique du projet.

Ces résultats permettraient de prendre les devants sur les clients et de créer en priorité les réseaux thermiques dans les meilleures zones du canton. La priorisation de certaines zones permettrait ainsi d'accélérer la transition énergétique en créant un grand nombre de réseaux thermiques renouvelables en un court laps de temps. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes liées à l'intégration des réseaux thermiques dans la modélisation, ce qui permettra de définir plus correctement les zones propices, au risque d'une plus grande fragmentation.

1. Une "forte demande" se définit par une demande de plus de 800 MWh/ha/an dans ce travail

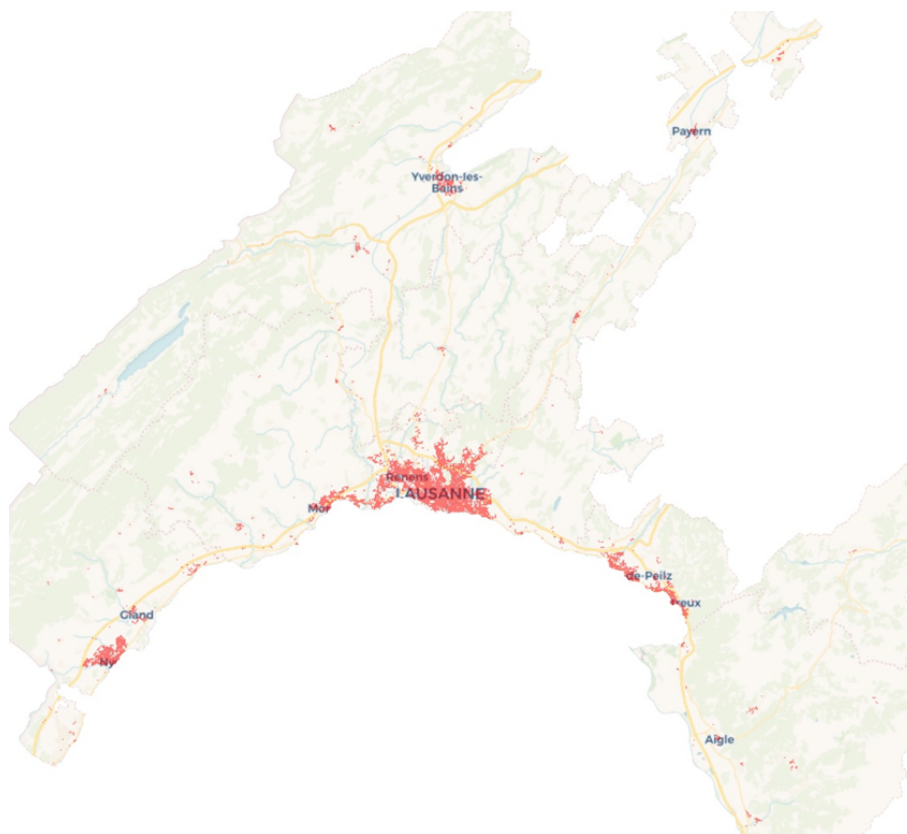


FIGURE 3.1 – Zones propices aux réseaux thermiques (mailles hectométriques en rouge) selon les besoins projetés pour 2035 et un seuil minimal de besoin en chaleur fixé à 800 MWh/ha/an [3].

Les étapes principales de ce projet sont les suivantes :

- Comprendre l'élaboration de l'étude *Perspectives chaleur*.
- Estimer la demande en chaleur des bâtiments en 2035.
- Définir les contraintes de réalisation des réseaux thermiques qui sont modélisables.
- Redimensionner les zones de réseaux thermiques potentiels en fonction des nouvelles contraintes.
- Analyser les résultats obtenus et proposer un nombre réduit de zones propices.

Une fois les étapes ci-dessus effectuées, les zones ciblées avec un fort potentiel de création de réseaux thermiques seront analysées plus en détails. Il faut néanmoins noter que les contraintes sont légales, techniques ou économiques, et sont susceptibles d'évoluer dans le temps en fonction des progrès techniques et de l'évolution du tarif de l'énergie.

Une zone est propice à un réseau thermique s'il est possible de vendre son énergie à un tarif rentable. Le prix de rentabilité d'un kilowattheure (kWh) dépend de la somme qu'un client est prêt à déboursier pour se fournir en énergie renouvelable. Dans la pratique, ce dernier est prêt à payer légèrement plus cher pour de l'énergie renouvelable par rapport au prix de l'énergie fossile, et le prix du kWh renouvelable dépend donc directement de ce dernier.

Les coûts d'un réseau thermique renouvelable sont principalement des coûts fixes liés à sa construction. L'augmentation du prix de l'énergie fossile permet de créer des réseaux thermiques plus onéreux tout en restant rentables. Pour cette raison, une partie des contraintes économiques disparaîtront dans les années à venir.

L'outil développé doit permettre de générer plusieurs scénarios où les contraintes à prendre en compte dans la modélisation peuvent être sélectionnées. Le format de l'outil sera une série de codes en Python fonctionnant avec des géodonnées.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie utilisée dans le cadre de ce projet, et décrite ci-dessous, peut s'appliquer à une multitude de cas. Cependant, un cas d'étude précis est nécessaire afin de pouvoir la valider et d'analyser les résultats. Les deux premières sections de ce chapitre (Section 4.1 et Section 4.2) expliquent le choix de la zone d'étude et sa temporalité. Elles sont suivies par une présentation des données sur les sources de chaleur (Section 4.3), et par l'estimation des besoins en chaleur à l'horizon 2035 (Section 4.4). Les contraintes intégrées dans le modèle et le principe de l'algorithme de calcul sont introduits dans les dernières sections (Section 4.5 et Section 4.6) de ce chapitre.

4.1 PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

L'idée initiale du projet était d'étudier toute la Suisse car l'algorithme utilisé est le même, indépendamment du périmètre étudié. Cependant, il s'est avéré que la collecte de géodonnées serait problématique car elles ne sont pas harmonisées au niveau fédéral. De ce fait, leur format et même leur existence dépend des cantons. Par exemple, les données énergétiques des bâtiments sont cantonales, mais tous les cantons ne possèdent pas de cadastre énergétique, et ces derniers n'ont pas été établis selon la même démarche. Il en résulte que la mise en commun des données et leur harmonisation aurait été trop chronophage dans le cadre de ce projet. De surcroît, le temps de calcul est également un facteur limitant dans ce projet. En fonction des données choisies (la zone de couverture et/ou la résolution des données), certains calculs a priori simples peuvent durer plusieurs heures et/ou dépassent la limite de calcul tolérée par les logiciels utilisés.

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, l'étude s'est limitée au canton de Vaud. Ce canton est jugé représentatif de la Suisse au vu de la diversité des zones, tant urbaines (ville et villages) que rurales et montagneuses (campagne, lacs, vallées et montagnes). De plus, le sol du canton de Vaud est très varié et représente bien les différents types de sols présents en Suisse [29].

Une suite de ce projet pourrait consister à récolter les données de toute la Suisse et les harmoniser afin de les utiliser dans l'outil SIG développé.

4.2 HORIZON DE L'ÉTUDE

Ce projet a comme objectif d'accélérer la création de réseaux thermiques renouvelables dans un futur proche. Le temps de réalisation d'un réseau, depuis son idée et sa mise en service, dure en général entre 2 et 10 ans, en fonction de la complexité du réseau. L'horizon choisi est celui de 2035 : cela correspond à un futur jugé proche au vu des plans de décarbonation de la confédération, mais suffisamment éloigné pour que le développement des réseaux thermiques soit conséquent.

Dans un premier temps, le modèle a été développé pour les données existantes qui correspondent à l'année 2020. Une fois le modèle mis en place, une estimation des consommations futures a été réalisée. Les données produites ont été utilisées dans l'outil développé afin d'obtenir les zones propices aux réseaux thermiques pour l'horizon 2035.

4.3 SOURCES DE CHALEUR

Les sources de chaleur pour les réseaux thermiques sont nombreuses et le choix d'une source plutôt que d'une autre dépend des conditions spécifiques de chaque réseau. Dans ce travail, seules les technologies éprouvées, c'est-à-dire matures et déployées commercialement, sont retenues. Cela garantit l'utilisation des ressources au moment où les projets seront réalisés.

Les différentes sources de chaleur retenues dans l'étude *Perspectives chaleur* et reprises dans ce projet sont les suivantes :

- Les aquifères à moyenne profondeur
- Les nappes phréatiques
- L'eau des lacs
- Les STEP et les rejets thermiques industriels
- Le bois énergie
- L'aérothermie
- Le biogaz
- Le solaire thermique

Ces sources ont été divisées en deux groupes : celles dites "situationnelles", qui ne peuvent pas être déplacées, et celles dites "non-situationnelles", qui sont utilisables n'importe où sur le territoire.

Les sources situationnelles sont valorisées en priorité afin de laisser les sources non-situationnelles pour les zones dépourvues de sources.

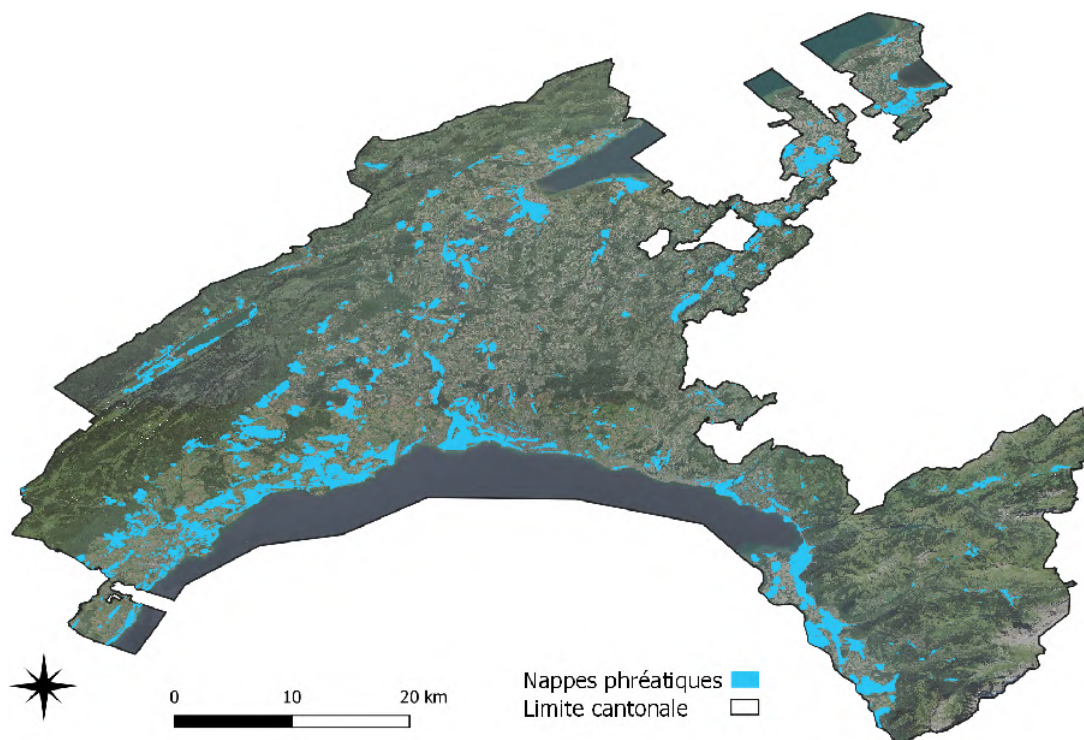
La combustion des déchets est une très bonne source de chaleur qui n'est pas considérée dans cette étude car elle est déjà largement exploitée et son potentiel restant est faible.

4.3.1 LES AQUIFÈRES À MOYENNE PROFONDEUR

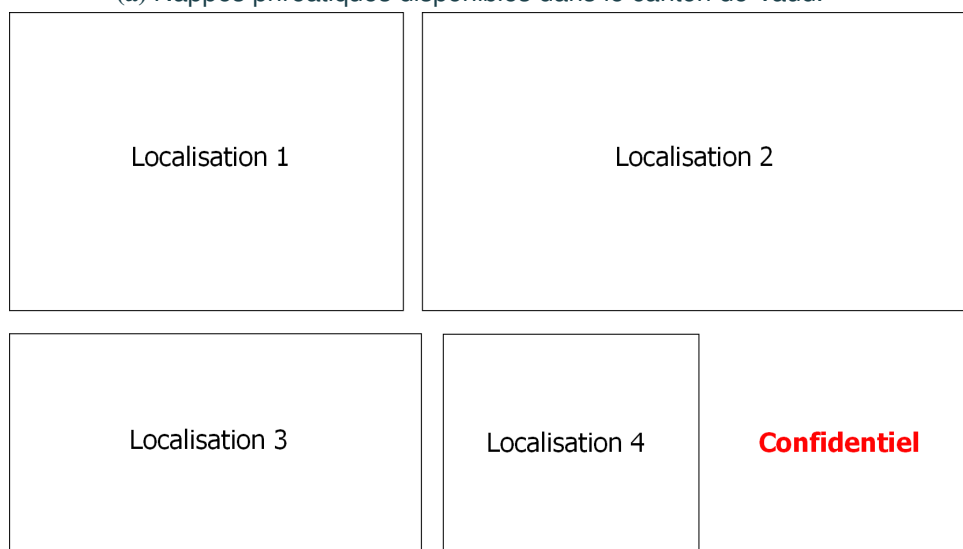
L'aquifère du Malm, celui considéré comme étant le plus prometteur dans le canton de Vaud, est l'unique aquifère considéré dans cette étude. Le potentiel géothermique provient d'une étude de CSD [30]. Plusieurs zones de forages ont été choisies dans le canton et le potentiel de chaque forage a été évalué dans l'étude. La donnée de base provient du portail géographique du canton de Vaud [31].

4.3.2 LES NAPPES PHRÉATIQUES

Le potentiel des nappes phréatiques provient des géodonnées sur la géothermie créé par la DIREN. Le potentiel de chaleur provenant des nappes phréatiques est estimé avec l'utilisation de pompes à chaleur ayant un COP de 4¹ [5]. L'énergie valorisable de chaque nappe est déterminée en fonction du nombre de captages réalisables dans la nappe et de leur puissance. La donnée de base provient du portail géographique du canton de Vaud [32].



(a) Nappes phréatiques disponibles dans le canton de Vaud.



(b) Nappes phréatiques dans quatre régions intéressantes

FIGURE 4.1 – Modélisation des sources de chaleur provenant des nappes phréatiques.

1. Valeur calculée selon la température de la source, celle à fournir par la PAC et le rendement typique de la machine.

4.3.3 L'EAU DES LACS

Le canton de Vaud possède des rives aux bords de trois "grands" lacs : le Léman, le lac de Neuchâtel et celui de Morat. Seul le Léman a été retenu par l'étude *Perspectives chaleur* car les abords vaudois des lacs de Neuchâtel et de Morat ont été jugés incompatibles. En effet, ces derniers ne disposent pas de strates d'eau à une température propices aux réseaux CAD.

Le potentiel maximal du lac Léman a été estimé et l'énergie a été répartie sur les mailles correspondantes à proximité des captages potentiels dans le cas de l'étude *Perspectives chaleur*.

Les paramètres de l'étude *Perspectives chaleur* ont été conservés mais l'attribution de l'énergie à des mailles données est différente car la recherche de zones propices est différente. La zone pouvant être approvisionnée par la chaleur récupérée de l'eau du lac a été calculée en fonction de la bathymétrie du lac, de la température de l'eau, de la distance maximale de la conduite lacustre et de la distance maximale d'approvisionnement sur terre. Le résultat se trouve sur la figure 4.2 ci-dessous.

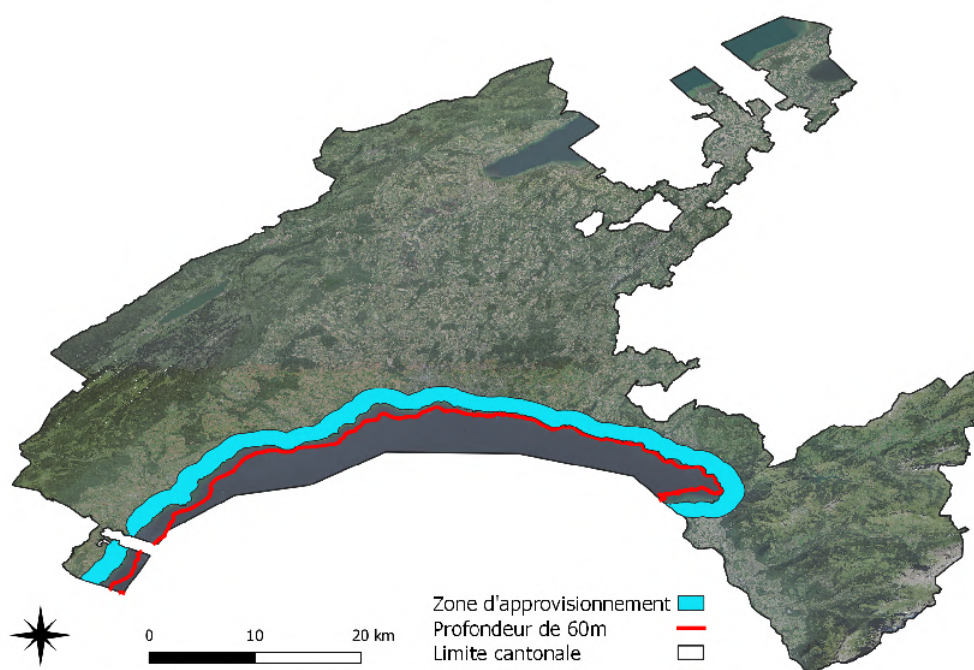


FIGURE 4.2 – Zone d'approvisionnement (bleu clair) possible avec CAD en utilisant le Léman comme source de chaleur. La ligne rouge montre la profondeur de 60m dans le lac.

Selon l'étude *Perspectives chaleur*, il est possible d'installer un captage chaque kilomètre lorsqu'il n'y a pas d'ouvrage déjà existant. Le débit maximal de pompage est de 361 l/s et il est possible de diminuer la température de l'eau de 4K. La puissance froide maximale est 6 MW. L'utilisation d'une PAC ayant un COP de 3 permet de fournir 9 MW de chaleur dans les conduites chaudes.

L'exclusion du lac de Neuchâtel à cause de ses températures est toutefois en contradiction avec une précédente étude des réseaux CAD dans la région des Trois lacs [33].

Il n'existe pas de critère fixe pour déterminer si une source d'eau est une bonne source de chaleur revalorisable dans un réseau CAD. Il est généralement souhaité que la température de l'eau pompée se situe durant toute l'année entre 5 et 10°C. Cette zone doit être suffisamment profonde pour éviter la prolifération de moules sur la crépine et dans la conduite de captage. En même temps, elle ne doit pas être trop éloignée des rives en raison de l'installation de conduites. De longues conduites mèneraient à un coût d'investissement plus élevé. Cependant, une limite maximale de 1000 m constitue une bonne base pour la recherche potentielle de zones de captage. En fonction des critères ci-dessus, les zones pouvant théoriquement être alimentées en chaleur par l'eau du lac sont définies.

L'étude de la température de l'eau du lac de Neuchâtel, en fonction de la profondeur, sur une période de 15 ans, est retranscrite dans le graphique ci-dessous.

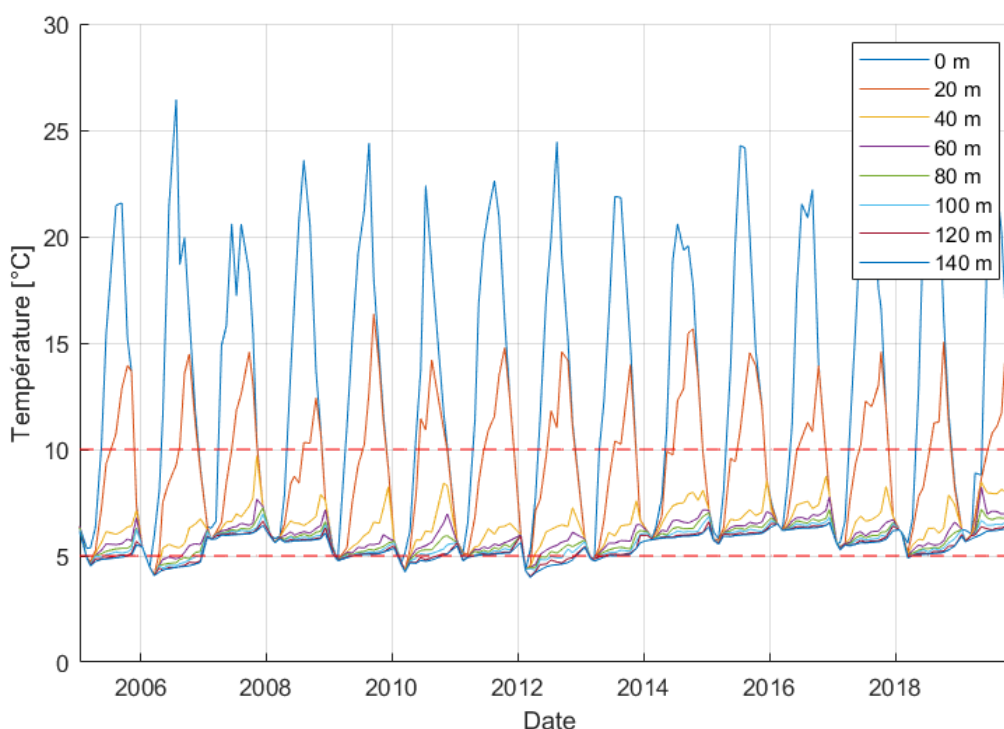


FIGURE 4.3 – Variation de la température de l'eau du lac Neuchâtel au cours du temps ainsi qu'en fonction de la profondeur. Source des données du graphique [34]

Une profondeur minimale de 40m est requise pour garantir une température de l'eau annuelle se situant entre 5 et 10°C.

L'étude la bathymétrie du lac de Neuchâtel permet de trouver l'isoligne de 40m de profondeur. En fonction de cette ligne, il est possible de déterminer les berges du lac se situant à distance maximale de 1000m d'une zone de captage.

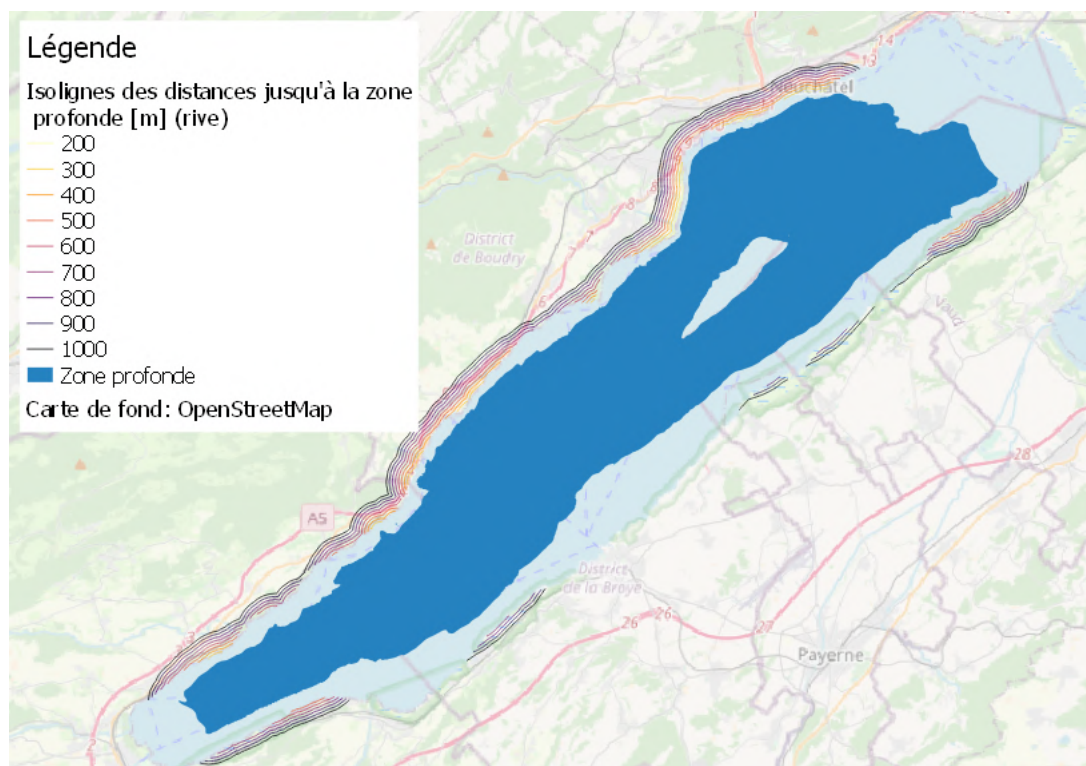


FIGURE 4.4 – Isolignes des distances de captage depuis la zone profonde (40m ou plus) [33].

La figure 4.4 montre que, dans le canton de Vaud, l'eau du lac de Neuchâtel, provenant des zones autour d'Yvonand ainsi qu'entre Grandson et Concise, pourrait être utilisée pour alimenter en chaleur un réseau thermique.

4.3.4 STEP ET REJETS THERMIQUES INDUSTRIELS

Les STEP, et plus généralement les rejets thermiques des industries, sont des sources d'énergies valorisables dans des CAD.

D'ici 2035, 16 STEP devraient récolter les eaux usées de 88% des équivalents habitants du canton de Vaud. L'énergie présente dans les eaux des STEP est revalorisée en utilisant une PAC ayant un COP de 3.5^2 [5]. Les données de base proviennent du canton [35].

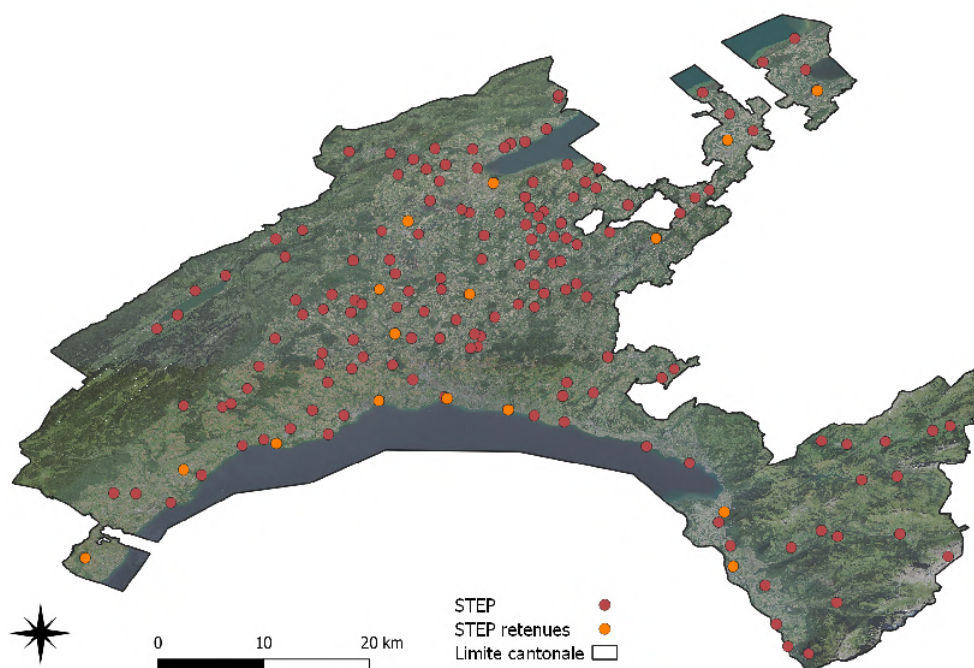


FIGURE 4.5 – Représentation géographique des STEP dans le canton de Vaud. Les points oranges sont les STEP retenues pour la revalorisation de la chaleur en 2035.

La DIREN a des informations sur les rejets thermiques de certaines industries. Après analyse des données, seul quatre sites avec plus de 4 GWh/an de rejets thermiques ont été retenus. Les données de base proviennent du canton de Vaud [36].

2. Valeur calculée selon la température de la source, celle à fournir par la PAC et le rendement typique de la machine.

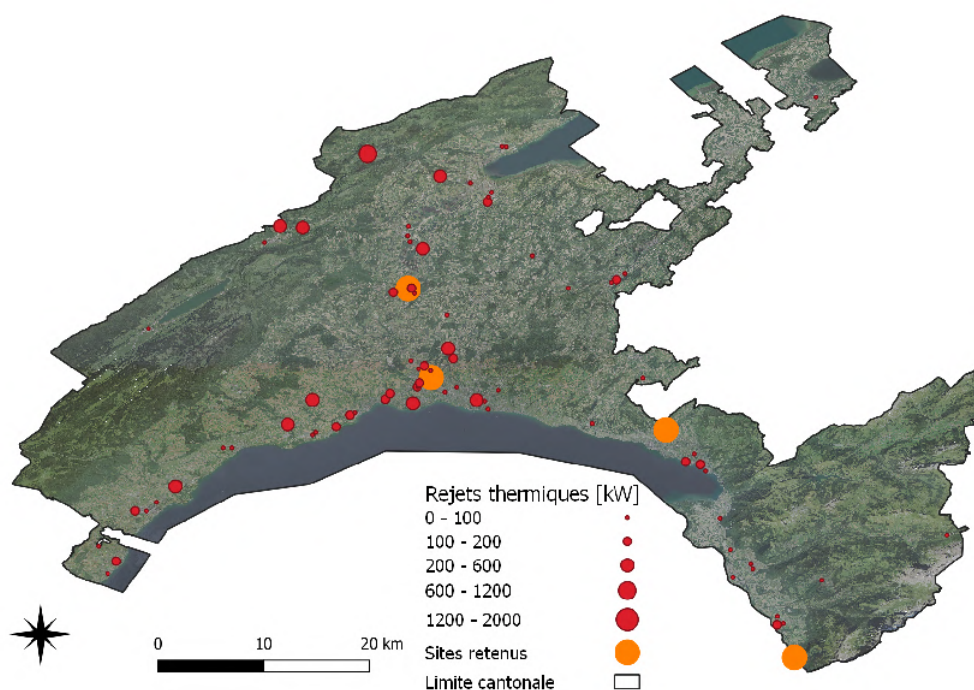


FIGURE 4.6 – Rejets thermiques disponibles dans le canton de Vaud, sans les STEP.

L'énergie valorisable des STEP et des rejets thermiques est répartie sur les mailles aux alentours de la source selon la démarche expliquée dans l'étude *Perspectives chaleur*.

Tel qu'expliqué dans l'état de l'art (chapitre 2), la valorisation des rejets thermiques (chaleur fatale) provenant des industries est prometteuse d'une perspective énergétique, mais constitue une source non garantie pour le réseau. En effet, le réseau thermique est prévu pour une période de 40 à 50 ans, période durant laquelle les activités des entreprises peuvent fortement changer, voire même disparaître.

La chaleur provenant d'une STEP est une source plus sûre car le traitement de l'eau est obligatoire et il est très compliqué de délocaliser une STEP.

Les centrales nucléaires ne sont pas considérées comme sources de chaleur car elles seront démantelées dans un proche avenir (elles seront toutes arrêtées d'ici 2035), soit dans moins de 40 ans, ce qui est la durée de vie d'un réseau thermique.

Dans le cas d'étude concernant le canton de Vaud, il n'y a pas de centrale nucléaire.

4.3.5 RESSOURCES NON-SITUATIONNELLES

Les ressources d'énergie suivantes sont dites "non-situationnelles" car elles sont utilisables partout, soit parce qu'elles sont disponibles partout (par exemple l'air ou le soleil), soit parce qu'elles sont transportables (par exemple le bois).

LE BOIS ÉNERGIE

Le bois énergie est une ressource dite non-situationnelle car elle est transportable. Cette ressource a été évaluée dans la Stratégie bois-énergie du canton de Vaud [37], qui vise une exploitation durable des forêts locales. Pour cela, les ressources de bois ont été classées par type d'utilisation.

L'avantage du bois énergie, en plus d'être transportable, est qu'il peut être converti en chaleur à haute température, par exemple dans des chaudières. Les besoins de chaleur en haute température proviennent principalement des procédés industriels. Il a été estimé que le bois énergie peut couvrir 50% de ces besoins, le reste nécessitant une température supérieure à celle pouvant être atteinte avec des chaudières bois, et d'autres combustibles sont alors nécessaires.

Une chaudière à bois a une tolérance vis-à-vis des variations de puissance et permet de couvrir des variations de demande avec un certain temps de latence. Le bois est également utilisé pour fournir l'énergie manquante dans certaines zones propices aux réseaux thermiques ayant peu de sources d'énergie.

Le principal défaut du bois est le rejet de particules fines dans l'atmosphère. L'installation de chaudières à bois aux endroits où le taux de particules fines est déjà élevé est problématique, voire interdit.

Finalement, une partie du bois est conservée pour être valorisée dans les zones non-propices aux réseaux thermiques, comme celles se situant à plus de 1000m d'altitude.

L'AÉROTHERMIE

L'aérothermie est la valorisation de la chaleur présente dans l'air à l'aide d'une PAC (air-air ou air-eau). Cette source est théoriquement présente partout, mais elle a un meilleur rendement là où la température de l'air reste principalement positive sur l'année (par simplification, en dessous de 1000m d'altitude).

LE BIOGAZ

L'estimation du potentiel de biogaz dans le canton a été calculée dans la CoCEn [4]. Le biogaz est actuellement peu utilisé (21 GWh/an sont actuellement utilisés sur un potentiel estimé à 72 GWh/an), mais, ayant une composition chimique similaire à celle du gaz naturel, peut le remplacer pour les mêmes usages.

LE SOLAIRE THERMIQUE

L'estimation du potentiel du solaire thermique provient de la CoCEn [4]. Actuellement, cette énergie est très peu exploitée (7 GWh/an sur un potentiel de 600 GWh/an). Malheureusement, le solaire thermique a plusieurs désavantages comme expliqué dans le paragraphe 2.2.9.

4.4 BESOINS EN CHALEUR

Les besoins en chaleur qui sont pris en considération dans ce travail sont les besoins des bâtiments pour l'eau chaude sanitaire, pour le chauffage et pour des applications industrielles³.

4.4.1 BESOINS ACTUELS

Les besoins en chauffage et eau chaude sanitaire des bâtiments qui sont dits "actuels" correspondent aux valeurs de l'année 2020. Les données proviennent du cadastre des bâtiments avec les besoins thermiques donnés par bâtiment⁴, identifié avec le numéro EGID. Différentes corrections ont été apportées à cette couche suite à quelques erreurs de la part du canton sur des calculs de surface.

Les données sur le type de chauffage et sur la puissance d'une installation n'ont pas pu être utilisées pour les raisons suivantes.

Premièrement, la puissance d'une installation ne reflète pas la puissance de chauffage utile car les installations sont souvent surdimensionnées, pour prendre en compte des marges en puissance. Deuxièmement, les informations sur le type de chauffage et l'agent énergétique ne sont pas fiables. Ces données proviennent souvent des communes et il n'existe pas de standardisation concernant ces dernières. Certaines communes ont des données à jour, d'autres ont des données non mises à jour et certaines communes n'en possèdent pas. Enfin, tous les propriétaires ne suivent pas les procédures de rénovation de chaudières et ne communiquent donc pas les changements de chauffage.

4.4.2 PRÉDICTIONS DES BESOINS EN CHALEUR À L'HORIZON 2035

Le calcul des besoins thermiques en 2035 se base principalement sur les données de 2020, sur le taux de rénovation ainsi que sur les nouvelles constructions attendues d'ici 2035.

Le taux de rénovation annuel des bâtiments est de 1.2%⁵. Dans ce projet, cela signifie que chaque année 1.2% de la SRE du canton de Vaud est rénovée. Les besoins thermiques sont séparés en deux parties, ceux pour le chauffage et ceux pour l'ECS. Les rénovations ne concernent que le chauffage. Les besoins en ECS sont liés au nombre d'habitants et ne devraient pas changer au cours du temps.

Les nouveaux besoins en chauffage sont calculés à partir de la norme SIA 380/1 de 2016, Standard Minergie rénovation, avec une consommation estimée à 46.5 kWh/m²/an de SRE. Cette valeur est utilisée pour calculer la consommation des bâtiments rénovés.

Le choix des bâtiments rénovés est problématique car il est impossible de savoir quel bâtiment sera rénové et en quelle année. La seule information connue est que chaque année 1.2% de la SRE cantonale est rénovée. Deux solutions sont possibles pour choisir les bâtiments à rénover :

1. Choisir pour chaque année aléatoirement des bâtiments à rénover jusqu'à obtenir une somme de SRE correspondant à 1.2% de la SRE cantonale.
2. Rénover fictivement chaque année 1.2% de la SRE de chaque bâtiment du canton.

La 2^{ème} option est choisie car elle ne contient pas de facteurs aléatoires et représente l'ensemble de toutes les possibilités de la 1^{ère} option.

3. A condition qu'elles aient été renseignées auprès du canton.

4. La couche vectorielle des besoins thermiques à l'hectare [38] n'a pas été utilisée car elle ne permet pas d'attribuer les besoins à des parties de mailles après une découpe

5. Cette valeur provient des constatations du canton de Vaud. Elle est également choisie pour être en accord avec les objectifs de la CoCEn 2030. Elle pourrait être légèrement plus élevée, ce qui aurait comme effet de diminuer les besoins thermiques en 2035.

Le taux de rénovation des bâtiments pourrait augmenter dans le futur afin d'atteindre les objectifs de la Stratégie énergétique 2050. Selon les estimations de Stefano Bolzano [39], le taux devrait être de 1.4%. Cette valeur n'est pas utilisée ici car le but est de refléter au mieux la réalité et non une situation idéale.

La méthode utilisée pour connaître la consommation future des bâtiments en 2035 est schématisée ci-dessous dans la figure 4.7.

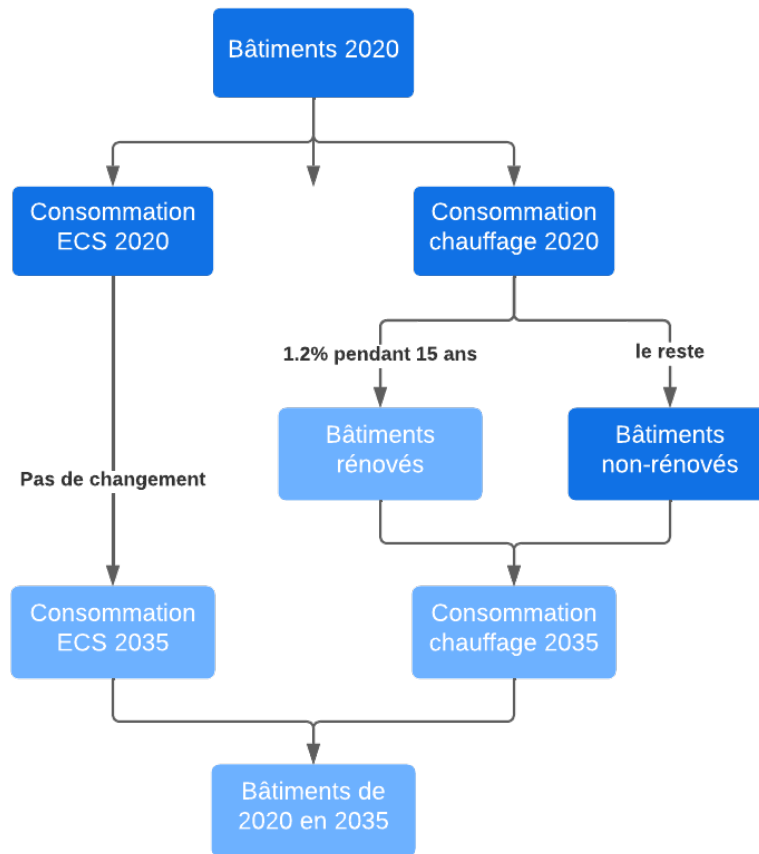


FIGURE 4.7 – Schéma de la méthode utilisée pour estimer la diminution des besoins en chaleur des bâtiments d'ici 2035.

La nouvelle demande en chauffage pour les bâtiments rénovés se calcule selon la formule 4.1 provenant de la norme SIA 380/1.

$$Q_{H,li} = \left[Q_{H,li0} + \Delta Q_{H,li} \times \frac{A_{th}}{A_E} \right] \times f_{cor} \quad (4.1)$$

Avec :

$Q_{H,li}$: valeur limite du chauffage pour les bâtiments à construire [kWh/m²]

$Q_{H,li0}$: valeur de base de $Q_{H,li}$ [kWh/m²]

$\Delta Q_{H,li}$: accroissement de $Q_{H,li}$ [kWh/m²]

A_{th} : la surface de l'enveloppe thermique du bâtiment [m²]

A_E : la surface de référence énergétique du bâtiment (SRE) [m²]

f_{cor} : facteur de correction de la température [-]

La surface de l'enveloppe thermique d'un bâtiment est estimée par la formule suivante :

$$A_{th} = \sum_j A_{e,j} + \sum_k A_{u,k} + \sum_i A_{G,i} \quad (4.2)$$

Avec :

A_{th} : la surface de l'enveloppe thermique du bâtiment [m^2]

A_e : la surface en contact avec l'extérieur [m^2]

A_u : la surface contre des locaux non chauffés [m^2]

A_G : la surface en contact avec le terrain [m^2]

Les valeurs A_e , A_u et A_G ne font malheureusement pas partie des données fournies par le canton, mais, selon les études faites par le canton, le ratio A_{th}/A_E vaut 1.2.

Le facteur de correction n'est pas utilisé (donc estimé à 1) car la température moyenne du canton de Vaud est équivalente à celle utilisée comme température de référence.

Selon la norme SIA, la valeur $Q_{H,li0}$ pour une habitation collective vaut 13 kWh/m^2 et sa valeur d'accroissement $\Delta Q_{H,li}$ vaut 15 kWh/m^2 . En comparaison avec une habitation individuelle, il n'y a qu'une augmentation de 3 kWh/m^2 sur la valeur de base et pas de différence sur la valeur d'accroissement. La différence sur la valeur limite du chauffage est de 5.7%. Les valeurs retenues sont celles des habitations collectives car elles sont plus représentatives de l'ensemble du milieu bâti et rénové. De plus, des besoins en chauffage légèrement sous-estimés sont plus sécuritaires pour la création d'un chauffage en comparaison avec une surestimation des besoins.

Pour le calcul des besoins thermiques d'un bâtiment rénové la même formule que pour les bâtiments neufs (4.1) est utilisée, mais avec un facteur de correction.

$$Q_{H,li,re} = 1.5 \times Q_{H,li} \quad (4.3)$$

Avec :

$Q_{H,li,re}$: valeur limite du chauffage pour les bâtiments rénovés [kWh/m^2]

Les valeurs de besoins en chauffage pour les nouveaux bâtiments 4.4 et pour ceux rénovés 4.5 sont :

$$Q_{H,li} = [13 + 15 \times 1.2] \times 1 = 31 \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (4.4)$$

$$Q_{H,li,re} = 1.5 \times 31 = 46.5 \quad [\text{kWh/m}^2] \quad (4.5)$$

Les besoins de chaleur pour l'eau chaude sanitaire des habitations collectives valent quant à eux 21 kWh/m^2 .

La construction de nouveaux bâtiments est basée sur les prédictions d'augmentation de la population dans le canton⁶, les surfaces conductibles et la moyenne de SRE par personne.

L'estimation de l'augmentation démographique provient du rapport de la Commission de prospective du canton de Vaud [40]. Elle est, entre 2010 et 2040, à $+210'000$ habitants selon le scénario "moyen". Par interpolation linéaire, la différence entre 2020 et 2035 est de $105'000$ habitants.

6. Les prédictions sont également basées sur les plans d'aménagement du territoire

La norme SIA sur les besoins en chaleur pour le chauffage donne une valeur de référence de SRE allant de 40 à 60 m² de surface de plancher par personne selon le type d'habitation [41], et une valeur moyenne de 50 m² est retenue.

En fonction des deux valeurs mentionnées ci-dessus, l'augmentation de la SRE sur l'ensemble du canton de Vaud sera de 5'250'000 m² de SRE.

L'estimation des besoins thermiques par surface de SRE prédit un besoin de 278.25 GWh/an⁷.

L'attribution de surfaces pour les constructions suit les planifications d'urbanisation du canton. Celui-ci a planifié des surfaces de développement prioritaires dans le canton. Chaque surface prévue pour le développement du milieu bâti contient des informations des prédictions sur l'augmentation du nombre d'habitants et sur la destination des surfaces (logements, zone d'activité 1 et zone d'activité 2). Les nouvelles zones de constructions de ce projet considèrent les zones de logement et celles d'activités. La consommation d'une zone d'activité est liée aux types d'activités. Malheureusement, il est impossible de prévoir avec certitude l'entreprise qui s'installera sur une parcelle.

En fonction des informations trouvées dans les données du canton de Vaud et des estimations de besoins de chaleur pour le chauffage et l'ECS, les valeurs suivantes ont été utilisées pour estimer les besoins par m² de SRE.

	Logement	Activité 1	Activité 2
Chauffage [kWh/m ²]	31	31	310
ECS [kWh/m ²]	21	0	0

TABLE 4.1 – Densités des besoins en chaleur des différents types d'affectations présents dans les futures zones construites ou densifiées.

Les zones d'activité 2 représentent des zones avec une forte consommation de chaleur pour des activités très spécifiques. Cela ne concerne qu'une toute petite partie des nouvelles zones.

Afin de ne pas créer de zones d'activités propices aux réseaux thermiques de manière aléatoire, l'attribution des besoins sera moyennée sur toute la zone.

La somme des besoins de chaque type de zone (logement + activité 1 + activité 2) donne les besoins totaux de la zone d'urbanisation.

Chaque zone est découpée selon le quadrillage qui sera utilisé pour découper le canton de Vaud (cf. section 4.6). Le centroïde de chaque partie de la zone découpée représente un bâtiment fictif. La demande en chaleur est attribuée proportionnellement à sa surface.

Cette méthode permet de modéliser fictivement les bâtiments qui seront construits d'ici 2035. La création d'un seul bâtiment par maille suffit. S'il y en avait plusieurs, ils seraient agrégés par maille lors de la recherche de zones propices aux réseaux thermiques.

Cette méthode répartit uniformément les besoins sur toute la zone car on ne connaît pas les emplacements précis des futurs bâtiments. Dans la même logique que pour les bâtiments rénovés, la répartition uniforme est préférée aux choix aléatoires de bâtiments pour éviter de créer des mailles avec une forte densité en chaleur fictive.

7. Cette valeur est éloignée des prédictions de l'étude *Perspectives chaleur*. La valeur de 57 GWh/an supplémentaire est incohérente car elle donnerait une consommation de chaleur d'environ 8 kWh/m², soit une consommation très éloignée des estimations faites ci-dessus. Malheureusement les calculs effectués pour trouver cette valeur n'ont pas pu être retrouvés

La méthode utilisée pour connaître la consommation des bâtiments qui seront construits d'ici 2035 est schématisée ci-dessous dans la figure 4.8.

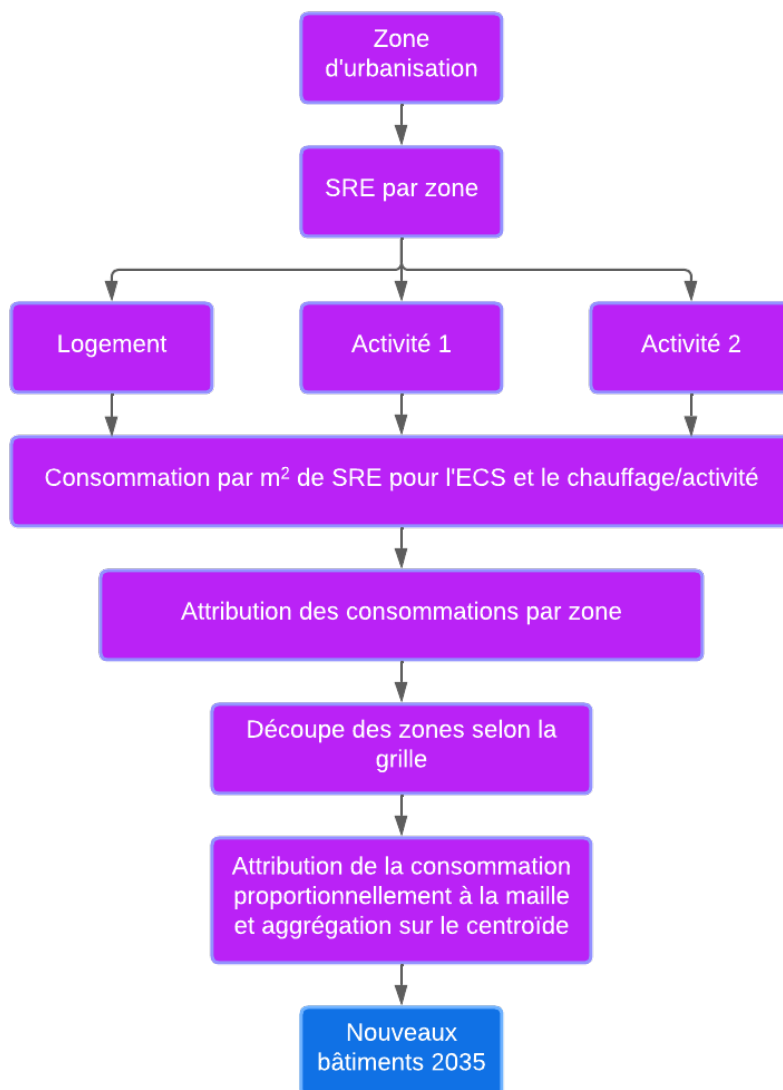


FIGURE 4.8 – Schéma de la méthode utilisée pour estimer les besoins en chaleur des nouveaux bâtiments qui seront construits d'ici 2035.

Le regroupement des bâtiments existants depuis 2020 (et rénovés) avec les nouveaux bâtiments construits permet d'obtenir le parc immobilier de 2035.

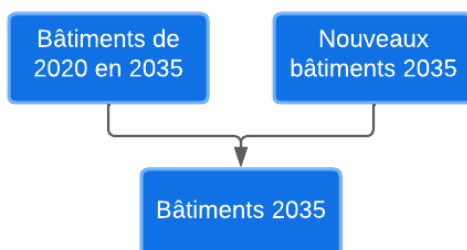


FIGURE 4.9 – Mise en commun des données des bâtiments en 2035.

4.5 CONTRAINTES AUX RÉSEAUX THERMIQUES

L'étude *Perspectives chaleur* ne s'est intéressée qu'aux sources d'énergie et à la densité des besoins pour définir les zones propices aux réseaux thermiques. Cette recherche est une simplification car elle omet une multitude de contraintes qui empêchent la mise en place d'un réseau. Ces contraintes sont classifiables dans trois catégories :

- Légale : la loi interdit la construction d'un réseau dans une zone précise.
- Technique : la construction d'un réseau est possible mais ne suit pas les bonnes pratiques.
- Financière : la construction d'un réseau est possible mais coûterait trop cher.

Dans les chapitres suivants, différentes contraintes sont présentées avec leurs localisations géographiques dans le canton de Vaud. La liste n'est pas exhaustive car elle nécessiterait un long travail sur le terrain pour cartographier toutes les contraintes, et ces dernières ne sont pas modélisables dans un outil SIG. Cette liste permet de réduire les zones propices afin de rétrécir les zones à analyser plus minutieusement.

4.5.1 PARCS NATIONAUX ET AUTRES SITES DE PROTECTION DE LA NATURE

La Suisse comprend plusieurs types de zones protégées afin de préserver l'environnement (espèces menacées, sites spécifiques, etc.). Les zones considérées sont les parcs nationaux⁸ [42], les réserves de biosphères⁹ [43], les sites de la Convention Ramsar [44], les districts francs [45], les sites de l'UNESCO¹⁰ [46], les réserves forestières [47], les sites Emeraude [48] et les sites de Pro Natura¹¹ [49], [50]. Il existe encore d'autres sites de protection dans lesquels le passage de conduites n'est pas désirable, mais la liste ci-dessus rassemble déjà la majorité des zones problématiques. Quelques cartes de ces zones protégées sont disponibles dans l'annexe B.

8. Il n'y a pas de parc national dans le canton de Vaud.

9. Il n'y a pas de réserve de biosphère dans le canton de Vaud.

10. Il n'y a pas de site de l'UNESCO dans le canton de Vaud.

11. Ces données ne sont pas disponibles en libre téléchargement.

4.5.2 L'INVENTAIRE FÉDÉRAL DES PAYSAGES ET DES MONUMENTS NATURELS

L'inventaire fédéral des paysages et des monuments naturels [51], abrégé IFP, est l'inventaire des objets d'importance nationale, et a été demandé via la loi sur la protection de la nature (LPN). Les objets sont jugés importants en raison de leurs particularités et de leur beauté.

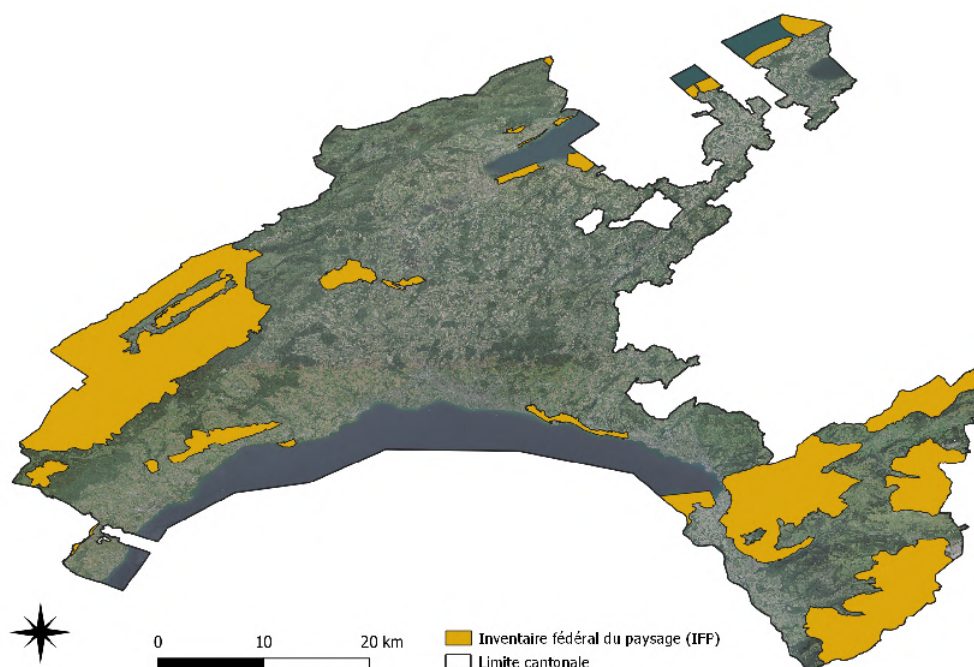


FIGURE 4.10 – Etendue des zones IFP dans le canton de Vaud.

La création d'un réseau thermique dans une zone IFP est possible mais compliquée [52]. Le paysage d'une zone IFP ne doit pas être impacté. Néanmoins, la création d'un réseau thermique nécessite souvent la construction d'au moins un bâtiment. Cette construction est possible uniquement si elle est prévue dans un objet de l'IFP. Dans ce cas, le bâtiment doit être inscrit dans le plan directeur d'implantation du canton, conformément à l'article 8 alinéa 2 de la LAT.

L'implantation d'un nouveau bâtiment va probablement altérer l'objet protégé (modification du paysage causée par l'ajout du bâtiment). Cependant, la construction d'un réseau thermique renouvelable constitue potentiellement l'accomplissement d'une tâche de la Confédération (art.2 LPN). De ce fait, une pesée des intérêts entre la protection d'un objet IFP et l'accomplissement d'une tâche de la Confédération sera nécessaire selon l'article 6 alinéa 2 de la LPN. L'expertise de la commission fédérale pour la protection du paysage définira si l'objet doit être conservé intact ou si la construction est possible tout en le ménageant.

En résumé, la construction d'un réseau thermique dans une zone IFP est généralement possible mais nécessite de longues procédures administratives. Les zones IFP sont exclues des zones propices car les démarches administratives sont trop chronophages et ne permettent pas la mise en place rapide de réseaux thermiques.

4.5.3 SITES MARÉCAGEUX

Les sites marécageux d'importance nationale ou étant d'une beauté particulière sont protégés par l'inventaire fédéral des sites marécageux [53]. Ces sites sont caractérisés par la présence de marais proches de l'état naturel, et abritent souvent des espèces végétales ou animales qui vivent uniquement dans ces marais.

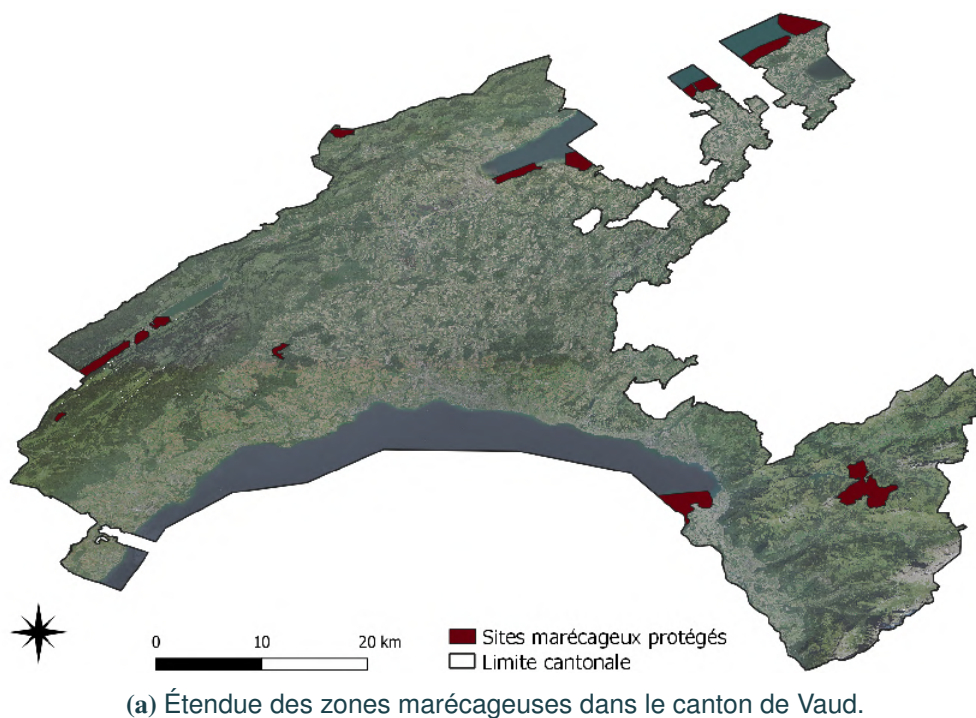


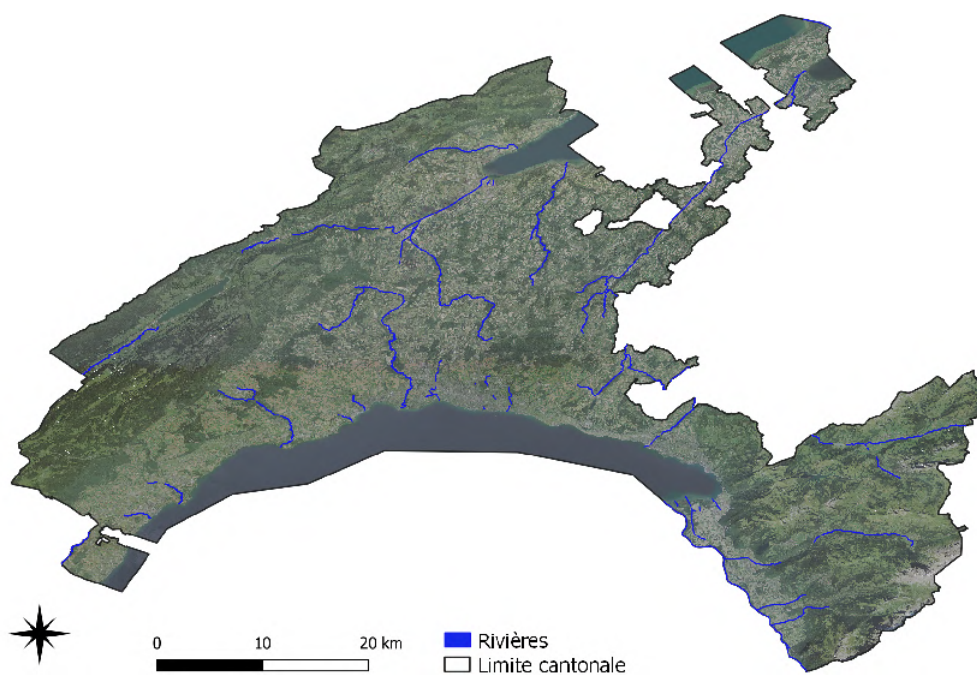
FIGURE 4.11 – Modélisation de la contrainte liée aux sites marécageux.

Le passage d'un réseau thermique dans ces sites nuirait aux milieux naturels. De plus, les travaux seraient techniquement compliqués à cause de la présence d'eau dans le sol. Pour ces raisons, les sites marécageux sont exclus des zones propices. Par ailleurs, la pose de conduites n'y est pas autorisée.

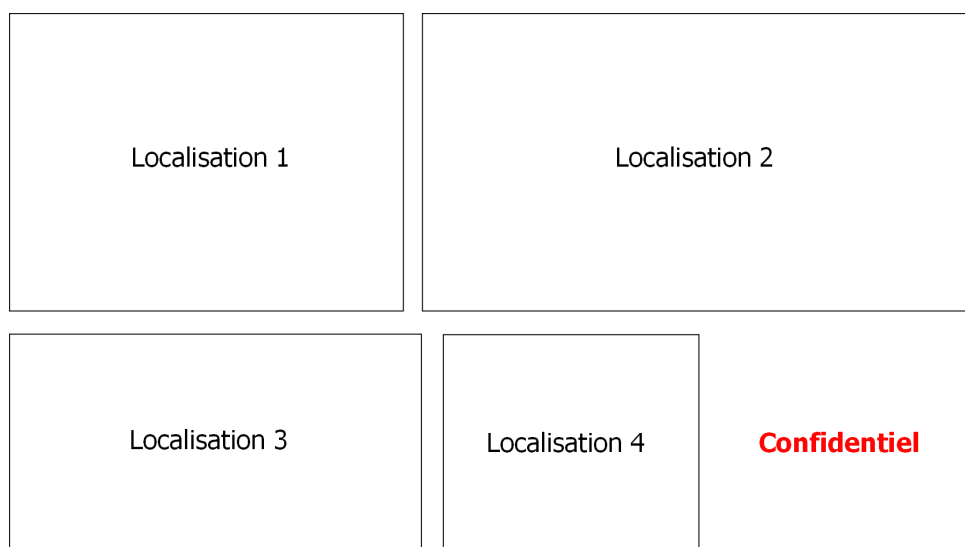
4.5.4 RIVIÈRES

Les rivières sont des obstacles au passage des conduites d'un réseau thermique. Au niveau du terrain, les rivières sont comme un fossé creuser dans le sol. Pour passer sous une rivière il est nécessaire de creuser profondément pour se retrouver sous le lit de la rivière. Une autre possibilité est de créer un pont pour la conduite ou de passer par un pont existant.

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, les rivières sont des obstacles pour les réseaux thermiques. La figure 4.12 ci-dessous montre l'emplacement des rivières problématiques.



(a) Les rivières dans le canton de Vaud.

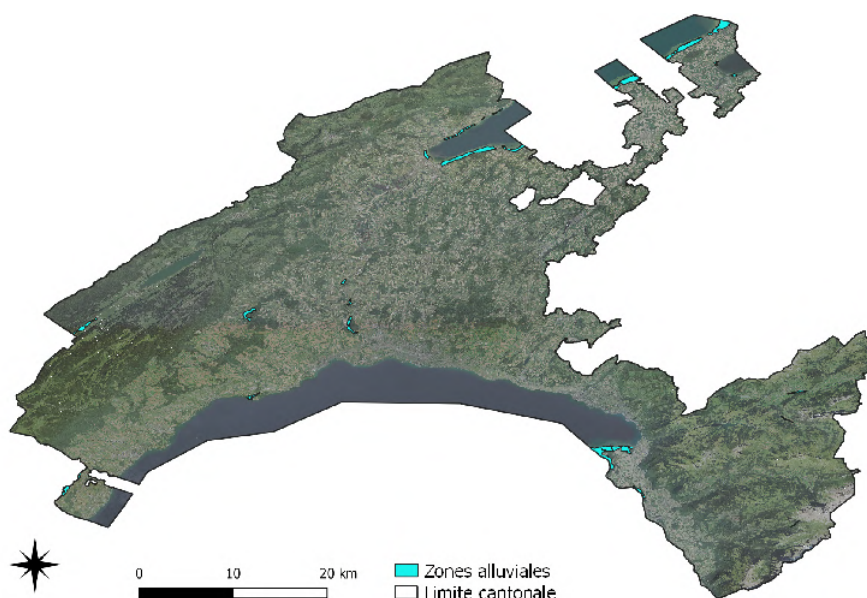


(b) Contrainte des rivières dans quatre régions intéressantes.

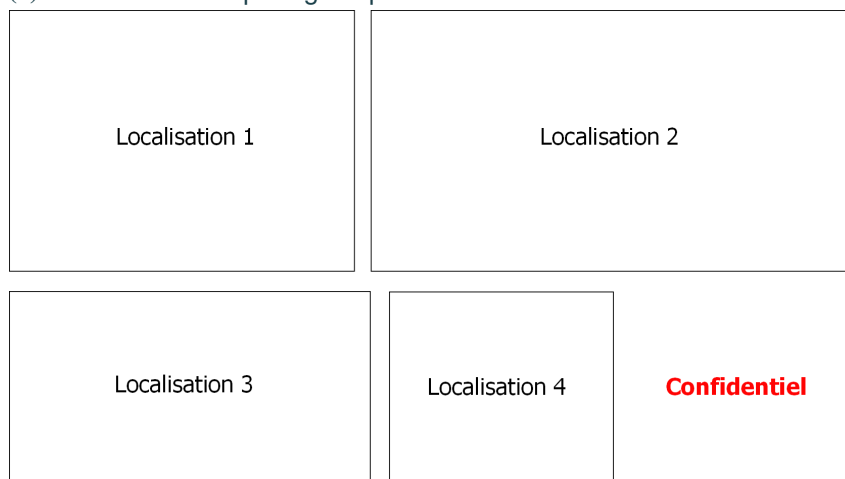
FIGURE 4.12 – Modélisation de la contrainte liée aux rivières.

4.5.5 ZONES ALLUVIALES

Les zones alluviales sont les zones aux bords des rivières et des lacs qui sont inondables. Elles ont la particularité d’être des biotopes naturels abritant beaucoup d’espèces de végétaux et d’animaux. Les biotopes de l’inventaire fédéral [54] sont protégés par l’ordonnance sur la protection de la nature et du paysage (OPN). La création d’un réseau thermique traversant ces zones n’est pas envisageable et la pose de conduites n’y est pas autorisée.



(a) Zones alluviales protégées par l’OPN dans le canton de Vaud.



(b) Les zones alluviales dans quatre régions intéressantes.

FIGURE 4.13 – Modélisation de la contrainte des zones alluviales.

L’inventaire des zones alluviales ne contient que celles protégées. Un deuxième inventaire contient les zones non encore bien définies [55] et qui seront protégées une fois acceptées dans l’inventaire "officiel". Un troisième inventaire contient le reste des zones alluviales qui ne figurent pas dans les deux autres inventaires [56]. Ces deux groupes de zones, bien que non protégées par une loi spécifique, sont également à éviter pour préserver les biotopes et pour ne pas avoir à creuser à proximité de rivières où la présence d’eau dans le sol est très probable.

4.5.6 RÉSEAUX THERMIQUES EXISTANTS

Les réseaux thermiques existants ont été répertoriés par l'OFEN [57], [58]. Les réseaux de cette base de données sont des chauffages de proximité, des chauffages à distance et des réseaux de froid à distance. Ils sont alimentés par tout type de sources, aussi bien fossiles que renouvelables. L'emprise des réseaux sur le territoire est inconnue car la géodonnée est sous forme de points. Une emprise approximative a été dessinée en fonction de l'agent énergétique disponible dans les données sur les bâtiments. L'agent énergétique n'étant pas toujours connu, il n'a pas été possible d'estimer l'emprise de tous les réseaux. Les surfaces des réseaux dont l'emprise est inconnue ont été estimées par un cercle qui contient les bâtiments qui devraient être raccordés.

Les bâtiments se trouvant dans une zone desservie par un réseau thermique ont peu de raisons de vouloir se raccorder à un nouveau réseau plutôt que celui déjà existant. De ce fait, les zones d'alimentation des réseaux existants sont exclues de la zone de recherche.

La figure 4.14 montre les réseaux thermiques connus dans le canton de Vaud avec leurs zones de dessertes estimées.

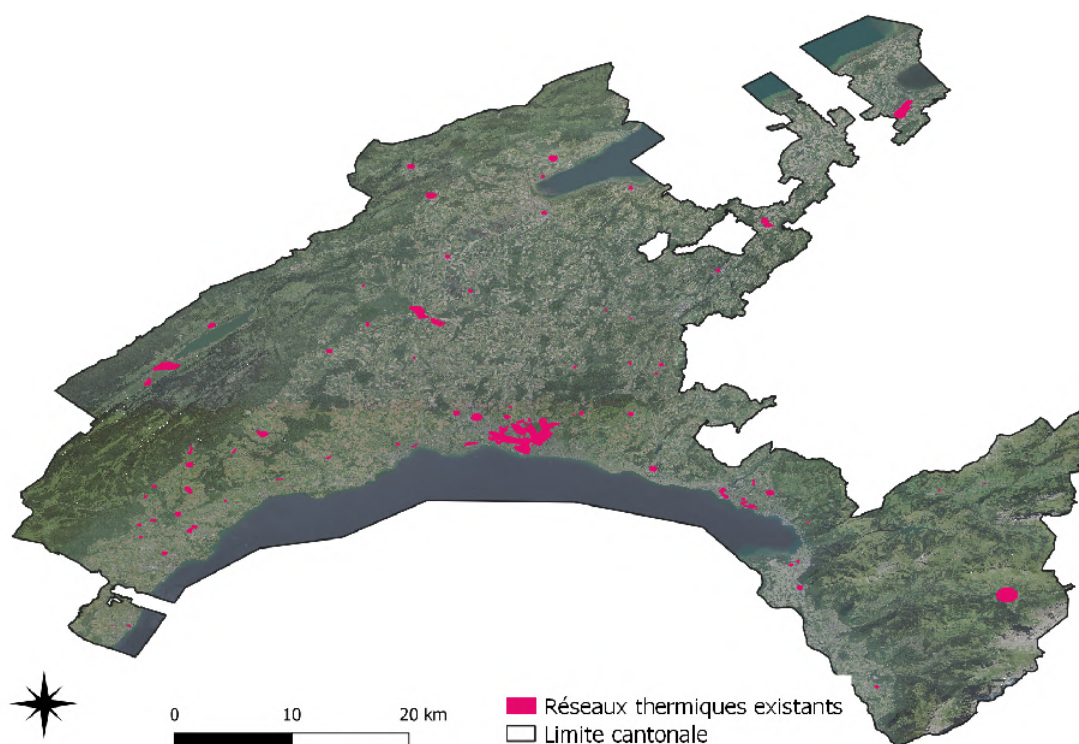


FIGURE 4.14 – Modélisation des réseaux thermiques connus dans le canton de Vaud.



FIGURE 4.15 – Les réseaux thermiques dans quatre régions intéressantes.

4.5.7 GLISSEMENTS DE TERRAIN, PERMANENTS ET SPONTANÉS

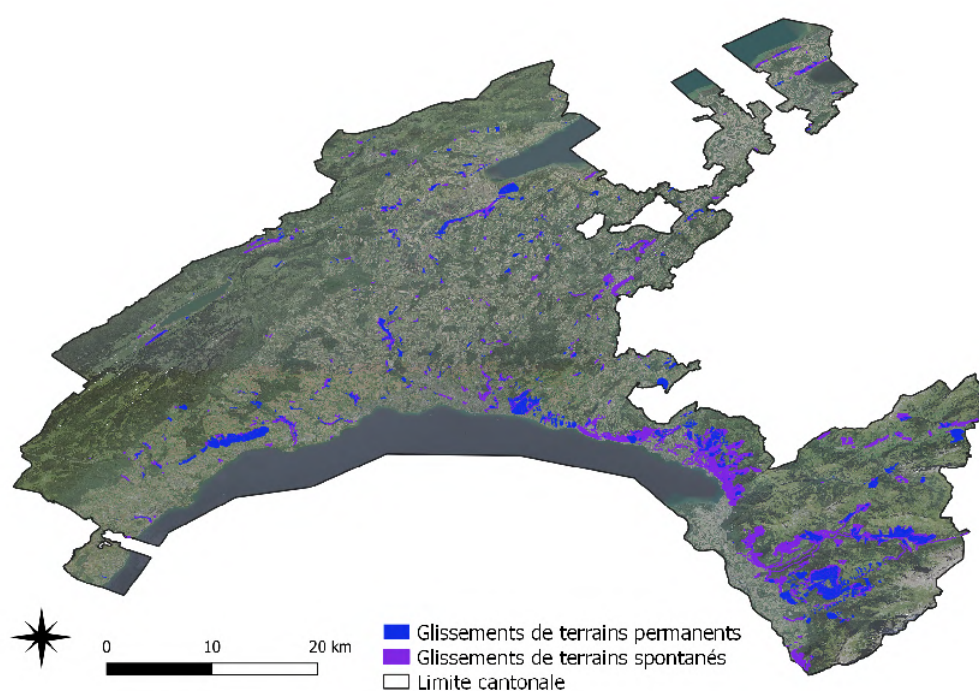
Les zones de glissement sont problématiques pour les conduites dans le sol car ces dernières peuvent se déformer et se casser. Les glissements de terrain sont divisés en deux groupes, les permanents et les spontanés. Des zones de glissement ont été étudiées par des bureaux d'ingénieurs et sont répertoriées sur le portail géographique du canton de Vaud [59]. Un niveau de risque est attribué à chaque zone :

- Danger élevé
- Danger moyen
- Danger faible
- Danger imprévisible (résiduel)
- Danger nul

Toutes les zones en danger nul sont éliminées d'office de la couche car l'étude du terrain a démontré que le danger était inexistant. Les zones de dangers imprévisibles sont sujettes à discussion quant au danger réel de glissement. Dans un premier temps, elles sont jugées comme étant problématiques. Si cette contrainte s'avérait trop restrictive lors de l'analyse des résultats, elles seront enlevées tout en gardant en tête ce danger imprévisible.

La même méthode est appliquée aux deux couches de glissements de terrain. Toutes les zones de glissement sont déduites des zones où pourrait se trouver un réseau thermique.

La figure 4.16 ci-dessous illustre la contrainte des glissements terrains permanents en bleu et celle des glissements spontanés en violet.



(a) Les zones de glissements de terrains problématiques dans le canton de Vaud.



(b) Les zones de glissements de terrain dans quatre régions intéressantes.

FIGURE 4.16 – Modélisation des contraintes liées aux glissements permanents et spontanés.

4.5.8 FORTES DÉCLIVITÉS

Les fortes déclivités et les ruptures de pentes (trous, gorges, gros talus, falaises, etc.) constituent des obstacles au passage des conduites dans le sol. Les fortes pentes créent des différences de pression dans le réseau. Ces différences doivent être comblées par l'utilisation de pompes plus puissantes, consommant plus d'énergie. Pour rappel, la puissance de la pompe est directement proportionnelle à la hauteur manométrique, qui dépend, entre autres, du dénivelé.

$$P = \rho g \dot{V} H \eta_{pompe}$$

P : puissance de la pompe [W]

ρ : masse volumique [kg/m^3]

g : gravité terrestre [m/s^2]

\dot{V} : débit volumique [m^3/s]

H : hauteur manométrique [mCE]

η_{pompe} : rendement de la pompe [-]

Avec la hauteur manométrique entre deux points dans une conduite qui se calcule selon l'équation suivante :

$$H = \Delta h + \Delta P_{tot} + \Delta P_{cond}$$

Δh : différence d'altitude réelle [mCE]

ΔP_{tot} : perte de charges totales [mCE]

ΔP_{cond} : différence de pression dans la conduite [mCE]

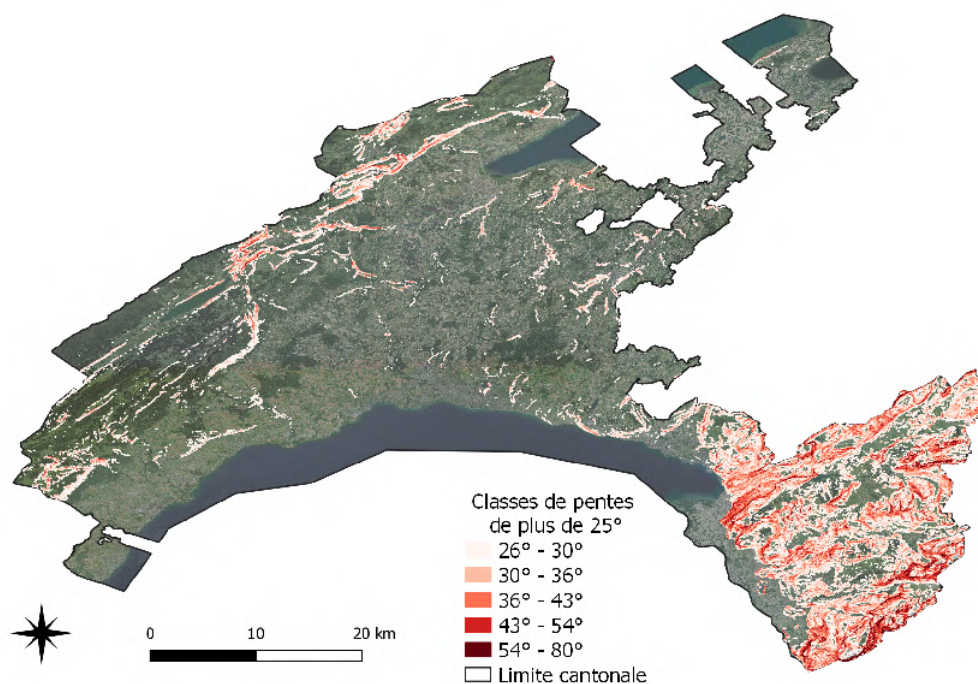
Afin de ne pas surdimensionner les pompes du réseau uniquement pour contrer le dénivelé, il est possible de créer des découplages hydrauliques avec des échangeurs de chaleur. Cela revient à créer plusieurs réseaux interconnectés par des échangeurs thermiques. L'interconnexion n'est pas modélisée dans le présent projet mais il serait envisageable de connecter deux réseaux proches géographiquement mais coupés par un obstacle.

Les falaises, les gorges, les gros talus, etc. sont des obstacles physiques aux conduites. La courbure des conduites selon le relief du sol n'est pas envisageable car elle pourrait engendrer de la cavitation¹². Le passage de ces obstacles nécessite la création de ponts ou de forages pour le passage des conduites. Ces interventions sont à éviter autant que possible en raison du coût élevé.

La localisation des "obstacles" liés aux pentes s'est faite en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) de Swisstopo [60]. Le modèle raster a été vectorisé pour obtenir des zones de 1° de précision. Toutes les surfaces dont la pente est de 25° ou plus sont jugées non-propices aux réseaux thermiques. La limite de 25° a été choisie de façon empirique après des observations sur les cartes. La limite est suffisamment élevée pour être sûr de ne pas éliminer une zone propice. Un réseau dans une pente de 20° serait déjà ambitieux.

12. La cavitation est la formation de bulles de vapeur dans la conduite lorsque la pression devient inférieure à la pression de vapeur du liquide. Ce phénomène endommage les conduites et autres éléments du réseau.

La figure 4.17 ci-dessous illustre la contrainte des fortes pentes dans le canton de Vaud.



(a) Zones du canton de Vaud où les pentes dépassent les 25°.



(b) Fortes pentes dans quatre régions intéressantes.

FIGURE 4.17 – Modélisation de la contrainte liée aux pentes de plus de 25°.

4.5.9 SITES POLLUÉS

La Confédération possède un cadastre des sites pollués qui répertorie tous les sites en Suisse contaminés par des polluants ou sur lesquels une pollution est supposée [61]. Les sites pollués sont problématiques pour toutes les nouvelles constructions se situant sur une parcelle présente dans le cadastre des sites pollués.

Chaque site a une dénomination en fonction de sa "phase", telle que listé ci-dessous.

- Pollué, ne nécessite ni surveillance ni assainissement
- Pollué, pas d'atteinte nuisible ou incommodante à attendre
- Pollué, nécessité d'une investigation non encore évaluée
- Pollué, investigation nécessaire
- Pollué, nécessite une surveillance
- Pollué, nécessite un assainissement

Lorsqu'une pollution est possible, une étude est obligatoire afin de déterminer le taux de substances problématiques puis définir les actions à mener.

Le cadastre des sites pollués ne donne pas tous les éléments nécessaires à l'évaluation des potentiels travaux nécessaires à la remise en état de la parcelle polluée. De ce fait, il faut évaluer le coté problématique de la pollution à l'aide des phases listées ci-dessus.

Les deux premières phases ne devraient pas être problématiques pour les travaux liés aux réseaux car le niveau de pollution ne nécessite pas de travaux spécifiques. Toutes les autres phases nécessitent un travail sur la zone. Dans le meilleur des cas, le site ne nécessite qu'une investigation, mais, dans le pire des cas, une décontamination, pouvant durer plusieurs années, sera nécessaire. Afin d'éviter ces inconvénients supplémentaires, il est préférable de qualifier les autres phases comme contraintes pour les réseaux thermiques.

La figure 4.18 ci-dessous illustre la contrainte liée à la pollution dans quatre régions du canton de Vaud.



FIGURE 4.18 – Sites pollués problématiques dans quatre régions intéressantes. Une figure concernant tout le canton est disponible dans l'annexe B, figure viii, mais les sites sont difficiles à repérer.

4.5.10 VOIES DE CHEMINS DE FER

Les voies de chemins de fer constituent des obstacles au passage des conduites des réseaux thermiques. Une ligne de chemin de fer est franchissable en empruntant des passages existants, tels que des tunnels ou des ponts. Cependant, le passage par des constructions existantes n'est pas garanti car les conduites de réseaux thermiques n'étaient pas prévues au moment de la construction des voies ferroviaires.

Le moyen de passage "sûr" est le forage d'un passage sous les voies afin d'y poser des conduites. De tels travaux sont complexes, onéreux et nécessitent l'accord des CFF.

Pour les raisons énoncées ci-dessus, il est préférable de ne pas devoir traverser les voies de chemins de fer.

Swisstopo possède une couche vectorielle contenant toutes les voies de chemin de fer en Suisse. Une analyse des tracés a permis d'éliminer les segments de voies non-problématiques, comme les voies souterraines ou les voies désaffectées. Les voies de chemin de fer jugées problématiques sont illustrées dans la figure 4.19 ci-dessous.

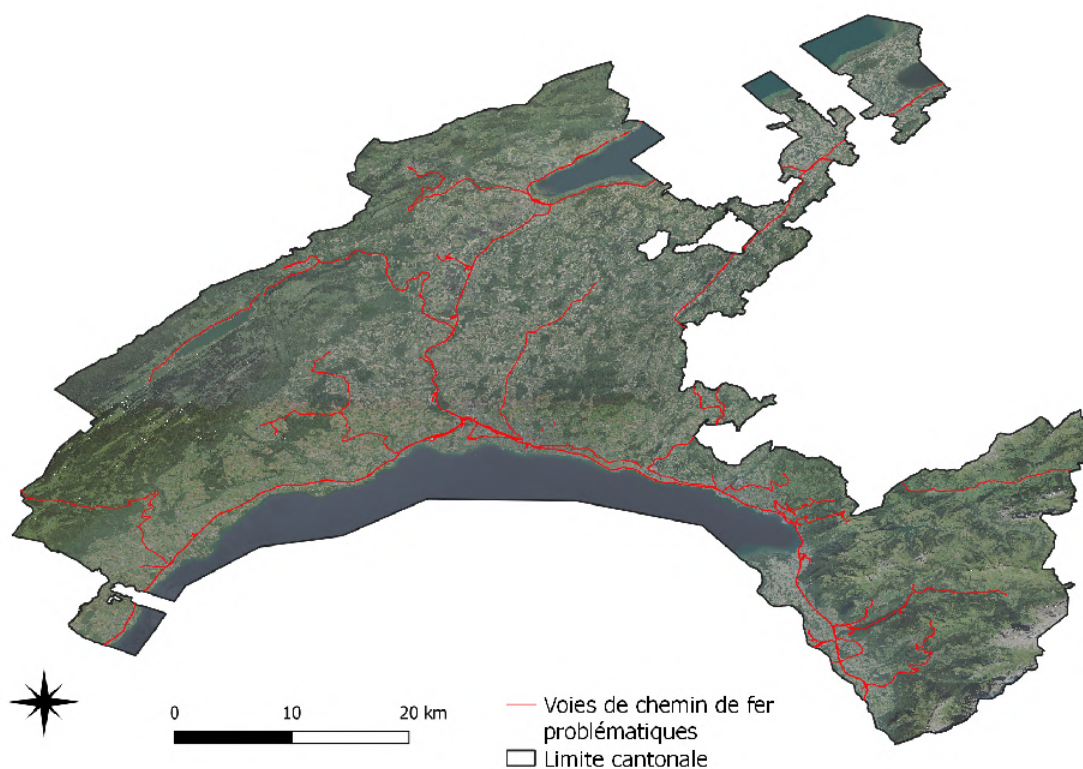


FIGURE 4.19 – Voies de chemin de fer problématiques dans le canton de Vaud.



FIGURE 4.20 – Zoom sur quatre régions intéressantes.

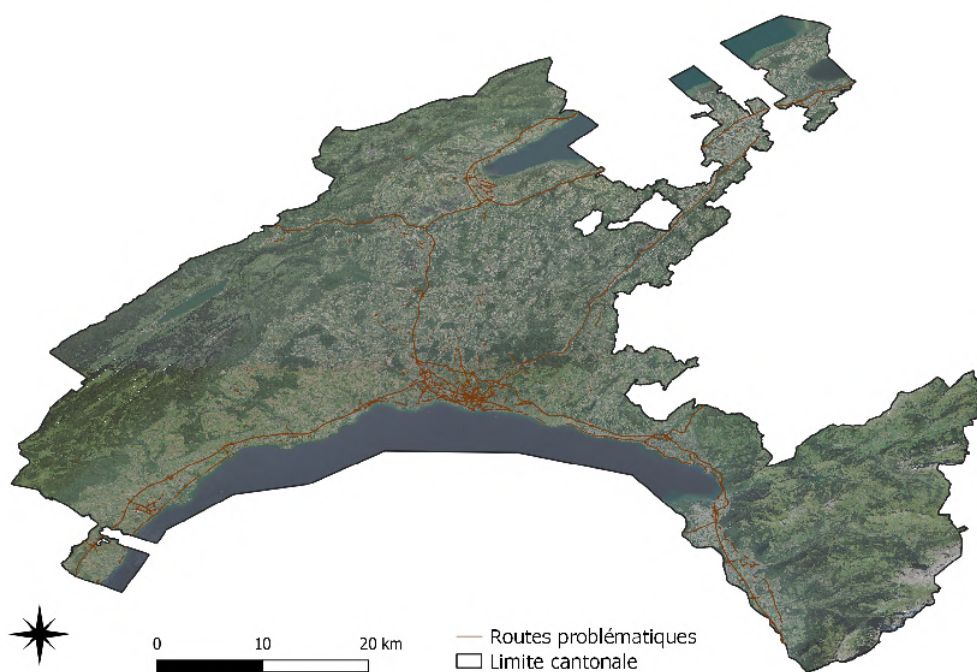
Les géodonnées téléchargées sont sous forme de polygones. Afin de prendre en compte l’emprise sur le sol, une zone tampon de 5m a été rajoutée¹³. Tous les polygones ont ensuite été réunis afin de ne former qu’un multipolygone pour réduire le temps de calcul.

4.5.11 GRANDES ROUTES

Les routes sont de possibles obstacles aux passages des conduites. Lorsque la route est relativement petite, peu fréquentée et que son sous-sol n’est pas encombré de conduites, le passage n’est pas compliqué. Il suffit de fermer la route, creuser une tranchée, poser la conduite et reboucher. Lorsque la route est très fréquentée, il n’est pas possible de la fermer entièrement et les travaux se font en plusieurs étapes. Une route dont le sous-sol est déjà encombré de conduites complique grandement le passage de nouvelles conduites pour le réseau thermique. Certaines routes en centre-ville sont saturées et il n’est pas imaginable d’ajouter (simplement) de nouvelles conduites. Le contournement des grandes routes par de plus petites est une façon de surmonter ces "obstacles".

Les routes de plus de 8m de largeur ont été jugées comme étant problématiques pour les réseaux thermiques. Ce choix se base sur les données mises à disposition par Swisstopo [59] et sur les paramètres de qualification des routes. Les routes problématiques sont visibles dans la figure 4.21 ci-dessous.

¹³. Cette modification ne devrait pas enlever de bâtiments car aucune construction n’est censée se trouver aussi proche d’une voie ferrée



(a) Routes dont la largeur est de 8m ou plus dans le canton de Vaud.



(b) Grandes routes dans quatre régions intéressantes.

FIGURE 4.21 – Modélisation de la contraintes des routes.

4.5.12 CONTRAINTES INCERTAINES

Une partie des contraintes ne sont pas suffisantes pour exclure des zones d'études mais pourraient compliquer la création de réseaux thermiques. Ces contraintes, ici nommées "incertaines", seront utilisées une fois les zones propices trouvées pour les différencier.

ÉPAISSEUR DE SOL MEUBLE

Le coût des travaux de génie civil dépend entre autres de leur complexité. Un sol dur complique la création de tranchées et donc de pose de conduites. Un sol meuble est souhaitable afin de ne pas devoir casser la roche pour permettre le passage des conduites. La figure 4.22 ci-dessous montre la hauteur de roche meuble¹⁴.

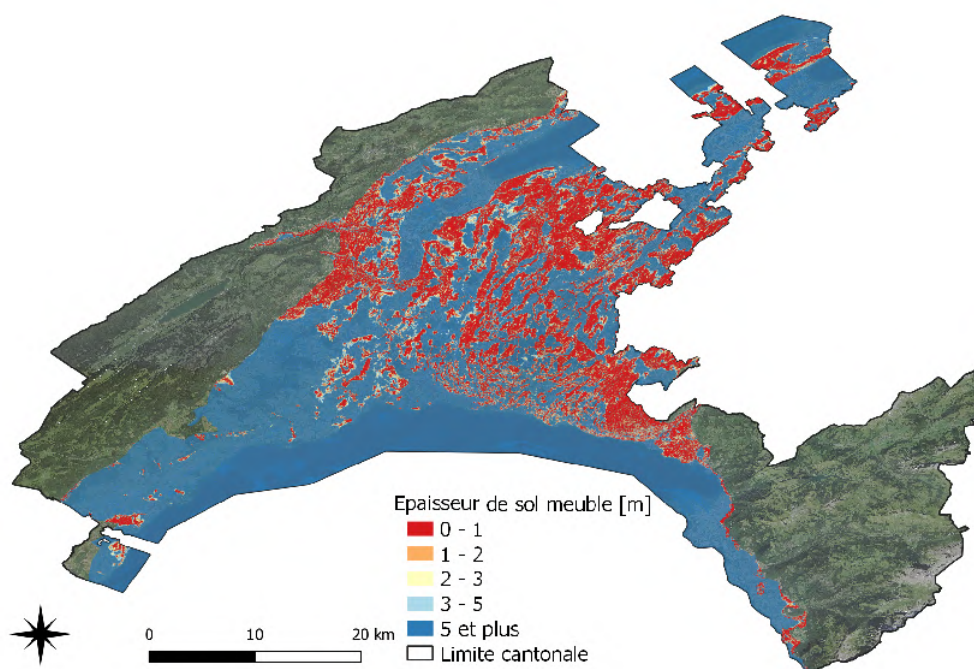


FIGURE 4.22 – Hauteur de sol meuble dans le canton de Vaud (là où l'altitude du toit du rocher a été modélisée). Une carte montrant plus précisément quatre régions intéressantes est disponible dans l'annexe B, figure ix.

Lorsque la profondeur de sol meuble est plus faible que la tranchée à creuser, les travaux sont plus compliqués car il faut creuser la roche. La profondeur d'une tranchée est d'au moins 1 m mais ne dépasse généralement pas 1.60 m, car au-delà la loi exige la pose de palplanches. Dans certains cas, il est nécessaire de creuser plus profondément afin d'éviter d'autres conduites ou pour ne pas courber les conduites et créer de la cavitation. Les tranchées profondes dépassent rarement les 5m. Au-delà, le passage de conduites nécessite le forage d'un petit tunnel.

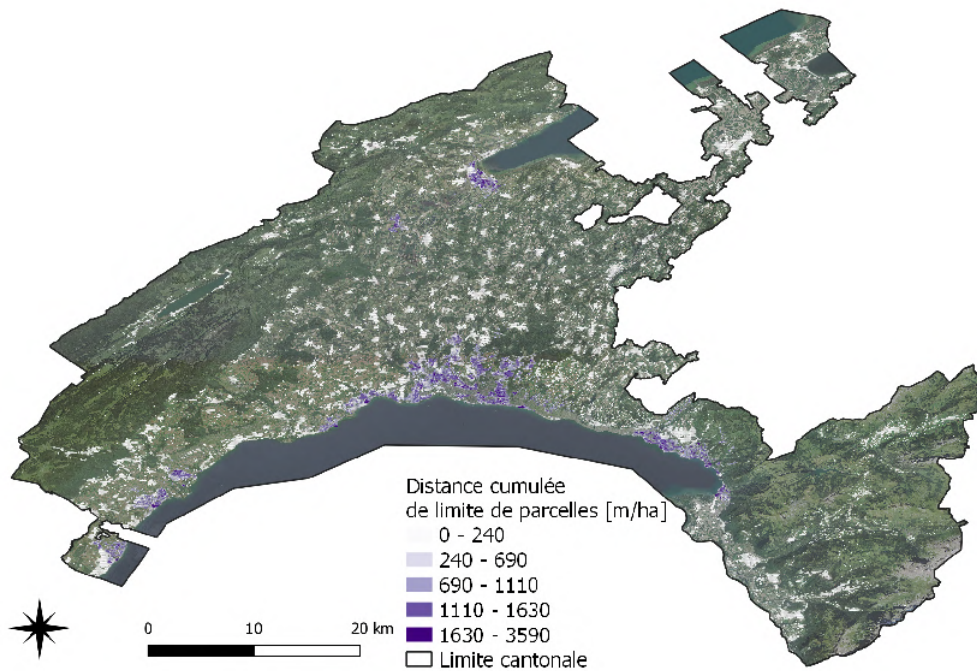
14. Cette donnée est le résultat de la vectorisation de la différence entre le MTN25 et le modèle de hauteur du toit du rocher [62]. Cette donnée est disponible en format raster [63].

La problématique des sols meubles peu profonds voire inexistant (c.à.d. que la roche est à fleur) n'est pas considérée comme une contrainte qui exclut une zone. La carte présentée dans la figure 4.22 se base sur un modèle et est sujette à des incertitudes élevées. De plus, le modèle de hauteur du toit du rocher ne couvre pas toute la zone géographique du canton et cette contrainte n'est donc pas généralisable. Les faibles hauteurs de sol meuble seront annotées dans les résultats.

PROPRIÉTAIRES DE PARCELLES

Le réseau traverse des parcelles pour alimenter les bâtiments en énergie. Ces parcelles sont détenues par des personnes physiques ou morales. Dans la mesure du possible, le passage des conduites doit se faire sur les domaines publics (communaux ou cantonaux) qui sont les routes et les chemins (principaux). Le passage des conduites sur les parcelles détenues par les communes n'est pas problématique car les communes soutiennent les projets de réseaux thermiques renouvelables. Les passages sur les parcelles détenues par des privés est plus délicat car il faut obtenir une autorisation de passage. Il faut commencer par convaincre les propriétaires de laisser passer le réseau sur leur propriété et ensuite il faut entamer les procédures administratives qui prennent du temps.

Le mieux est d'éviter les parcelles détenues par des privés. Malheureusement, pour savoir si le propriétaire est un privé, il faut connaître son nom, mais cette information est confidentielle. Vu que la plupart des propriétaires sont des privés, il est préférable de traverser le moins de parcelles possible. Dans cette idée-là, les distances de périmètre de parcelles ont été calculées dans chaque maille. Le "meilleur" réseau selon cette contrainte est celui qui a le moins de mètres de périmètre de parcelle par maille.



(a) Distance cumulée de limites de parcelles dans le canton de Vaud.



(b) Contrainte dans quatre régions intéressantes.

FIGURE 4.23 – Modélisation de la contrainte liée aux propriétaires de parcelles.

La densité des parcelles varie selon les régions. Sans surprises, les milieux urbains sont plus morcelés. Cette contrainte sera utilisée pour avoir plus d'informations sur les zones propices identifiées par l'algorithme.

ZONE D'INSTALLATION D'ÉQUIPEMENT

Les réseaux nécessitent un ou des espaces pour y installer des équipements (des PAC, une station de pompage, des échangeurs de chaleur, etc.). Pour cela, il faut trouver une parcelle avec de l'espace libre dans une zone qui permet l'installation des équipements. Les zones compatibles avec l'installation de ces équipements se trouvent dans les plans d'affectations des communes [64]. Le tri des zones a permis de trouver les surfaces visible sur la figure 4.24.



FIGURE 4.24 – Zones d'affectations compatibles avec les installations techniques des réseaux thermiques. Une figure avec les zones sur tout le canton de Vaud est disponible dans l'annexe B, figure x.

L'information manquante dans cette donnée est la disponibilité de place pour l'installation, et ne peut être obtenue qu'en étudiant plus précisément les zones.

4.6 MÉTHODE DE RECHERCHE DE ZONES PROPICES AUX RÉSEAUX THERMIQUES

Les paragraphes précédents ont expliqué la démarche choisie pour obtenir les données dans un format qui convient à la recherche souhaitée. L'étape suivante consiste à les utiliser pour obtenir les zones propices aux réseaux CAD.

4.6.1 ALGORITHME

Le principe général de la méthode de recherche de zones propices aux CAD¹⁵ consiste à agréger les demandes en chaleur des bâtiments par maille, enlever les zones sujettes aux contraintes définies précédemment dans la section 4.5 et finalement agréger les mailles ayant une forte demande en chaleur en polygones.

Dans un deuxième temps, un tri des polygones est effectué selon quelques paramètres calculés.

La bonne compréhension de la notion de *maille* et de *polygone* est importante pour la bonne compréhension du rapport. Les mailles et les polygones sont également utilisés dans les résultats.

La maille est l'unité de base de l'étude, soit un petit carré de la grille d'étude. Dans l'outil SIG, la maille est un carré (ou éventuellement un rectangle) qui regroupe la somme des consommations des bâtiments présents dans sa surface.

Le polygone est le résultat d'une mise en commun des mailles qui, ensemble, formeraient une zone propice aux réseaux thermiques.

Dans les résultats, les polygones permettent d'avoir les valeurs moyennes des potentiels réseaux et les mailles permettent d'étudier plus précisément des petites parties des réseaux.

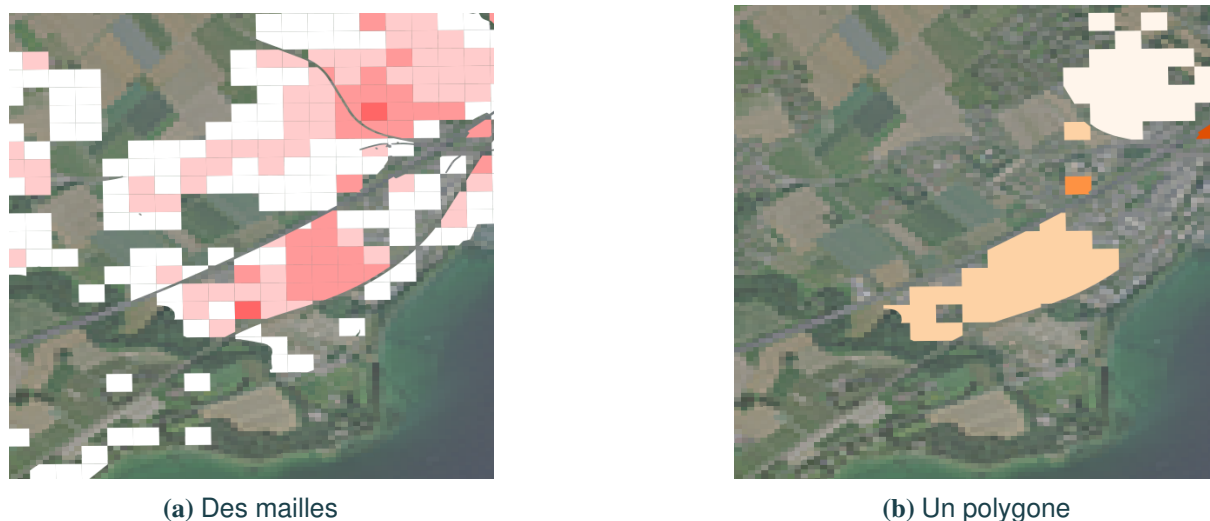


FIGURE 4.25 – Exemple de mailles (figure a) qui sont agrégées en polygones (figure b)

Cette méthode est appliquée au cas précis du canton de Vaud mais est valable pour d'autres cantons ou régions tant que des données similaires à celles employées ici sont disponibles. La surface étudiée doit avoir une superficie plus élevée que la zone où pourrait se trouver un potentiel réseau thermique. Par exemple, l'étude de Cossonay se ferait en prenant le pourtour de la ville et en ajoutant par exemple 200m de sécurité pour être sûr de ne plus avoir de bâtiments.

15. Cette méthode se base sur ce qui a été employé dans l'étude *Perspectives chaleur* avec des modifications pour les besoins spécifiques de ce projet.

Le principe général de l’algorithme utilisé pour obtenir les zones propices aux CAD est schématisé dans la figure 4.26 ci-dessous.

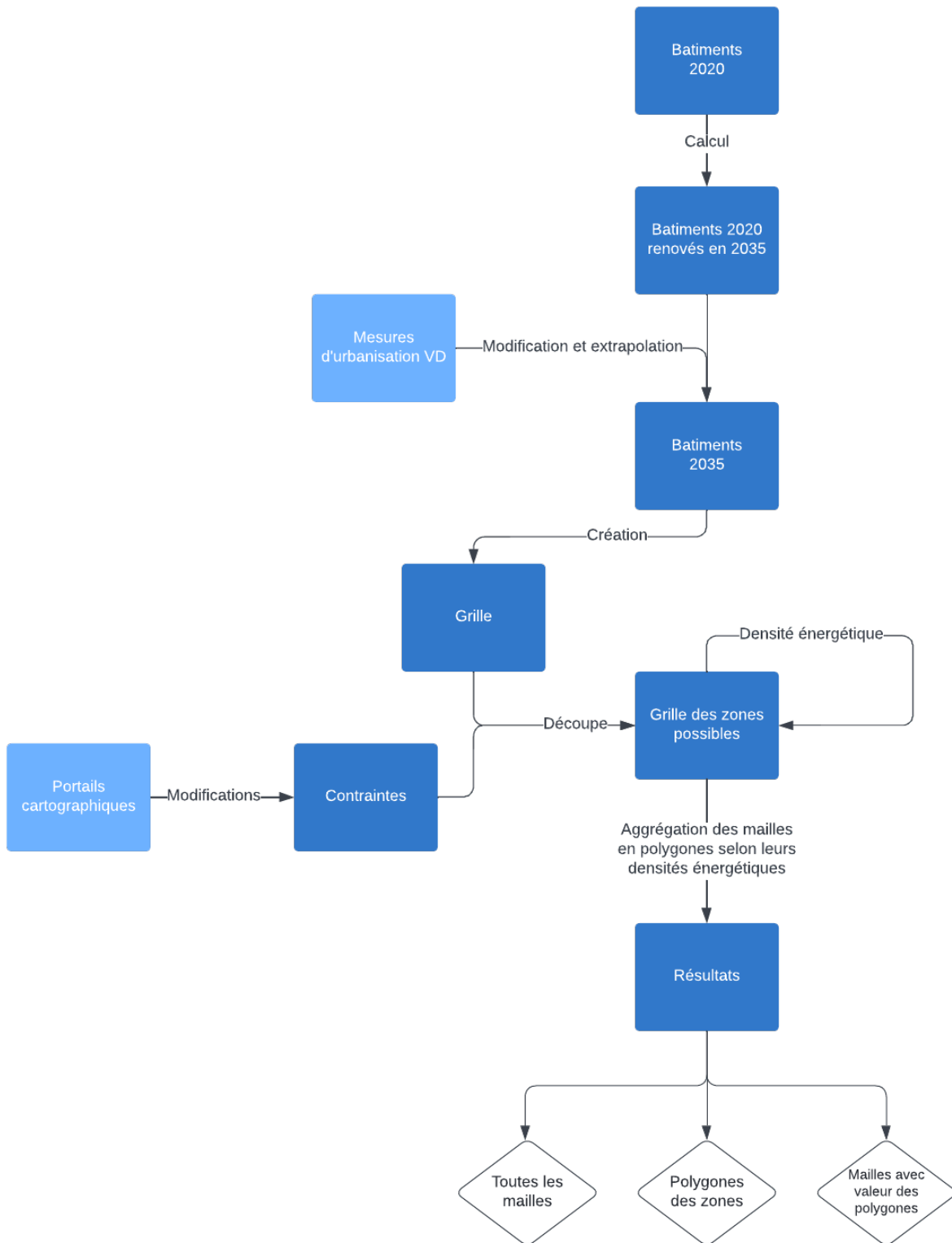


FIGURE 4.26 – Schéma simplifié de la méthode utilisée pour obtenir des zones propices aux réseaux de chaleur à distance dans le canton de Vaud.

Avant même de commencer l’algorithme, il faut uniformiser les données qui seront utilisées. Les données minimales¹⁶ à fournir pour les bâtiments sont leurs emplacements géographiques et leurs consommations annuelles de chaleur en kWh. Les contraintes utilisées sont transformées en couches vectorielles sous forme de polygones. Les contraintes sous formes de lignes sont à transformer en polygones en rajoutant une zone tampon dont la largeur dépend de la contrainte (par exemple une route de 10m de large aura un tampon de 5m de chaque cotés de la ligne modélisant la route).

La première étape est la création de la grille des besoins en chaleur. Pour cela, les besoins en chaleur des bâtiments sont chargés par l’algorithme sous forme de points géoréférencés. Une grille recouvrant tous les points est créée (hectométrique pour le cas étudié). La grille est découpée selon la surface étudiée (canton de Vaud). Les contraintes sont chargées sous forme de polygones vectoriels. Les polygones de contraintes découpent également la grille en faisant une "différence" afin de garder uniquement les zones de la grille qui ne sont pas soumises aux contraintes. Les besoins énergétiques des bâtiments sont attribués aux mailles (ou partie de maille découpée) dans lesquels ils se situent.

À ce stade là, les besoins en chaleur sont donnés par maille dans les zones non-soumises à des contraintes (voir la figure 6.1 pour l’illustration avec le cas du canton de Vaud).

L’étape centrale est l’agrégation des mailles propices aux CAD en polygones. Pour cela, la densité de chaleur minimale d’un polygone doit être définie. Dans le cas de ce projet, la valeur choisie est de 800 MWh/ha/an. Un numéro d’identification unique est attribué à chaque maille. Elles sont triées par ordre décroissant de consommation. La maille avec la consommation maximale est retenue et on lui attribue un numéro unique de CAD (son centroïde). L’algorithme cherche dans les mailles voisines celle qui a la plus haute densité et vérifie que la moyenne du polygone est supérieure à la limite minimale de densité thermique souhaitée. Si c’est le cas, elle attribue le même numéro de CAD à la maille et retire la maille de la liste triée. L’algorithme recherche ensuite la prochaine maille voisine avec la haute densité thermique. Ce processus se réitère jusqu’à ne plus avoir de maille voisine ou que la moyenne du polygone descende en-dessous de la limite fixée.

Les "mailles voisines" sont celles qui touchent la maille de base soit par une arête soit par un sommet. La figure 4.27 ci-dessous illustre le voisinage considéré.

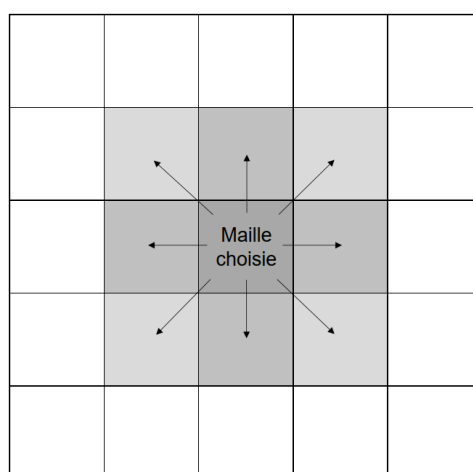


FIGURE 4.27 – Illustration des mailles voisines considérées dans l’algorithme par rapport à la maille choisie.

16. Il est possible de fournir plus d’informations qui sont utilisées plus tard pour affiner la recherche ou pour étudier un aspect particulier.

Une fois que plus aucune maille ne peut être ajoutée au polygone, l'algorithme va chercher la maille restante avec la plus grande consommation et recommencer l'agrégation des mailles voisines. L'algorithme se termine lorsqu'il n'y a plus aucune maille disponible pour commencer un nouveau polygone.

Les données qui sortent de l'algorithme sont : toutes les mailles disponibles, les mailles retenues dans les polygones et les polygones en soi. Seules les mailles retenues et les polygones sont utiles pour la suite.

Plusieurs valeurs liées aux résultats (mailles et polygones) sont calculées : la surface, la densité énergétique, le nombre de bâtiments (EGID) par surface et la puissance moyenne par bâtiment (EGID).

Les valeurs ajoutées aux mailles et aux polygones permettent d'améliorer la qualité des résultats en éliminant certains résultats non pertinents. Des restrictions sont imposables au niveau du bâtiment, de la maille ou du polygone. Dans le cas de ce projet les restrictions suivantes ont été appliquées :

- Une puissance minimale par bâtiment retenu
- Une surface minimale par maille
- Une densité thermique minimale par maille
- Une surface minimale par polygone
- Une densité thermique minimale par polygone
- Un nombre minimal de bâtiments par polygone

Le tri des résultats permet de garder uniquement les meilleures zones. Une fois le nombre de zones réduites, les contraintes incertaines ajoutent des informations sur les polygones pour émettre des réserves sur la propiété aux réseaux CAD. Ces informations sont ajoutées aux résultats lorsqu'une couche de contraintes incertaines se superpose avec les résultats.

4.6.2 ATTRIBUTION DES RESSOURCES D'ÉNERGIE SITUATIONNELLES

L'attribution des sources de chaleur situationnelles aux polygones s'effectue en fonction de leurs positions et des distances maximales auxquels peuvent aller une source (p.ex l'eau du lac n'alimentera pas un réseau à plus de 2km des berges). La ressource est attribuée à un polygone s'ils se superposent sur la carte.

Pour une bonne sécurité de l'approvisionnement des réseaux, il est préférable de mutualiser les ressources situationnelles plutôt qu'en utiliser une individuellement. De ce fait, les ressources peuvent se concurrencer pour fournir de l'énergie dans une zone. Un ordre de priorité basé sur les critères suivants a été établi : localisation de la ressource, fiabilité, maîtrise technico-économique de l'exploitation, potentiel évalué de la ressource et son adéquation du niveau de température pour la distribution de chaleur. L'ordre indicatif¹⁷ est le suivant :

1. Les STEP et les rejets thermiques
2. Les aquifères
3. Les lacs
4. Les nappes phréatiques
5. Les autres ressources

Chaque zone trouvée se verra attribuer les ressources disponibles dans sa zone (hors les ressources "autres" et celles étant non-situationnelles, qui sont disponibles dans toutes les zones). La géothermie de moyenne et grande profondeur est également disponible sur tout le territoire du canton de Vaud (à l'exception des zones de protection des sources d'eau). La possibilité d'utiliser cette ressource pour un site spécifique demande une étude plus poussée pour voir la rentabilité.

17. L'ordre est indicatif car le choix se fait en fonction des spécificités de chaque cas.

Il n'y a pas de choix défini de la quantité d'énergie à utiliser de chaque ressource. Le potentiel maximal de chaque ressource disponible est annoté au polygone et le choix devra se faire lors d'une étude plus approfondie du réseau.

Les ressources non-situationnelles ne sont pas attribuées aux polygones mais il est évident qu'elles sont disponibles en cas de besoin.

4.7 RÉSEAUX FROIDS

L'étude des besoins en refroidissement est compliquée car il existe très peu de données à ce sujet.

Actuellement, les principaux consommateurs de froid de confort sont les hôtels, les bâtiments administratifs et les surfaces commerciales. Les bâtiments résidentiels disposant de froid de confort sont extrêmement rares en Suisse. Les prévisions météorologiques prévoient une augmentation de la température. La demande en froid de confort devrait donc augmenter à l'avenir. L'installation de refroidissement dans les bâtiments résidentiels est compliquée à prédire. D'une part, l'augmentation de la température pourrait créer une demande de refroidissement, d'autre part, cette demande s'oppose à la réduction de consommation d'énergie et ne devrait pas être nécessaire si les bâtiments sont bien construits. Le froid de confort est possible à l'aide du refroidissement passif¹⁸.

Un autre type de demande en froid est le froid actif qui s'effectue à l'aide de machines de production de froid. Ce froid est principalement utilisé pour les frigos, les congélateurs et des processus industriels.

La distribution de froid dans les réseaux nécessite soit un réseau entièrement dédié au froid, soit un réseau anergie.

La création d'un réseau froid est rare car il faut une grande demande pour qu'il soit rentable. Vu que la demande en froid est compliquée à estimer, il n'est pas possible de rechercher les zones propices aux réseaux froid dans ce travail.

La distribution de froid au travers d'un réseau anergie est plus réaliste. Le réseau fournirait principalement de la chaleur au travers de sous-station et une petite partie des clients seraient fournis en froid (passif ou actif selon la demande spécifique). Cependant, vu que la demande en froid est très incertaine, il n'est pas possible de prévoir les réseaux anergies en comptant sur la demande en froid. Le choix entre un réseau chaud et un réseau anergie devra se faire lors de l'étude précise de la zone.

Pour toutes les raisons mentionnées ci-dessus, la demande en froid ne sera pas étudiée plus en détails.

18. Le refroidissement passif, ou plus fréquemment appelé "freecooling", est le refroidissement à l'aide d'un fluide naturellement froid, comme l'eau du lac par exemple. Ce type de refroidissement n'utilise pas de machine de refroidissement.

CHAPITRE 5

DONNÉES

Les données de ce projet proviennent majoritairement de géoportails (national et cantonal) et sont pour la plupart en accès libre.

Les données de base sur les besoins énergétiques des bâtiments en 2020 ont été reprises des données utilisées dans l'étude *Perspectives chaleur*. Elles proviennent directement du canton et contiennent entre autre les besoins énergétiques des bâtiments selon leurs EGID. Ces données ont été fournies dans le cadre du mandat susmentionné et ne sont pas disponibles pour le public. Malheureusement, une part des besoins thermiques n'était pas correcte ¹ et ils ont été revus, afin d'avoir des valeurs réalistes.

Les couches de contraintes proviennent soit de Swisstopo, soit du portail cartographique du canton de Vaud. Une fois téléchargées, ces couches ont été modifiées selon les besoins spécifiques du travail.

Un tableau récapitulatif des géodonnées utilisées se trouve dans l'annexe C, table i.

1. Certains besoins énergétiques sont calculés à partir des informations connues sur les bâtiments et le canton avait commis quelques erreurs qui menaient à des consommations irréalistes pour certains bâtiments.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS

Les résultats concernent le canton de Vaud, qui est la zone d'étude choisie dans ce projet, mais la méthode développée est généralisable et des résultats similaires auraient pu être produits pour d'autres cantons. Les résultats sont montrés sur deux types de figures : sur l'ensemble du canton de Vaud et sur quatre régions comportant plusieurs polygones.

6.1 BESOINS EN CHALEUR EN 2035

La figure 6.1 montre l'estimation des besoins en chaleur du canton de Vaud en 2035, agrégés par mailles hectométriques dans les zones sans contraintes pour l'intégration des réseaux thermiques. Une carte avec tous les besoins thermiques du canton est disponible dans l'annexe D, figure xi.

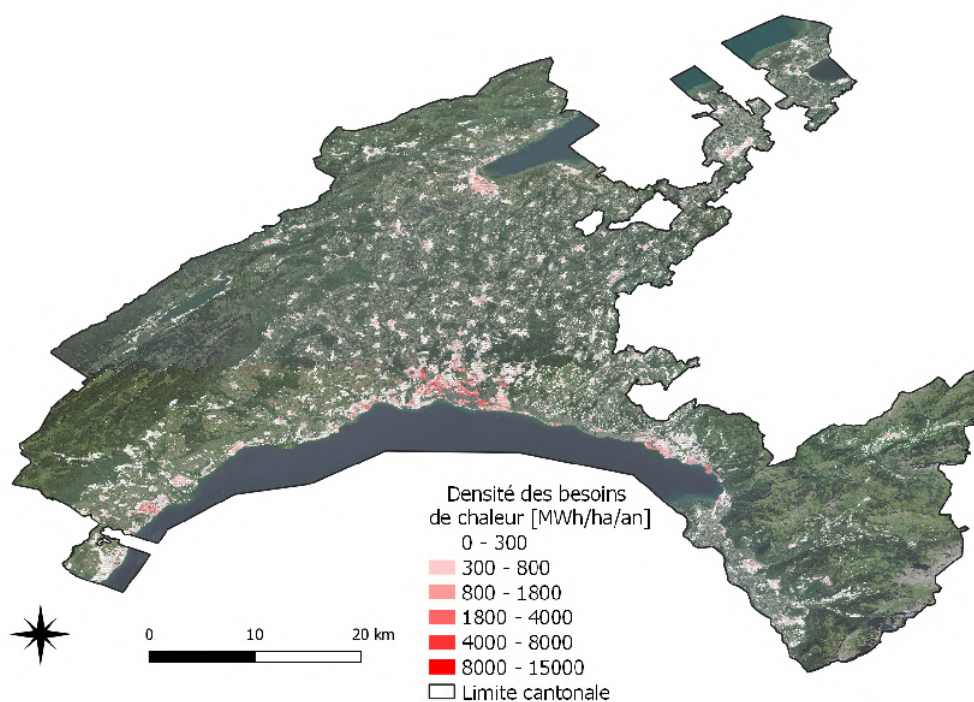


FIGURE 6.1 – Densité des besoins de chaleur en 2035 dans les mailles de la grille après l'élimination des contraintes.

6.2 ZONES PROPICES AUX RÉSEAUX DE CHALEUR À DISTANCE EN 2035

La figure 6.2 fait ressortir les regroupements de mailles propices à la création d'un réseau CAD.

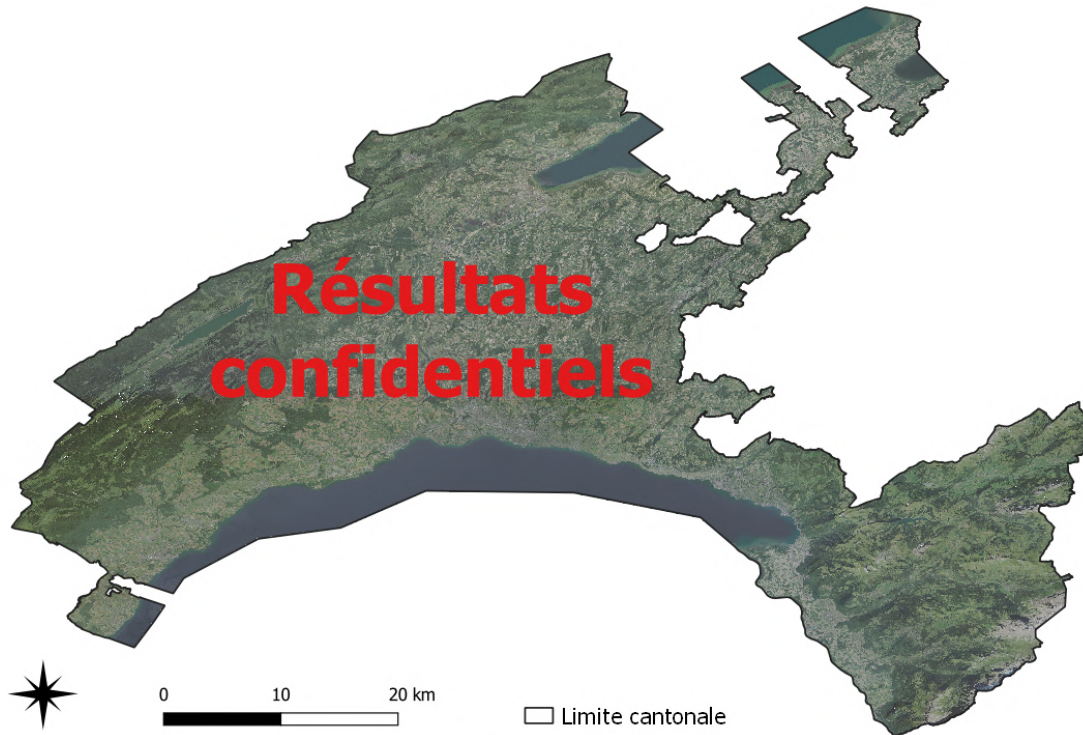


FIGURE 6.2 – Densité moyenne des besoins de chaleur dans les polygones retenus par l'algorithme de recherche.

Toutes les zones propices, donc les polygones, ont une densité moyenne de besoins en chaleur d'au moins 800 MWh/ha et cette limite est choisie dans l'algorithme. Certaines zones ont une valeur supérieure à 800 MWh/ha. Ce dépassement est possible lorsqu'une zone a agrégé toutes les mailles adjacentes et ne peut plus s'étendre.

La figure 6.3 ci-dessous montre quatre régions propices aux réseaux CAD, qui consistent en quatre grandes agglomérations dans le canton ("Localisation 1", "Localisation 2", "Localisation 3", "Localisation 4").

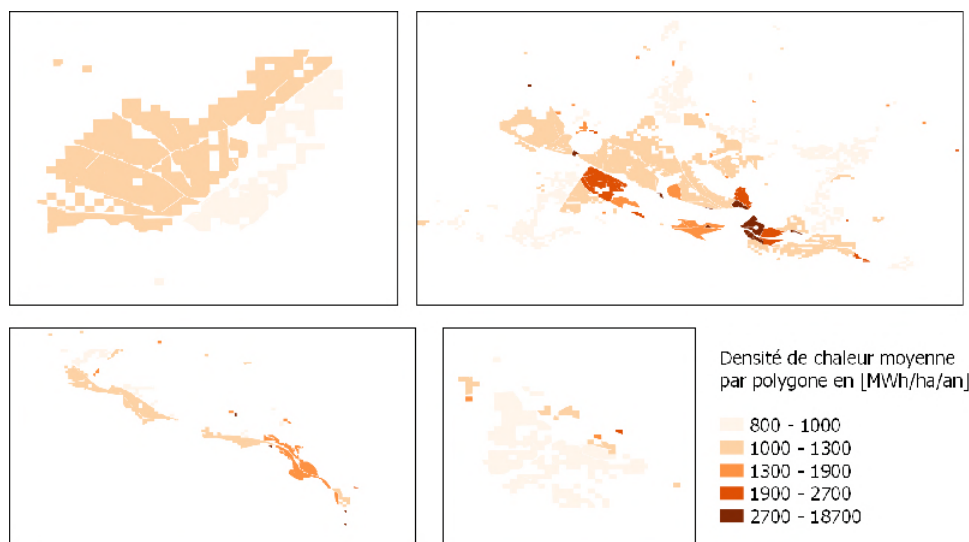


FIGURE 6.3 – Densité des besoins en chaleur par maille hectométrique en [MWh/ha/an] en 2035 dans quatre régions intéressantes.

Le graphique de la figure 6.4 ci-dessous compare les densités énergétiques en fonction de la surface des polygones.

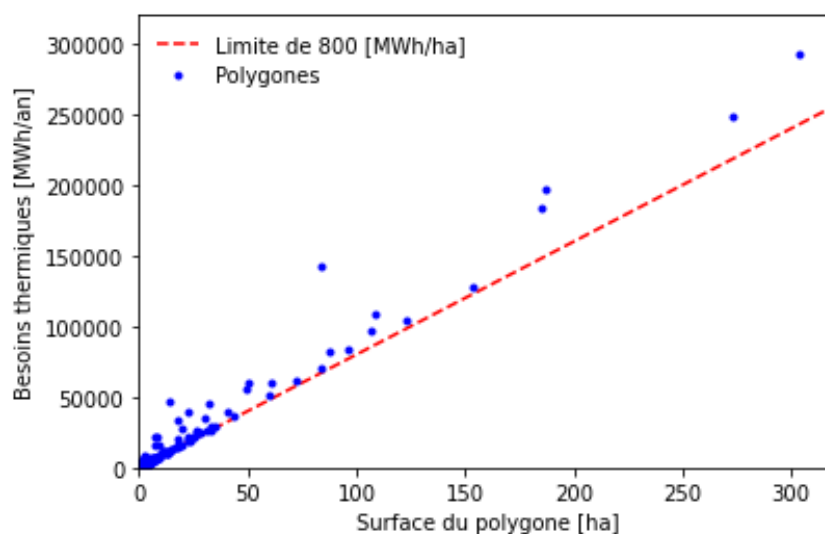


FIGURE 6.4 – Graphique faisant ressortir les besoins en chaleur d’un polygone en fonction de sa surface. Chaque point bleu représente un polygone. La courbe rouge est la densité minimale d’un réseau.

Les points bleus recouvrant la ligne rouge sont les polygones dont le développement est limité par une densité de besoins en chaleur trop faible dans leur voisinage. Ceux au-dessus de la limite de 800 MWh correspondent aux polygones dont toutes les mailles voisines disponibles ont été agrégées, et avec une densité thermique élevée. Ce sont souvent des zones en centre-ville isolées et limitées par des contraintes comme les routes ou les voies de chemin de fer. Les petits polygones avec une densité thermique élevée sont souvent des zones industrielles avec un nombre restreint de bâtiments.

La figure 6.4 montre également que la majorité des polygones se situent proche de l’origine (axe x,y).

La figure 6.5 ci-dessous est un agrandissement de la zone proche de l'origine qui montre les polygones de petites surfaces (< 50 ha).

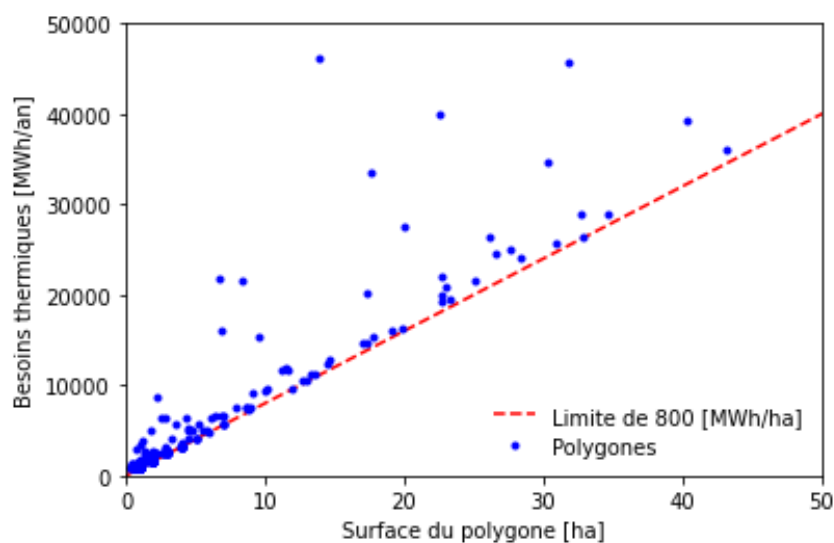


FIGURE 6.5 – Zoom sur les polygones de petites surfaces de la figure 6.4.

La majorité des réseaux visibles sur ce graphique ont une surface de moins de 10 ha. Les réseaux les plus intéressants sont avec une densité moyenne supérieurs à 800 MWh/ha/an. Les réseaux de surface "négligeable" ne sont pas intéressants car il faut une distance minimale pour former un réseau. Dans le cas de ce projet, une surface de 1 hectare sera la surface minimale pour former un réseau (voir la section 6.2.1 pour plus de détails). Dans le cas d'étude, sur les 304 polygones retenus, 137 ont une surface de 1 hectare ou moins, soit 45%. En terme de surface, cela représente moins de 4%.

La figure 6.6 montre l'histogramme des surfaces des polygones.

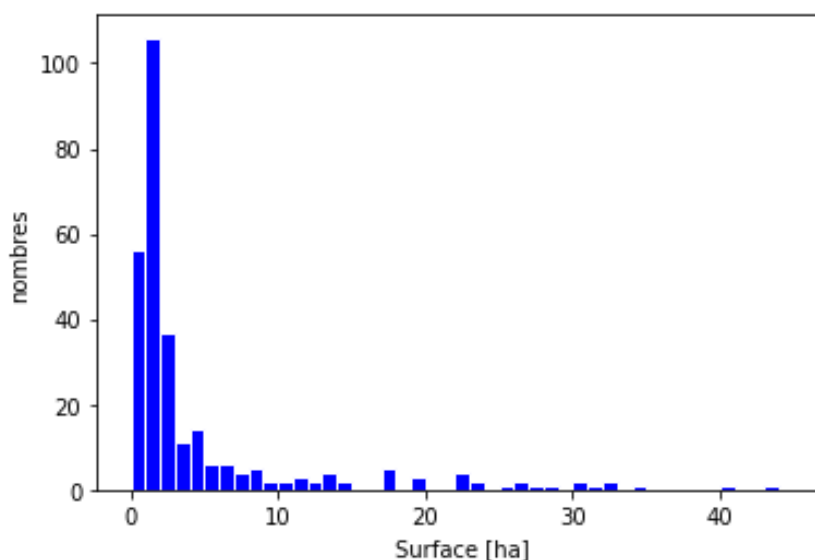


FIGURE 6.6 – Histogramme des surfaces des polygones.

La majorité des réseaux ont une surface de moins de 4 hectares. Les réseaux compacts sont souhaités car les distances de conduites dans le réseau sont plus faibles, ce qui permet des coûts d'investissement plus faibles (travaux de génie civil moindres et plus faibles pertes de distribution). Pour rappel, on désire avoir une densité énergétique linéaire d'au moins 2.5 MWh/m de conduite posée.

Une limite de surface minimale pourrait être définie afin de ne pas avoir de trop petits réseaux, par exemple en éliminant les polygones de moins de 1 hectare.

La densité des besoins thermiques est susceptible de varier fortement à l'intérieur d'une zone propice (polygone). La présence d'une ou plusieurs mailles dont la densité est largement supérieure à 800 MWh/ha permet l'agrégation de mailles dont la densité est inférieure. La figure 6.7 ci-dessous montre ces variations.

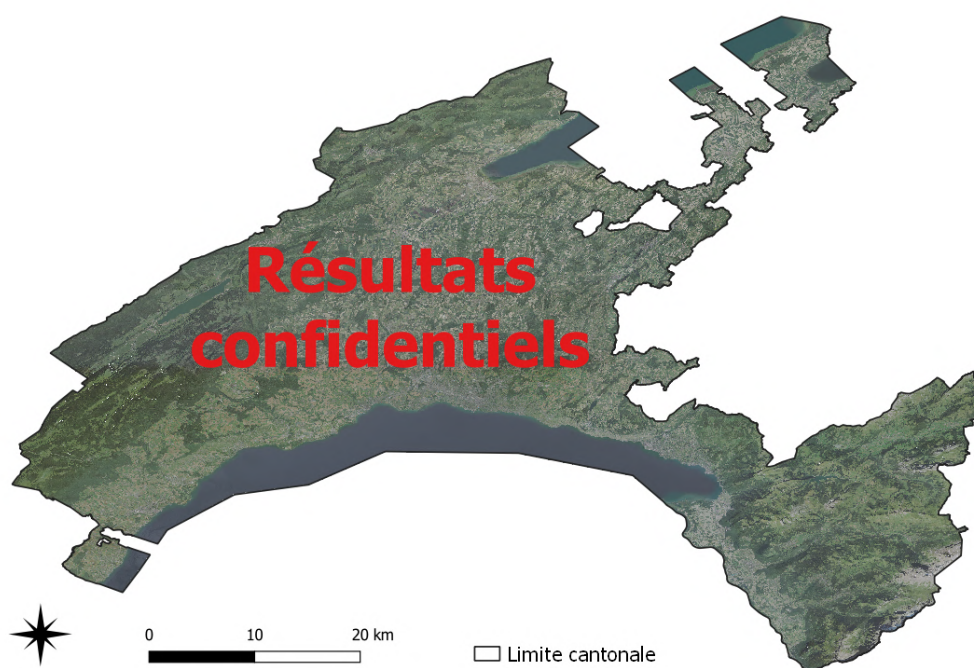


FIGURE 6.7 – Densité des besoins de chaleur en 2035 dans les mailles retenues par l'algorithme de recherche.

Les mailles les plus denses sont au centre des agglomérations ou des villes. Un agrandissement de la carte est nécessaire pour percevoir les variations.

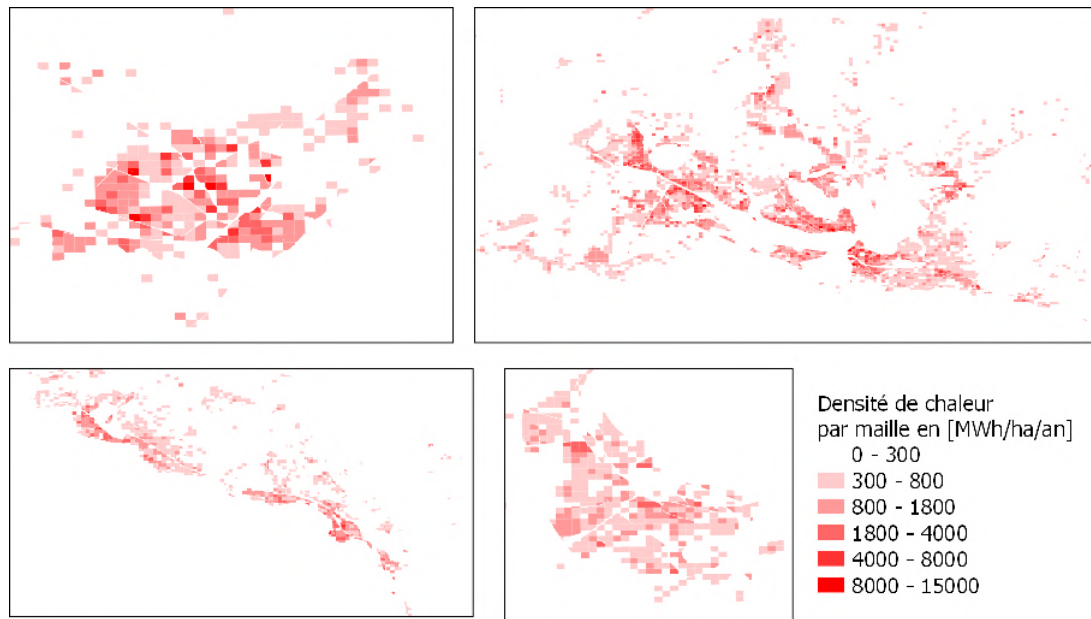


FIGURE 6.8 – Quatre régions intéressantes de la figure 6.7

La figure 6.8 montre les variations de densité dans des régions propices aux réseaux CAD.

Les mailles blanches (0 à 300 MWh/ha) et les rouges très claires (300 à 800 MWh/ha) sur la figure 6.8 font partie des polygones grâce à la densité plus élevée des autres mailles qui permettent de conserver une densité moyenne de plus de 800 MWh/ha. L'emplacement des mailles avec la plus faible densité (celles blanches) varie selon les polygones. A "Localisation 1", elles se situent sur dans les bords des polygones. Ces mailles blanches proviennent de l'extension de la surface du polygone jusqu'à ce qu'il atteigne une densité moyenne de 800 MWh/ha. Dans le cas de "Localisation 2", les mailles blanches ont permis aux polygones de s'étendre vers des zone où la moyenne était supérieure à 800 MWh/ha. L'extension s'est fait que dans une direction car les contraintes ne permettaient pas de s'étendre ailleurs.

La densité moyenne des polygones permet de connaître ceux qui ont globalement la plus haute densité thermique (cf. figure 6.3 au-dessus). Ils devraient être les plus intéressants à analyser car la densité énergétique est bien garantie.

La zone géographique au nord et à l'est de "Localisation 1" a une demande en chaleur moins dense que le reste de la ville. Les contraintes routières et ferroviaires n'ont pas fait disparaître une partie des polygones. Cela montre que les demandes en chaleur ne proviennent pas que d'un unique client, mais que la répartition de ces besoins est assez homogène à travers plusieurs mailles.

Des observations similaires sont possibles pour la région de "Localisation 1".

L'étude de la relation entre la densité thermique et la surface totale d'un polygone permet de les différencier.

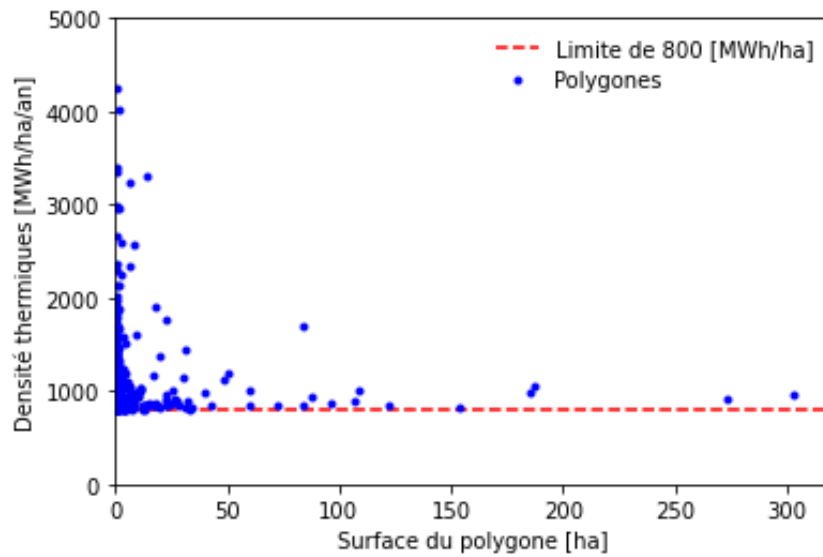


FIGURE 6.9 – Graphique faisant ressortir la densité thermique des polygones en fonction de sa surface. Chaque point bleu représente un polygone.

La répartition montre que la plupart des réseaux ont une surface de moins de 30 ha et que leur densité est proche de 800 MWh/ha. Certains réseaux ont une densité bien plus élevée bien qu’ayant une très petite surface, ce qui est dû à des grands consommateurs de chaleur, mais géographiquement isolés. Ce genre de cas n’est pas désirable en pratique, car les réseaux avec peu de clients présentent un risque économique plus élevé, le départ d’un grand consommateur pouvant mettre en péril tout un réseau.

Les réseaux de plus petites surfaces sont visibles sur la figure 6.10 ci-dessous.

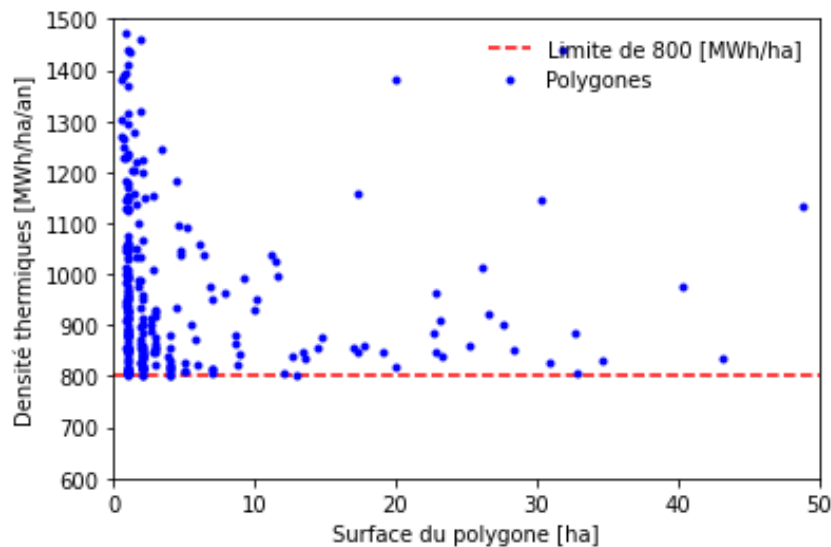


FIGURE 6.10 – Zoom de la figure 6.9 sur les polygones de petites surfaces.

L’étude de la densité thermique selon la surface permet de différencier les polygones. Une densité élevée est toujours souhaitable. La surface de couverture n’a pas de valeur optimale. Cependant, les surfaces de 1 ha sont probablement issues d’un seul gros client. De ce fait, elles seront supprimées des résultats.

Les petits consommateurs ne sont pas primordiaux dans un réseau. Chaque consommateur peut théoriquement se connecter au réseau, mais le raccordement entre une conduite "principale" et le client est un facteur limitant à cause du coût important qui peut en résulter. Le choix de raccorder un client dépend principalement de la longueur de conduite à poser uniquement pour lui et de l'énergie qu'il consommera. Les clients ayant besoin d'une puissance de moins de 20 kW ne sont pas considérés comme étant importants dans un réseau. Leur taux de raccordement est élevé uniquement s'ils sont forcés de se raccorder. Autrement, le coût de raccordement est souvent dissuasif.

Une analyse de sensibilité sur l'importance de ces clients a été faite en supprimant tous les EGID des bâtiments dont la puissance de raccordement est inférieure à 20 kW. Cependant, la puissance nécessaire aux bâtiments n'est pas une information disponible dans les géodonnées. Elle a été calculée en estimant une consommation à pleine charge sur 2000 h/an¹.

La différence de résultats sur la génération de zones propices n'est visible en comparant les cartes. Le même procédé a été appliqué en prenant une limite de 50 kW thermiques.

La réalisation des travaux de construction d'un réseau ne peut débuter que lorsque le rachat d'au moins 80% de l'énergie est garanti (c.à.d. des contrats signés avec les clients). Dans ce but, les plus gros consommateurs ainsi que ceux au plus près du départ des conduites sont démarchés en premier.

Le choix d'étudier les clients ayant un besoin de plus de 50 kW permet indirectement de modéliser l'intérêt des plus gros consommateurs du réseau.

La carte ci-dessous montre la répartition des consommateurs dans le canton de Vaud. Trois couches sont superposées : en dessous "Tous les consommateurs", puis "Consommateurs de plus de 20 kW" et tout dessus "Consommateurs de plus de 50 kW".

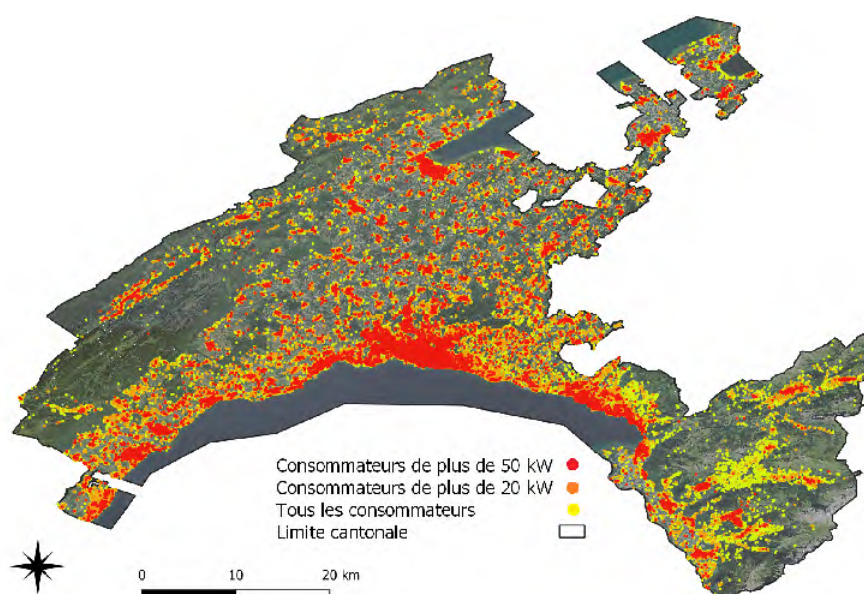


FIGURE 6.11 – Répartition des bâtiments (EGID) dans le canton de Vaud. Le jaune représente les bâtiments de 0 à 20 kW (65%), l'orange ceux entre 20 et 50 kW (21%) et le rouge ceux de plus de 50 kW (14%).

Les concentrations de gros consommateurs se situent dans les régions urbaines, là où l'on trouve le plus d'immeubles, donc en zones résidentielles.

1. Cette valeur est utilisée par CSD lors des estimations approximatives de puissance des bâtiments, également en accord avec la norme SIA 2024 (2070h à pleine charge pour le chauffage d'un bâtiment collectif).

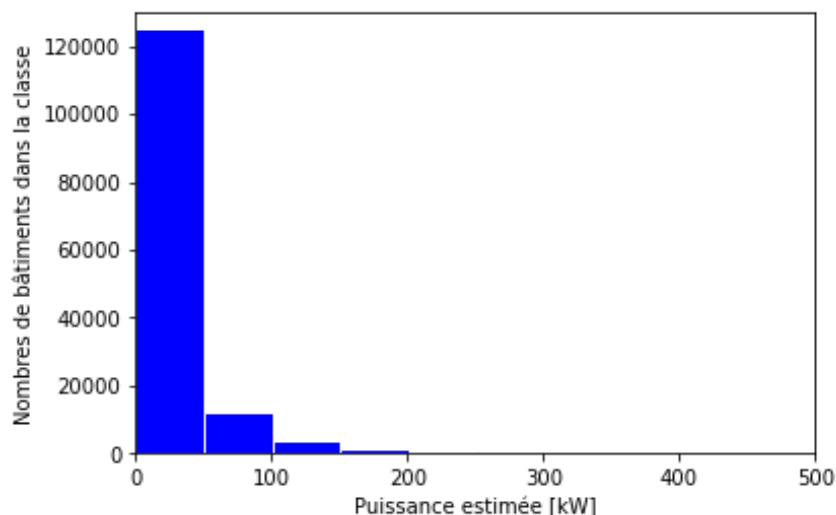
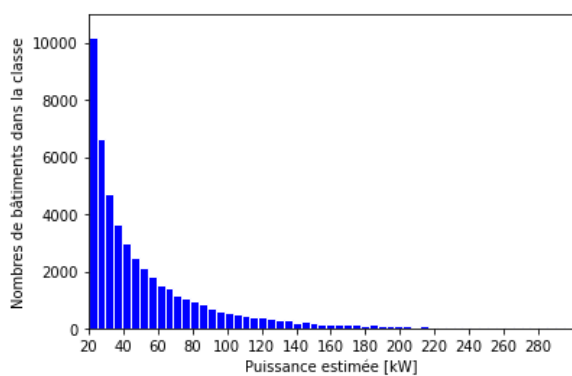
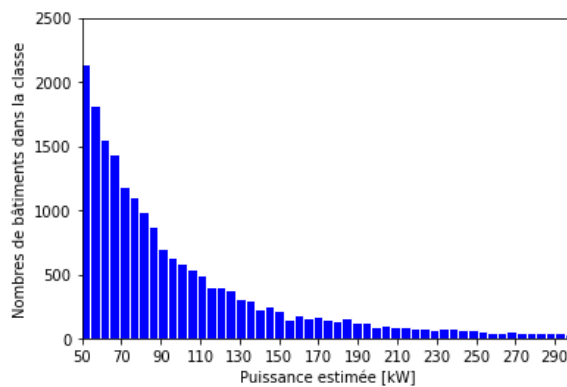


FIGURE 6.12 – Répartition des puissances des consommateurs en classes de 50 kW. La puissance maximale d’un bâtiment est de 5523 kW mais la différence entre les classes est tellement grande que les bâtiments avec une puissance de plus de 200 kW ne sont pas visibles dans l’histogramme.

La répartition des puissance est très inégale. Plus de 120’000 bâtiments ont une puissance comprise entre 0 et 50 kW. Les bâtiments ayant une puissance de plus de 200 kW ne sont pas visibles sur l’histogramme. Afin de mieux analyser l’histogramme, une focalisation sur les petites puissances a été réalisée. Par ailleurs, les puissances de moins de 20 kW, puis de moins de 50 kW, ont été supprimées dans les histogrammes suivants.



(a) Histogramme des bâtiments ayant une puissance de plus de 20 kW. Répartition par classes de 5 kW.



(b) Histogramme avec les bâtiments ayant une puissance de plus de 50 kW. Répartition par classes de 5 kW.

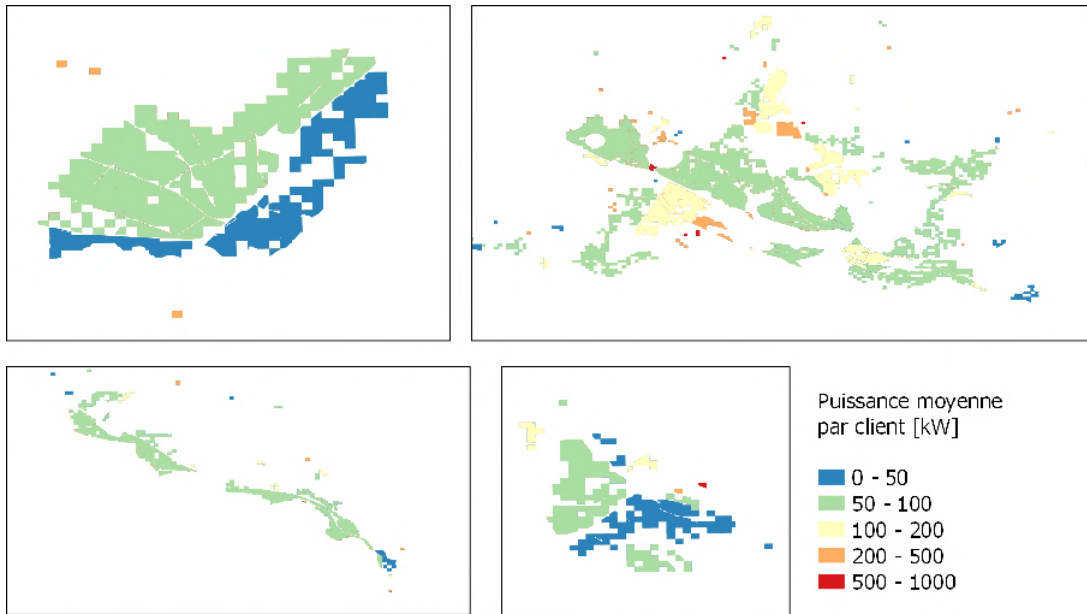
FIGURE 6.13 – Répartition des puissances des bâtiments du canton de Vaud selon des limites minimales de puissance.

La puissance moyenne² des bâtiments est un paramètre important. Une moyenne plus élevée permet de réduire le nombre de raccordements pour une puissance équivalente dans une zone.

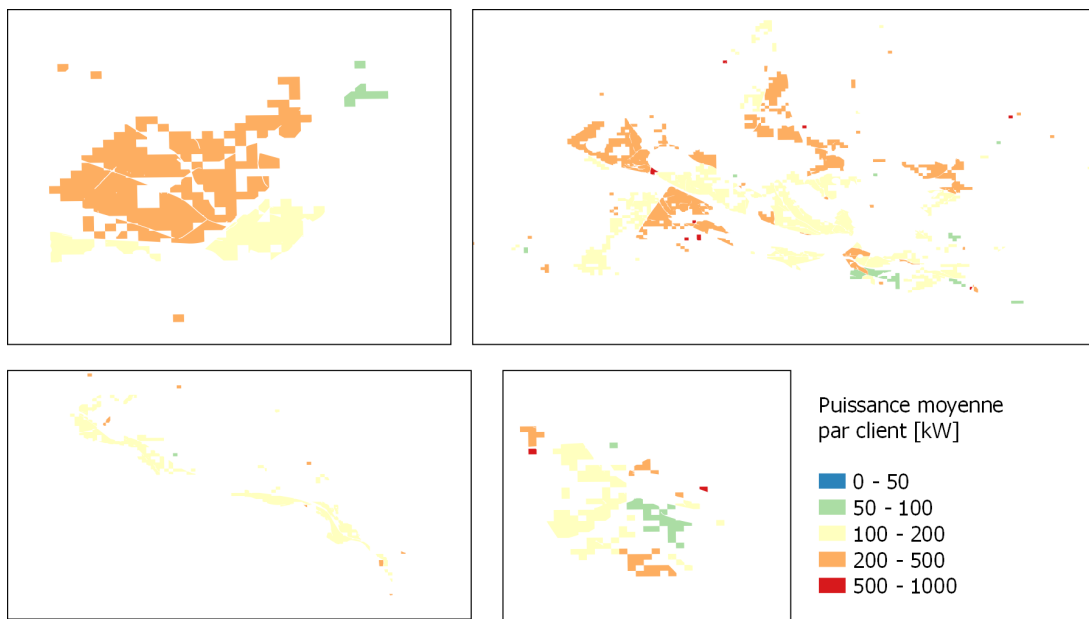
Les cartes ci-dessous montrent les puissances moyennes dans les polygones (figure 6.14) et dans les mailles (figure 6.15). La sous figure a) est le cas de base (tous les bâtiments) et la sous figure b) est le cas

2. La puissance maximale étant inconnue à ce stade.

où uniquement les clients de plus de 50 kW sont retenus.



(a) Cas de base

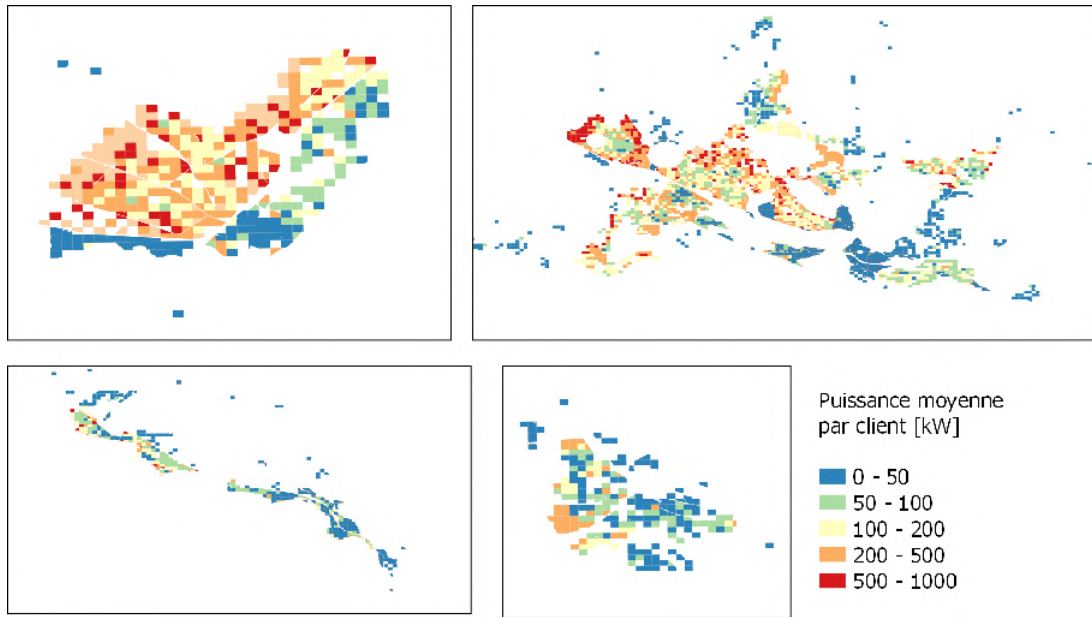


(b) Cas où les clients de moins de 50 kW ne sont pas considérés.

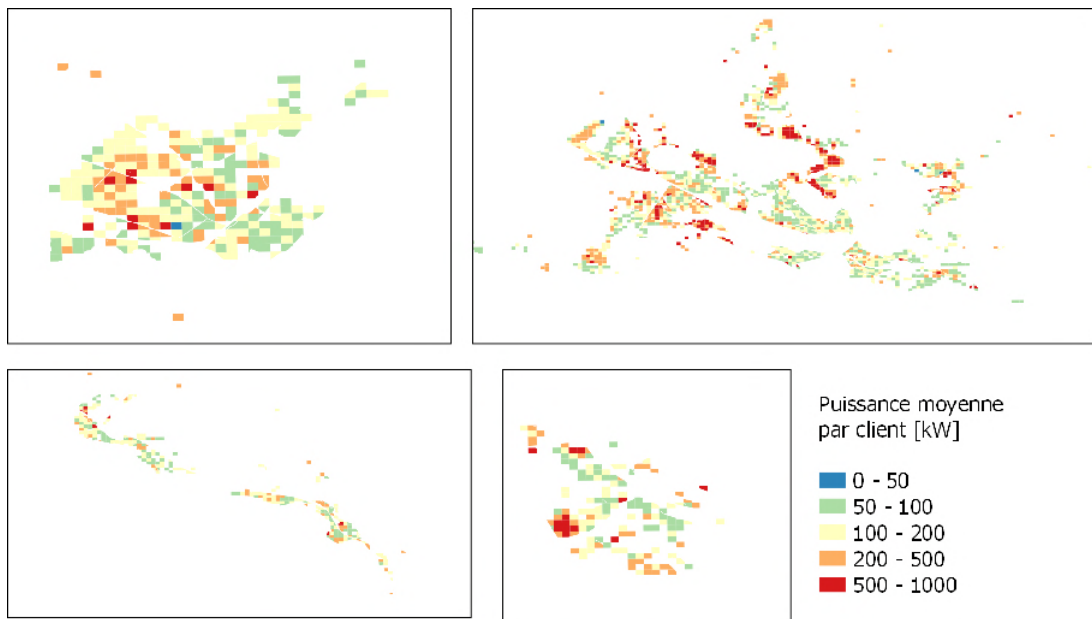
FIGURE 6.14 – Puissance moyenne de raccordement des clients dans chaque zones propices aux réseaux CAD (polygone).

La puissance moyenne est significativement plus élevée dans presque tous les polygones en comparaison avec le cas de base. Une petite partie de polygones voit sa surface diminuer en raison d'un manque de densité thermique. Les mailles qui ne sont plus agrégées sont celles qui représentaient principalement des petits consommateurs (comme des quartiers de villas par exemple).

Le même calcul est appliqué à chaque maille afin de différencier les variations de puissance moyenne dans une zone.



(a) Cas de base



(b) Cas où les clients de moins de 50 kW ne sont pas considérés.

FIGURE 6.15 – Puissance moyenne de raccordement des clients dans chaque maille des zones propices aux réseaux CAD.

La coloration des mailles fait ressortir les variations de puissance moyenne par maille. Une partie de ces dernières qui avaient une puissance moyenne de moins de 50 kW n'ont pas été retenues. La puissance moyenne de presque toutes les mailles a augmenté. Les mailles les plus intéressantes, c'est-à-dire celles avec une puissance moyenne élevée, sont mises en avant, alors que les mailles moins intéressantes disparaissent.

6.2.1 AFFINEMENT DES ZONES PROPICES

A la suite des commentaires faits dans la section précédente, un affinement des zones propices a été réalisé. Pour cela, une suite de restrictions a été appliquée sur les polygones ainsi que sur les mailles des zones propices³ :

- Chaque maille doit avoir au moins 1 bâtiment dont la puissance demandée dépasse 50 kW
- La densité minimale d'une maille est de 100 MWh/ha/an
- Les bâtiments retenus ont une puissance demandée d'au moins 50 kW
- Les polygones ont au moins 5 bâtiments
- La densité moyenne minimale d'un polygone est de 800 MWh/ha/an
- La surface minimale d'un polygone est de 1 hectare

Les restrictions mènent à la suppression de polygones et de mailles qui étaient auparavant jugées propices aux réseaux CAD. La restriction aux bâtiments ayant une puissance d'un moins 50 kW a fait que seuls 14% des bâtiments sont retenus mais cela n'a que peu d'effet sur les polygones vu que 94% des polygones du cas de base sont conservés. Cela confirme la faible importance des petits consommateurs dans les CAD. La limite minimale de 1 hectare pour un polygone a permis d'enlever 137 polygones, de 1 hectare ou moins, qui étaient retenus par l'algorithme, soit environ 45% des polygones du cas de base. Ce choix permet de conserver que les polygones les plus importants (96% de la surface). La limite de 100 MWh/an par maille et celle du minimum de 5 clients par polygone permettent d'affiner les zones mais ont des effets moins importants. Le regroupement de ces données a permis de trouver les zones suivantes :

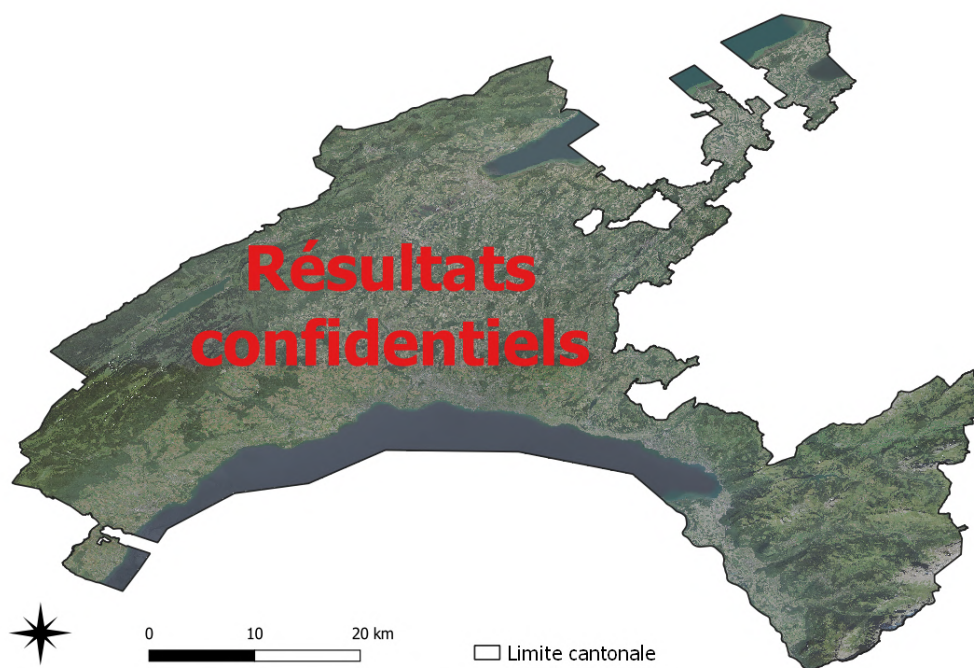


FIGURE 6.16 – Densité énergétique moyenne des polygones en MWh/ha/an après affinement des zones propices.

3. Certaines restrictions proviennent de l'algorithme de base mais sont rappelées ici.

La figure 6.17 ci-dessous s'intéresse à quatre régions plus précises.

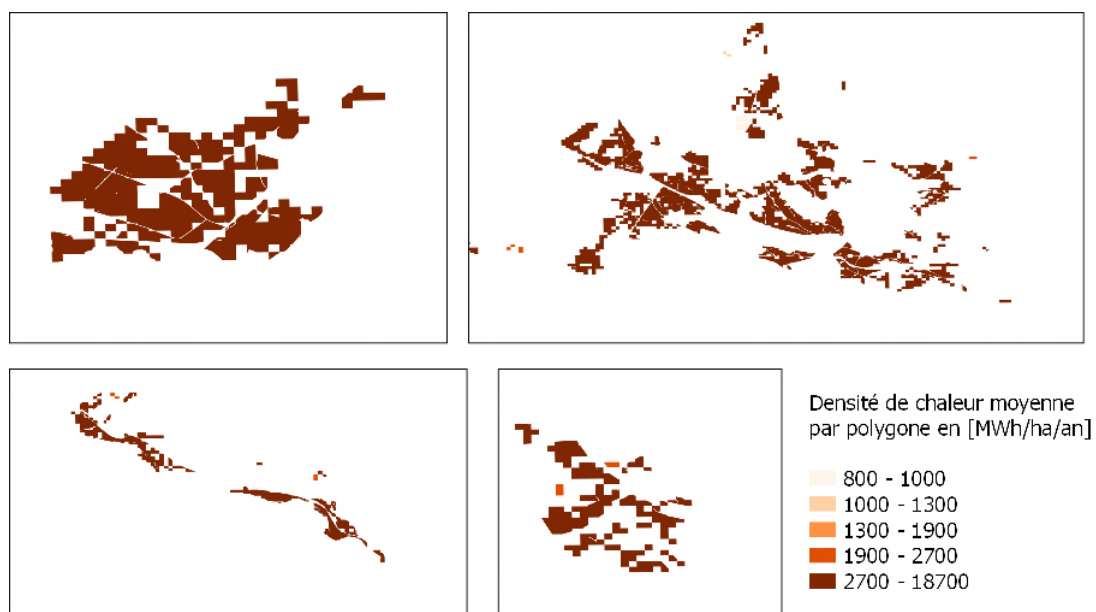


FIGURE 6.17 – Zoom sur quatre régions intéressantes de la figure 6.16

La différence de densité thermique avec le figure 6.3 est visible. La suppression des bâtiments ayant une demande trop faible ainsi que la suppression des mailles peu intéressantes a fortement augmenté la densité thermique des zones propices.

L'augmentation de la densité se voit aussi bien sur les cartes détaillées par mailles.

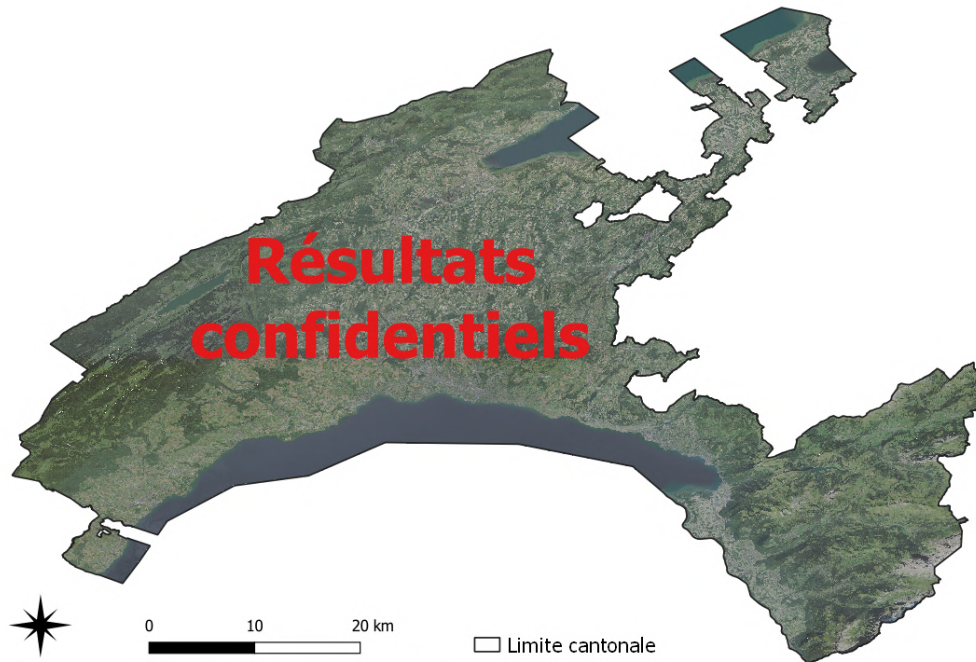


FIGURE 6.18 – Densité énergétique moyenne des mailles en MWh/ha/an après affinement des zones propices.

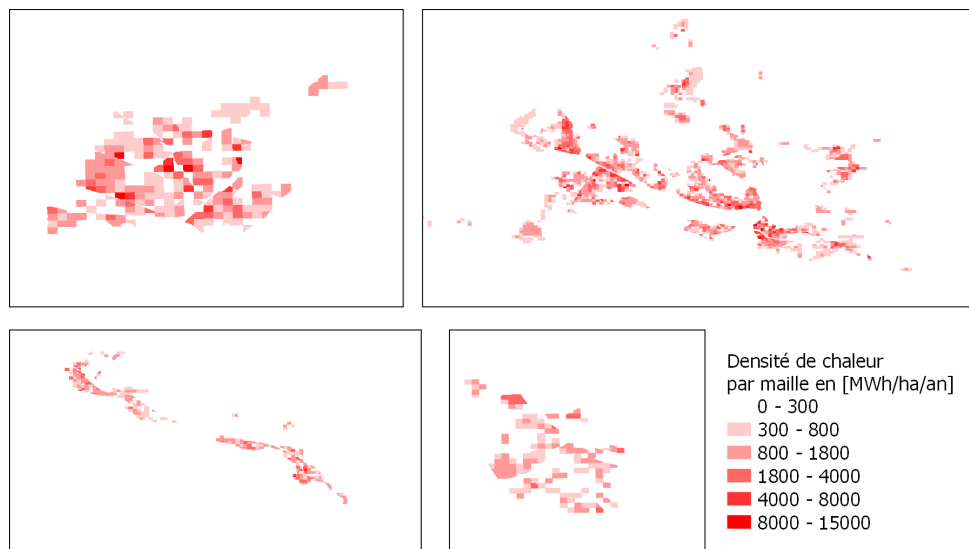


FIGURE 6.19 – Zoom sur quatre régions intéressantes de la figure 6.18

La même symbologie a été employée pour les cartes de bases (avant affinement des recherches 6.7 et 6.8) et pour les figures ci-dessus (6.18 et 6.19). La coloration générale est plus foncée que dans les figures 6.7 et 6.8. La densité thermique d'une maille est soit inchangée, soit inférieure car des bâtiments avec une demande de moins de 50 kW ont été ignorés. Certaines mailles peu denses ne sont plus retenues.

6.3 CONTRAINTES INCERTAINES

Les contraintes incertaines donnent des informations sur des facteurs qui pourraient compliquer la réalisation d'un réseau CAD. Ces informations ont été reportées dans les données des polygones (à part la profondeur de sol meuble qui peut varier énormément selon la localisation précise).

Des zones où des installations techniques liées au réseau CAD sont disponibles dans la plupart des polygones. Ceux qui n'en ont pas sont souvent des petits polygones. La figure 6.20 ci-dessous montre les polygones disposant de ces zones acceptant des installations techniques (en vert) et ceux qui n'en n'ont pas (en rouge).

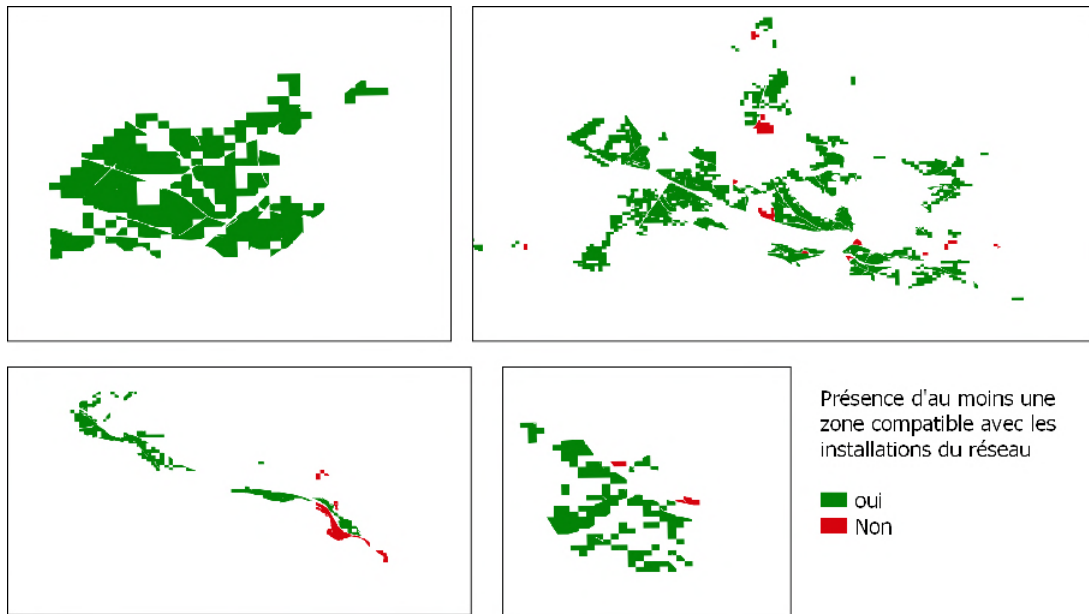


FIGURE 6.20 – Polygones disposant de zone compatibles avec les installations techniques (vert) et ceux n'en n'ayant pas (rouge).

A l'exception de trois polygones de plus de 10 ha, tous les autres sans zone d'installation technique sont de petits polygones (5 hectares ou moins). Il est tout à fait imaginable d'installer une petite sous-station dans un bâtiment et d'alimenter ainsi les autres bâtiments du réseau.

L'indice concernant les possibles complications de passage des conduites dans les propriétés privées est illustré par la figure. 6.21 ci-dessous.



FIGURE 6.21 – Distances de périmètres des parcelles cumulées et réparties sur la surface du polygone.

Les endroits potentiellement les plus problématiques par rapport aux zones d'installations techniques se situent souvent dans les centres-villes, caractérisés par le peu d'espacement entre bâtiments.

Les faibles épaisseurs de sol meuble sont globalement assez rares dans les polygones retenus.

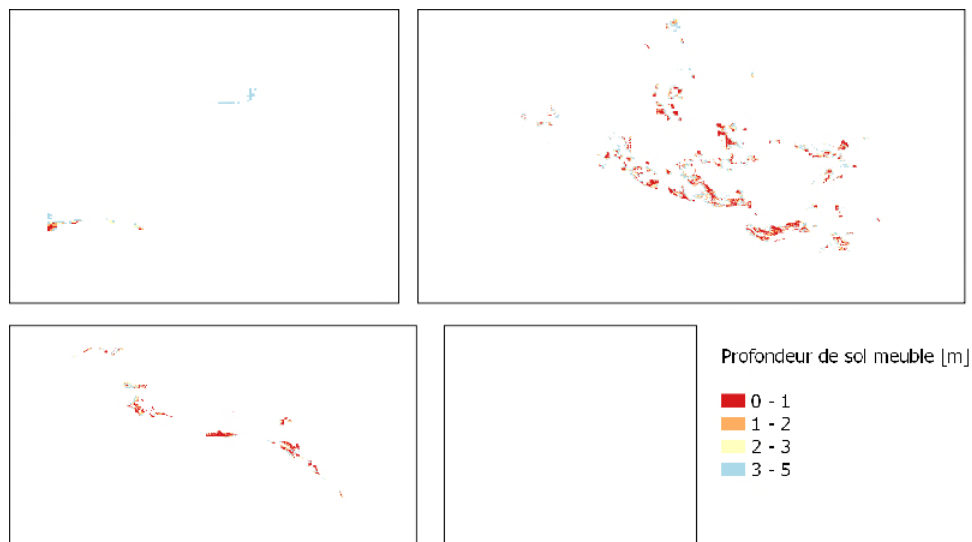


FIGURE 6.22 – Épaisseur de sol meuble dans les polygones. Selon le modèle utilisé, l'épaisseur de sol meuble atteint 900m au maximum.

Les endroits problématiques apparaissent en rouge ou en orange. Dans les régions principales, les zones ayant une faible profondeur de sol sont peu nombreuses. Il est intéressant de noter que la plupart des polygones en zones problématiques se situent dans des pentes (plus faibles que 25°).

CHAPITRE 7

DISCUSSION

Ce travail de Master avait comme but de reprendre la méthode utilisée dans l'étude *Perspectives chaleur* et d'en faire une nouvelle version permettant d'identifier et de localiser précisément des zones propices aux réseaux CAD.

Les résultats obtenus après l'affinement des contraintes ont permis de mettre en évidence 129 polygones, soit 129 potentiels réseaux CAD, sur l'ensemble du territoire du canton de Vaud. La majorité de ces réseaux potentiels est regroupée dans quatre agglomérations du canton, le reste étant dispersé sur l'ensemble du territoire. L'étude plus détaillée des résultats permettra de présenter aux communes de potentiels réseaux CAD qui alimenteraient les bâtiments en chaleur renouvelable.

Ce travail présente plusieurs limitations en termes de méthodologie, fiabilité des données et choix des contraintes de l'algorithme - l'impact de ces limitations est discuté comme suit.

7.1 LIMITES DE LA MÉTHODOLOGIE

La méthodologie développée et appliquée au cas du canton de Vaud est, en théorie, généralisable à d'autres cas. En fonction des données à exploiter et de la superficie à analyser, des ajustements mineurs des paramètres d'entrée du modèle peuvent être nécessaires afin d'obtenir des résultats cohérents.

Les limites de la méthodologie utilisée dans ce projet sont principalement dues à la recherche de zones considérées comme propices à "grande échelle". Les réseaux thermiques sont uniques - leur conception et dimensionnement ne sont pas uniformes, car ils dépendent du type et du nombre de clients à raccorder, de la zone géographique, des caractéristiques des bâtiments à raccorder, etc.

Par exemple, un réseau alimentant un nouveau quartier d'immeubles n'aura pas la même architecture qu'un réseau alimentant un vieux bourg, en raison des possibilités restreintes de passage des conduites dans les anciens milieux bâtis. Une recherche de zones propices avec des paramètres communs pour l'intégralité d'un canton n'est donc pas pertinente.

L'utilisation d'un algorithme simplifie la recherche de zones, mais peut mener à des résultats non-optimisés. Par exemple, la possibilité d'agréger des mailles ayant une faible demande en chaleur, tant que la moyenne de la demande thermique du polygone est au-dessus de la limite fixée (800 MWh/ha), permet de raccorder de nouvelles mailles géographiquement proches mais non-adjacentes. Cette règle est généralement bénéfique mais mène parfois à un agrandissement non-pertinent des polygones. Afin d'améliorer ce point faible de l'algorithme, il faudrait fixer une limite de densité thermique par maille considérée, par exemple 300 MWh/ha. Ainsi, deux zones propices géographiquement proches, non reliées

par des mailles ayant une densité de plus de 300 MWh/ha, formeraient deux polygones à la place d'un seul avec une demande négligeable.

L'algorithme a déterminé les zones propices aux réseaux CAD selon les règles imposées, telles que listées dans la méthodologie. Ces zones repérées sont prometteuses, et constituent une première base de données à analyser plus en détails. Toutefois, il ne faut pas se limiter uniquement aux surfaces qui ont été détectées par application d'un modèle mais également étudier les abords des zones trouvées.

De plus, le choix des dimensions de mailles influence les résultats. Des mailles hectométriques ont été choisies car elles permettent d'avoir une précision suffisante pour localiser les zones propices. La sélection de mailles plus fines augmente quadratiquement le temps de calcul. Une granularité de mailles plus élevée serait pertinente pour un périmètre d'étude plus restreint, comme par exemple pour une agglomération ou une ville. Cependant, le choix d'un maillage trop fin est également problématique car les bâtiments ne sont pas contigus. Un exemple est disponible dans l'Annexe E Figure xii avec un maillage de 50x50m et des bâtiments ayant une puissance thermique de plus de 50 kW, avant affinement des résultats¹. Les mailles sont souvent trop petites pour former un grand polygone à cause des espaces vides entre les bâtiments.

7.2 LIMITES LIÉES À LA QUALITÉ DES DONNÉES DE TRAVAIL

Les données de consommation des bâtiments utilisées dans le modèle sont jugées réalistes, en se basant sur l'expérience de CSD, mais leurs valeurs ne sont pas exactes. Par exemple, la consommation de certains bâtiments n'était pas connue et a donc dû être estimée, ou était jugée incohérente, et a donc dû être corrigée. Toute la modélisation énergétique s'est faite sur la base de la consommation d'énergie. En effet, les autres types de données ne sont pas complets ou suffisamment fiables. Les valeurs des puissances proviennent d'estimations du temps de fonctionnement à pleine charge.

Ces lacunes peuvent être partiellement corrigées en confrontant plusieurs sources de données. Par exemple, Minergie possède les données de consommation des bâtiments labellisés. Cette source n'a pas été utilisée dans ce projet car elle était payante et n'aurait pas amené d'amélioration déterminante.

Les informations sur les réseaux existants ou planifiés sont difficiles à obtenir à grande échelle. Les données sur les réseaux thermiques existants permettent d'identifier le centre du réseau en un seul point, mais ne fournissent aucune information ni sur les zones de dessertes ni sur les réseaux projetés. La seule manière d'obtenir ces informations est de vérifier avec chaque commune si un réseau est prévu sur son territoire.

Il serait intéressant d'étudier les sources d'énergie actuellement utilisées ainsi que l'âge des systèmes de chauffage. Le raccordement d'un quartier fonctionnant principalement avec des énergies fossiles (gaz et mazout) est plus probable que le raccordement d'un quartier récent ayant déjà des systèmes de chauffage émettant peu de CO₂ (cas des chaufferies fonctionnant au bois-énergie). De plus, la Confédération et/ou les cantons subventionnent le raccordement à un réseau CAD, si ce dernier permet aux particuliers de ne plus utiliser des sources carbonées telles que le gaz naturel ou le mazout.

Les données concernant les agents énergétiques, l'âge des chaudières et d'autres informations relatives au chauffage proviennent des données communales. De ce fait, l'exactitude des données, voire même leur existence, varie selon les communes et ces données ne sont pas disponibles pour l'intégralité du canton. Cependant, il serait tout à fait imaginable de se servir de ces données à une plus petite échelle dans des zones où ces dernières sont disponibles et fiables.

En fonction de l'horizon d'étude choisi, il sera nécessaire de prendre en compte la durée de vie moyenne des chaudières.

1. L'affinement des résultats utilisé précédemment aurait supprimé tous les réseaux de moins de 1 hectare, soit la majorité des polygones dans cet exemple

7.3 LIMITES LIÉES AUX CONTRAINTES DE L'ALGORITHME

L'utilisation des contraintes dans l'algorithme de simulation a été déterminante pour affiner la sélection de zones propices au développement de réseaux CAD. Néanmoins, au vu de l'impact de chaque contrainte sur la surface du périmètre d'étude, il est nécessaire de considérer l'évolution de ces contraintes dans l'étude des zones propices aux CAD.

Les contraintes définies sont considérées comme restrictives et permettent donc de cibler les zones les plus prometteuses pour l'intégration des réseaux CAD. Une fois que toutes les zones déterminées auront été étudiées, il faudra adapter les contraintes afin de trouver de nouvelles zones. Les contraintes légales sont obligatoires, mais les autres relèvent d'un choix personnel. En adaptant certaines contraintes, il est possible d'augmenter les surfaces ainsi que le nombre de zones propices. Par exemple, il est envisageable d'augmenter la pente maximale, de dépolluer un site, d'accepter de traverser de plus grandes routes ou des rivières. Toute modification peut augmenter la surface d'analyse de l'algorithme.

Le choix et l'impact des contraintes dépend fortement de la qualité des données de base utilisées dans le modèle. La première étape est la bonne compréhension des données. Les portails cartographiques disposent de grandes bases de données dans lesquelles les données pertinentes pour le travail effectué doivent être identifiées. Afin d'en faire un bon usage, il est primordial d'investir le temps nécessaire pour les comprendre. Une adaptation des données est parfois recommandée car la façon dont elles ont été créées n'est pas nécessairement compatible avec l'utilisation souhaitée dans cette recherche. Plusieurs exemples sont présentés comme suit, notamment sur les routes, la hauteur de nappe, l'aspect privé de certaines parcelles, et les projets communaux.

En prenant l'exemple des routes, une grande route séparée au centre par une petite bande herbeuse apparaît dans les données du canton comme deux petites routes et ne sera pas relevée comme contrainte². Les découpes, selon la largeur de la route, sont parfois peu rigoureuses, ce qui peut être causé par une reconnaissance automatique des objets à partir d'images prises par des satellites. De ce fait, la taille de la route peut varier significativement. En choisissant les contraintes selon la largeur de route, cela crée des "ruptures" de la contrainte par endroit lorsque la route se rétrécit.

HAUTEUR DE NAPPE

La présence d'eau dans le sol complique les travaux. La pose de palplanches et le pompage d'eau sont nécessaires afin de pouvoir travailler hors de l'eau. Il existe des zones où l'eau est présente dès le premier mètre. Malheureusement cette information est difficilement cartographiable. De plus, la hauteur des nappes varie selon la saison, l'année et l'évolution des conditions climatiques.

PROPRIÉTÉ DES PARCELLES PRIVÉES

Le passage des conduites dans des parcelles privées est possible mais nécessite souvent de longues démarches administratives afin d'obtenir l'accord du propriétaire. De manière générale, il est préférable d'éviter les parcelles privées pour le passage des conduites principales.

Afin de modéliser cette problématique, il serait intéressant de connaître les parcelles détenues par des privés et celles détenues par les communes ou par d'autres propriétaires publics. L'étude du cadastre a révélé que les parcelles sont classées dans trois catégories :

- Domaine public cantonal ;
- Domaine public communal ;
- Parcelles privées.

2. S'il n'y avait pas la séparation en herbe ce serait une contrainte.

Le domaine public correspond uniquement aux routes et à leurs abords. Les parcelles privées englobent tout le reste du territoire. Les parcelles communales sont classifiées dans les parcelles privées avec comme propriétaire la commune.

Le nombre de parcelles privées à traverser rallonge les démarches administratives, car des négociations avec un plus grand nombre de propriétaires entraîne des procédures plus longues et complexes.

Un indice de densité de parcelles à l'hectare pourrait évaluer indirectement les complications dues au passage du réseau dans des propriétés privées. Cet indicateur n'exclut pas une zone, mais indique les zones avec le moins de parcelles et donc un plus faible nombre de propriétaires à convaincre.

Malheureusement, la liste des propriétaires est une donnée confidentielle que le registre foncier ne peut pas transmettre. Cette contrainte a été remplacée par la distance de périmètre de parcelles par hectare.

PROJETS COMMUNAUX

Les projets communaux sont très importants dans la réalisation d'un réseau thermique mais ils sont toutefois très difficiles à connaître avant d'avoir contacté les communes. Il serait possible de les inclure dans l'étude à l'aide de démarches auprès de chaque commune lors d'étude sur des périmètres plus petits que celui du canton de Vaud. Il est inutile de s'intéresser à une zone où un projet de CAD est déjà en cours. Par exemple, une partie des zones propices se situant à "Localisation 5" sont à abandonner à cause du réseau "Réseau 5" déjà en construction.

Les plans directeurs communaux influencent également la réalisation d'un CAD (positivement ou négativement). La réfection récente d'une route compromettra probablement le passage des conduites car il est peu probable qu'une commune accepte qu'une route neuve soit ouverte. Les travaux sont à coordonner avec la commune. De plus, la synchronisation de la réfection d'une route avec la construction d'un CAD diminue les coûts du génie civil.

ZONES D'INSTALLATION DES ÉQUIPEMENTS TECHNIQUES

Les zones pour l'installation d'équipements techniques indiquent la présence de zones potentiellement disponibles. Néanmoins, cela ne signifie en aucun cas que la zone est disponible pour les installations du réseau. L'absence de zones d'installation est une information importante. En effet, cela signifie que la recherche d'un emplacement pour les installations techniques sera probablement compliquée.

7.4 PERSPECTIVES

La suite du projet consistera à se pencher sur les zones propices trouvées et à les étudier plus en détails. Si l'étude d'une zone montre que, comme souhaité, il est possible de créer facilement un réseau thermique, un projet adéquat sera développé. Si l'étude met en avant de nouvelles contraintes, il faudra réfléchir à un moyen de les identifier plus en amont et, si possible, de les intégrer à l'algorithme développé.

Comme expliqué précédemment, une fois toutes les zones étudiées, il sera possible de rendre les contraintes moins fortes afin de faire apparaître de nouvelles zones à étudier. L'application de l'algorithme à d'autres cantons est également souhaitée afin d'encourager le développement des réseaux renouvelables à l'échelle nationale. Il est même envisageable d'étudier des régions dans d'autres pays.

CHAPITRE 8

CONCLUSION

L'objectif de ce projet de Master était de reprendre la base de l'étude *Perspectives chaleur* et de répondre à la problématique suivante : comment pouvons-nous identifier les zones propices au développement des réseaux de chaleur à distance ?

La mise en commun des connaissances de différents domaines, à savoir le domaine de l'énergie thermique et le domaine des systèmes d'informations géographiques, a permis de répondre à cet objectif par la création d'un algorithme choisissant les zones exemptes de contraintes avec une forte demande en chaleur. L'algorithme a été appliqué au cas du canton de Vaud en 2035.

La recherche de zones propices aux réseaux thermiques a permis de trouver, dans le cas d'étude choisi, une centaine de zones dans lesquelles la création de réseaux CAD devrait pouvoir se réaliser sans difficulté, dans un intervalle de temps relativement court.

Le périmètre de recherche étant étendu et non-homogène, des paramètres généraux ont dû être choisis. En adaptant les paramètres à de plus petits périmètres, il est possible d'identifier de nouvelles zones propices. De plus, les paramètres ont été définis dans le but d'isoler un nombre restreint de zones, c'est-à-dire qu'ils sont plus restrictifs que nécessaire. L'outil SIG sera donc utile pour générer de nouveaux scénarios.

Les réseaux thermiques renouvelables sont en plein développement. La méthodologie utilisée ouvre les portes à la recherche de zones favorables à des réseaux de chauffage renouvelable dans toute la Suisse. Plus généralement, l'outil est utilisable sur presque n'importe quel périmètre d'étude.

Les initiatives des entreprises dans le domaine des réseaux thermiques pour proposer des projets aux clients ne sont pas coutumières, toutefois nécessaires pour accélérer la transition énergétique. En effet, il n'est plus possible d'attendre que les clients demandent spontanément un mode de chauffage renouvelable. La participation des ingénieurs en environnement et en énergie est nécessaire pour faire baisser les émissions de CO₂ dans les secteurs de conversion d'énergie et production de chaleur. Le défi est de taille, mais les initiatives comme celle-ci le rendent plus facilement réalisable.

REMERCIEMENTS

Je remercie le Professeur François Golay du Laboratoire de systèmes d'information géographiques (LASIG) et Vincent Vuilleumier de l'équipe énergie de CSD Ingénieurs pour leur encadrement tout au long de ce projet de Master.

Je souhaite également remercier toute la formidable équipe énergie de CSD Ingénieurs, Bastien, Daniel, Emilie, Eloïse, Fabrice, Lucas, Martin, Marnie, Nicole, Phidias Sandrine et Vincent, pour leur chaleureux accueil, leur aide, la bonne humeur et les bons moments passés ensemble.

Un grand merci à mes parents qui m'ont soutenu tout au long de mes études.

Enfin, je souhaite remercier tous mes ami(e)s, dont notamment Alain, Edouard, Gloria, Gwenaëlle, Julien, les Lucas, les Raphaël, Sara, Simon, Tivi et toute l'équipe du SKIL, avec qui j'ai partagé de superbes moments lors de mes années à l'EPFL.



FIGURE 8.1 – Coucher de soleil lors de Vivapoly 2022, ma dernière édition en tant qu'étudiant.

RÉFÉRENCES

- [1] OFEN, « Statistique Globale Suisse de l'énergie 2020, » Office fédérale de l'énergie, rapp. tech., 2020.
- [2] ———, *Qu'est-ce que la Stratégie énergétique 2050 ?* <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/politik/energiestrategie-2050/was-ist-die-energiestrategie-2050.html>, mars 2020.
- [3] D. GASSER et V. VUILLEUMIER, « Perspectives chaleur Perspectives de valorisation du potentiel de chaleur renouvelable du canton de Vaud, » CSD Ingénieurs SA, rapp. tech., juill. 2021, p. 103.
- [4] *Conception cantonale de l'énergie*, juin 2019.
- [5] *Perspectives chaleur | VD.CH*, <https://www.vd.ch/themes/environnement/energie/energies-renouvelables-bois-hydraulique-geothermie-profonde-energies-eolienne-et-solaire/perspectives-chaleur/>, 2021.
- [6] T. NUSSBAUMER, S. THALMANN, A. JENNI et J. KÖDEL, *Guide de planification Chauffage à distance*, oct. 2018.
- [7] D. GASSER, *Réseaux énergétiques : typologies et bons choix*, MS Teams, mars 2022.
- [8] J. CHAMBERS, K. NARULA, M. SULZER et M. K. PATEL, « Mapping district heating potential under evolving thermal demand scenarios and technologies : A case study for Switzerland, » *Energy*, t. 176, p. 682-692, juin 2019, ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2019.04.044.
- [9] G. OPPERMAN, O. ARNOLD, J. KÖDEL, M. BÜCHLER et M. JUTZELER, *Guide Chauffage à distance / froid à distance*, août 2018.
- [10] SIA, *Besoins de chaleur pour le chauffage*, 2016.
- [11] ———, *Performance énergétique des bâtiments - Méthode de calcul de la charge thermique nominale - Partie 1 : Charge de chauffage des locaux, module M3-3*, 2017.
- [12] A. SRES, *Livre blanc, le chauffage à distance en Suisse – Stratégie ASCAD*, mars 2014.
- [13] *Couplage chaleur-force (CCF) – energie-environnement.ch*, <https://www.energie-environnement.ch/maison/renovation-et-chauffage/installations/couplage-chaleur-force-ccf>.
- [14] D. GASSER et V. VUILLEUMIER, *Des outils de traitement des géodonnées au service de la planification énergétique*, MS Teams, mars 2022.
- [15] *QB Series - High Efficiency Computing Clusters*, <https://qarnot.com/fr/produits/infrastructure/qb>, 2022.
- [16] S. WILL, « Integration of ICT's Heat Production in the Building Stock of Smart Building Designer, » Lausanne, Projet Du Mineur Énergie EPFL, juin 2021.
- [17] J. CHAMBERS, S. ZUBERI, M. JIBRAN, K. NARULA et M. K. PATEL, « Spatiotemporal analysis of industrial excess heat supply for district heat networks in Switzerland, » *Energy*, t. 192, p. 116 705, fév. 2020, ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2019.116705.
- [18] T. ACKERMANN, G. KUZA, C. PASQUIER, A. MARGUERON et P.-A. KREUTSCHY, *Les eaux usées comme élément clé de la stratégie énergétique*, https://www.aquaetgas.ch/fr/energie/chaleur-à-distance/20210427_thermoreseaux-utilisant-la-chaleur-rejetée-par-la-step/, avr. 2021.
- [19] « Quantifying the Technical Geothermal Potential from Shallow Borehole Heat Exchangers at Regional Scale, » *Renewable Energy*, A. WALCH, N. MOHAJERI, A. GUDMUNDSSON et J.-L. SCARTEZZINI, éd., 2020. DOI : 10.1016/j.renene.2020.11.019.

- [20] J. W. LUND et A. N. TOTH, « Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review, » *Geothermics*, t. 90, p. 101 915, fév. 2021, ISSN : 0375-6505. DOI : 10.1016/j.geothermics.2020.101915.
- [21] G. OPPERMAN, O. ARNOLD, J. KÖDEL, M. BÜCHLER et M. JUTZELER, *Guide Chauffage à distance / froid à distance*, août 2018.
- [22] A. GIRARD, E. J. GAGO, T. MUNEER et G. CACERES, « Higher ground source heat pump COP in a residential building through the use of solar thermal collectors, » *Renewable Energy*, t. 80, p. 26-39, août 2015, ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2015.01.063.
- [23] J. UNTERNÄHRER, S. MORET, S. JOOST et F. MARÉCHAL, « Spatial clustering for district heating integration in urban energy systems : Application to geothermal energy, » *Applied Energy*, t. 190, p. 749-763, mars 2017, ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2016.12.136.
- [24] C. REIDHAV et S. WERNER, « Profitability of sparse district heating, » *Applied Energy*, t. 85, n° 9, p. 867-877, sept. 2008, ISSN : 0306-2619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2008.01.006.
- [25] O. REICHMUTH et A. HURNI, « Jahresbericht 2020 Verband Fernwärme Schweiz, » fernwärme, Berne, rapp. tech., mars 2021.
- [26] « Perspectives énergétiques 2050+, rapport succinct, » OFEN, rapp. tech., 26 novembre 2020, p. 112.
- [27] M. SULZER et K. OREHOUNIG, « Konzepte für die nächste Generation von technischen Regulierungen im Bereich Gebäude und Energie, Energiewende und Technische Regulierung EnTeR – Schlussbericht Phase 1, » EMPA, ETH Zürich, Hochschule Luzern, rapp. tech., jan. 2020.
- [28] *Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC) version 2014*, avr. 2018.
- [29] A. WALCH, R. CASTELLO, N. MOHAJERI, A. GUDMUNDSSON et J.-L. SCARTEZZINI, « Using Machine Learning to estimate the technical potential of shallow ground-source heat pumps with thermal interference, » *Journal of Physics : Conference Series*, t. 2042, n° 1, p. 012 010, nov. 2021, ISSN : 1742-6596. DOI : 10.1088/1742-6596/2042/1/012010.
- [30] J.-M. LAVANCHY et F. ROGNON, « Evaluation Du Potentiel Géothermique Exploitable Des Nappes Phréatiques Dans Le Canton de Vaud, » CSD Ingénieurs SA, rapp. tech., juill. 2017, p. 113.
- [31] *Géodonnée - Cadastre de Géothermie Profonde*, <https://viageo.ch/catalogue/donnee/201231>, mai 2022.
- [32] *Géodonnée - Cadastre de Géothermie Basse Température*, <https://viageo.ch/catalogue/donnee/201086>, mars 2022.
- [33] S. WILL et G. SALAMIN, « Évaluation Du Potentiel de Développement de Réseaux Thermiques Combinés Aux Réseaux d'irrigation Par Pompage Des Eaux Des Lacs de Neuchâtel, Bienne et Morat, » EPFL, rapp. tech., juin 2020.
- [34] *Prélèvements | Les 3 Lacs : : Die 3 Seen*, 2014.
- [35] *Géodonnée - Stations d'épuration (STEP)*, <https://viageo.ch/catalogue/donnee/9605>, jan. 2019.
- [36] *Géodonnée - Cadastre Des Rejets de Chaleur*, <https://viageo.ch/catalogue/donnee/201353>, jan. 2019.
- [37] « Stratégie Bois-Énergie du Canton de Vaud, » Direction générale de l'environnement, rapp. tech., sept. 2017, p. 21.
- [38] M. MEGHARI, C. PAHUD et P. GURNY, *Modèle de Géodonnées Minimal - Densité Thermique - Documentation Sur Les Modèles*, fév. 2018.
- [39] S. COZZA, *Data-driven assessment of the Energy Performance Gap in residential buildings in Switzerland and implications for retrofit strategies*, Défense de Phd, Genève, mai 2022.
- [40] O. MEUWLY, M.-F. GOY, C. MARTIN, J.-M. MARTIN et A. MOREAU, « Vaud 2035 - Rapport de La Commission de Prospective, » Rapport de La Commission de Prospective, juin 2017.
- [41] SIA, *SIA 380/1 :2016 Construction - Besoins de chaleur pour le chauffage*.
- [42] OFEV, *Parc National Suisse*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/d1359dad-6edf-4275-ada0-2e33be8945b2/tab/complete, jan. 2001.

- [43] —, *Réserves de Biosphère*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/c212a19c-6e06-4ca4-bdee-3ec62ccd7b1e/tab/complete, jan. 2017.
- [44] —, *Convention Relative Aux Zones Humides d'importance Internationale, Particulièrement Comme Habitats Des Oiseaux d'eau (Convention de Ramsar)*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/d960a5c8-44e4-4d10-a9f6-95f58568563c/tab/complete, fév. 2005.
- [45] —, *Inventaire Fédéral Des Districts Francs Fédéraux (y Compris Réseau d'itinéraires) - Districts Francs*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/200a2d0e-afe1-45d8-aeaf-ea3621cc6afe/tab/complete, jan. 2014.
- [46] —, *UNESCO Sites Naturels*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/4a571da5-c3af-47fe-99a1-f33fc29d1cd9/tab/complete, juill. 2008.
- [47] —, *Réserves Forestières*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/4b9ff750-3e52-43e9-80d1-c07c59c469fd/tab/complete, déc. 2019.
- [48] —, *Sites Emeraude*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/d31b13f3-f68f-4432-a1f8-5344046c2dd2/tab/complete, sept. 2009.
- [49] P. NATURA, *Pro Natura : Réserves Naturelles*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/db4b251f-d431-457d-9ed6-4abf59d2a54a/tab/complete, déc. 2017.
- [50] —, *Pro Natura : Réserves Forestières*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/8a69330f-c6db-4c56-bedc-d244542ad86c/tab/complete, déc. 2019.
- [51] OFEV, *Inventaire Fédéral Des Paysages, Sites et Monuments Naturels (IFP)*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/bc3f1564-1e56-44e9-98b6-f0d8c5130410/tab/complete, juin 2017.
- [52] T. KUSKE, *Conflit IFP*, mars 2022.
- [53] OFEV, *Inventaire Fédéral Des Sites Marécageux d'une Beauté Particulière et d'importance Nationale*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/7ed73e2f-0a41-4e8b-a7ff-413f2d9b5ece/tab/complete, nov. 2017.
- [54] —, *Inventaire Fédéral Des Zones Alluviales d'importance Nationale*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/d47dff7-8072-40c2-bbf7-4fb47367bd29/tab/complete, nov. 2017.
- [55] —, *Inventaire Fédéral Des Zones Alluviales d'importance Nationale - Annexe 2*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/5b5b3700-245d-4c15-aabb-5fb177860db5/tab/complete, nov. 2017.
- [56] —, *Zones Alluviales En Dehors de l' Inventaire Fédéral*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/feff7d50-4917-40d0-bcbe-675680d4aa0e/tab/complete, nov. 2017.
- [57] D. HANGARTNER, « Liste «Réseaux Thermiques» Description de La Méthode Appliquée, » SuisseEnergie, Berne, rapp. tech., oct. 2019.
- [58] OFEN, *Réseaux thermiques (chauffage de proximité, chauffage et froid à distance)*, nov. 2020.
- [59] *swissTLM3D*, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html>, mars 2022.
- [60] *MNT25*, <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/height/dhm25.html>, déc. 2013.
- [61] *Géodonnée - Cadastre Des Sites Pollués*, <https://viageo.ch/md/d59e38d6-fc5c-4b2b-ac4d-58d78b146968>, Portail Cartographique, jan. 2022.
- [62] *Modèle d'altitude du toit du rocher*, <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/geology/models/bedrock-elevation.html>, oct. 2021.
- [63] *Modèle d'épaisseur des terrains meubles*, <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/geology/models/unconsolidated-deposits.html>, oct. 2021.
- [64] *Géodonnée - Cadastre - MO et NPCS - Shapefile*, <https://viageo.ch/catalogue/donnee/9719>, mai 2022.
- [65] T. NUSSBAUMER, S. THALMANN, A. HURNI et S. MENNEL, *Fiche d'information, Réseaux thermiques*, fév. 2021.

- [66] G. R. ADITYA et G. A. NARSILIO, « Environmental assessment of hybrid ground source heat pump systems, » *Geothermics*, t. 87, p. 101-868, sept. 2020, ISSN : 0375-6505. DOI : 10.1016/j.geothermics.2020.101868.
- [67] *AR5 Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability — IPCC*, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- [68] P. BAYER, G. ATTARD, P. BLUM et K. MENBERG, « The geothermal potential of cities, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, t. 106, p. 17-30, mai 2019, ISSN : 1364-0321. DOI : 10.1016/j.rser.2019.02.019.
- [69] *ECUCAD - Chauffage à Distance*, <https://www.ecucad.ch/>, 2022.
- [70] *Géodonnée - Cartes Des Dangers Naturels*, <https://viageo.ch/catalogue/donnee/200712>, mars 2022.
- [71] S. GUTZWILLER, R. RIGASSI et H. EICHER, « Abwasserwärmenutzung, Potential, Wirtschaftlichkeit und Förderung, » Eicher-Pauli, rapp. tech. 101722, juill. 2008, p. 81.
- [72] X. LI, J. CHAMBERS, S. YILMAZ et M. K. PATEL, « A Monte Carlo building stock model of space cooling demand in the Swiss service sector under climate change, » *Energy and Buildings*, t. 233, p. 110-662, fév. 2021, ISSN : 0378-7788. DOI : 10.1016/j.enbuild.2020.110662.
- [73] D. PAHUD, *Geothermal energy and heat storage*, mai 2002.
- [74] *RS 451.11 - Ordonnance Du 29 Mars 2017 Concernant l'inventaire Fédéral Des Paysages, Sites et Monuments Naturels (OIFP)*, <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/290/fr>, juin 2017.
- [75] *RS 451 - Loi Fédérale Du 1er Juillet 1966 Sur La Protection de La Nature et Du Paysage (LPN)*, https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637_1694_1679/fr#art_6, jan. 2022.
- [76] *RS 700 - Loi Fédérale Du 22 Juin 1979 Sur l'aménagement Du Territoire (Loi Sur l'aménagement Du Territoire, LAT)*, https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1979/1573_1573_1573/fr, jan. 2019.
- [77] *swissTLM3D Chemin de Fer*, https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/fre/md.viewer#/full_view/b93d607a-9024-41c6-81c3-cbd311d00a44/tab/complete, mars 2022.
- [78] J. M. P. UNTERNÄHRER, éd., *Combining Geographical Information Systems and Optimization for Geothermal Energy Integration in Urban Systems - The Case Study of the City of Lausanne*. 2016.
- [79] A. WALCH, N. MOHAJERI, A. GUDMUNDSSON et J.-L. SCARTEZZINI, « Quantifying the technical geothermal potential from shallow borehole heat exchangers at regional scale, » *Renewable Energy*, t. 165, p. 369-380, mars 2021, ISSN : 0960-1481. DOI : 10.1016/j.renene.2020.11.019.
- [80] A. WALCH, X. LI, J. CHAMBERS et al. « Shallow geothermal energy potential for heating and cooling of buildings with regeneration under climate change scenarios, » *Energy*, t. 244, p. 123-086, avr. 2022, ISSN : 0360-5442. DOI : 10.1016/j.energy.2021.123086.
- [81] A. U. R. WALCH, « Spatio-Temporal Estimation of Renewable Energy Potential in Built Environments using Big Data, » Prof. Christian Ludwig (président); Prof. Jean-Louis Scartezzini, Nahid Mohajeri Pour Rayeni (directeurs); Prof. François Golay, Prof. Paul Ruyssevelt, Prof. Martin Patel (rapporteurs), thèse de doct., EPFL, Lausanne, 2022.
- [82] A. WYRWA et Y.-k. CHEN, « Mapping Urban Heat Demand with the Use of GIS-Based Tools, » *Energies*, t. 10, n° 5, p. 720, mai 2017, ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en10050720.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

<i>ASCAD</i>	Association suisse du chauffage à distance
<i>CAD</i>	Chauffage à distance
<i>CCF</i>	Couplage chaleur-force
<i>COCE_n</i>	Conception cantonale de l'énergie
<i>COP</i>	Coefficient de performance
<i>DIREN</i>	Direction de l'énergie (vaudoise)
<i>ECS</i>	eau chaude sanitaire
<i>EGID</i>	Numéro fédéral unique d'identification des bâtiments
<i>FAD</i>	Froid à distance
<i>HDR</i>	Hot-Dry-Rock
<i>ha</i>	Hectare, soit 100 ares (1 are = 10x10m)
<i>ILP</i>	Integer Linear Programming
<i>LASIG</i>	Laboratoire de systèmes d'information géographiques
<i>mCE</i>	mètre de colonne d'eau
<i>MILP</i>	Mixed Integer Linear Programming
<i>MNT</i>	modèle numérique de terrain
<i>OPN</i>	ordonnance sur la protection de la nature et du paysage
<i>ORC</i>	Cycle organique de Rankine (Organic Rankine Cycle)
<i>PCI</i>	Pouvoir calorifique inférieur
<i>PAC</i>	Pompe à chaleur
<i>QGIS</i>	Anciennement Quantum GIS, un logiciel libre de SIG
<i>SIA</i>	Société suisse des ingénieurs et des architectes
<i>SIG</i>	Service d'information géographique
<i>SRE</i>	Surface de référence énergétique
<i>STEP</i>	Station d'épuration des eaux usées
<i>UIOM</i>	Usine d'incinération des ordures ménagères

LISTE DES FIGURES

1.1	Consommation brute et consommation finale d'énergie en Suisse en 2020. Source : [1]	8
2.1	Illustration d'un réseau centralisé (a) et d'un réseau décentralisé (b) alimenté par une source de chaleur renouvelable dont la température doit être augmentée par une PAC dans une sous-station. Les traits bleus symbolisent les conduites de fluide froid (température de la source) et les traits rouges symbolisent les conduites de fluide réchauffé (température requise par les clients). Les conduites ne sont pas doublées sur les schémas pour simplifier la lecture.	11
2.2	Représentation d'une courbe de charge annuelle typique. Source : [6]	13
2.3	Potentiel thermique des énergies renouvelables (orange) et volume attribué aux zones de chauffage de proximité et à distance (bleu clair) estimé pour 2050 par le Livre Blanc de l'ASCAD [12].	14
2.4	Estimation du potentiel géothermique par surface de 200x200m, en [kWh/m ²], en prenant en compte la place disponible pour les installations. Source : [19].	18
3.1	Zones propices aux réseaux thermiques (mailles hectométriques en rouge) selon les besoins projetés pour 2035 et un seuil minimal de besoin en chaleur fixé à 800 MWh/ha/an [3].	25
4.1	Modélisation des sources de chaleur provenant des nappes phréatiques.	28
4.2	Zone d'approvisionnement (bleu clair) possible avec CAD en utilisant le Léman comme source de chaleur. La ligne rouge montre la profondeur de 60m dans le lac.	29
4.3	Variation de la température de l'eau du lac Neuchâtel au cours du temps ainsi qu'en fonction de la profondeur. Source des données du graphique [34]	30
4.4	Isolignes des distances de captage depuis la zone profonde (40m ou plus) [33].	31
4.5	Représentation géographique des STEP dans le canton de Vaud. Les points oranges sont les STEP retenues pour la revalorisation de la chaleur en 2035.	32
4.6	Rejets thermiques disponibles dans le canton de Vaud, sans les STEP.	33
4.7	Schéma de la méthode utilisée pour estimer la diminution des besoins en chaleur des bâtiments d'ici 2035.	36
4.8	Schéma de la méthode utilisée pour estimer les besoins en chaleur des nouveaux bâtiments qui seront construits d'ici 2035.	39
4.9	Mise en commun des données des bâtiments en 2035.	39
4.10	Etendue des zones IFP dans le canton de Vaud.	41
4.11	Modélisation de la contrainte liée aux sites marécageux.	42
4.12	Modélisation de la contrainte liée aux rivières.	43
4.13	Modélisation de la contrainte des zones alluviales.	44
4.14	Modélisation des réseaux thermiques connus dans le canton de Vaud.	45
4.15	Les réseaux thermiques dans quatre régions intéressantes.	46
4.16	Modélisation des contraintes liées aux glissements permanents et spontanés.	47
4.17	Modélisation de la contrainte liée aux pentes de plus de 25°.	49

4.18	Sites pollués problématiques dans quatre régions intéressantes. Une figure concernant tout le canton est disponible dans l'annexe B, figure viii, mais les sites sont difficiles à repérer.	50
4.19	Voies de chemin de fer problématiques dans le canton de Vaud.	51
4.20	Zoom sur quatre régions intéressantes.	52
4.21	Modélisation de la contraintes des routes.	53
4.22	Hauteur de sol meuble dans le canton de Vaud (là où l'altitude du toit du rocher a été modélisée. Une carte montrant plus précisément quatre régions intéressantes est disponible dans l'annexe B, figure ix.	54
4.23	Modélisation de la contrainte liée aux propriétaires de parcelles.	56
4.24	Zones d'affectations compatibles avec les installations techniques des réseaux thermiques. Une figure avec les zones sur tout le canton de Vaud est disponible dans l'annexe B, figure x.	57
4.25	Exemple de mailles (figure a) qui sont agrégées en polygones (figure b)	58
4.26	Schéma simplifié de la méthode utilisée pour obtenir des zones propices aux réseaux de chaleur à distance dans le canton de Vaud.	59
4.27	Illustration des mailles voisines considérées dans l'algorithme par rapport à la maille choisie.	60
6.1	Densité des besoins de chaleur en 2035 dans les mailles de la grille après l'élimination des contraintes.	64
6.2	Densité moyenne des besoins de chaleur dans les polygones retenus par l'algorithme de recherche.	65
6.3	Densité des besoins en chaleur par maille hectométrique en [MWh/ha/an] en 2035 dans quatre régions intéressantes.	66
6.4	Graphique faisant ressortir les besoins en chaleur d'un polygone en fonction de sa surface. Chaque point bleu représente un polygone. La courbe rouge est la densité minimale d'un réseau.	66
6.5	Zoom sur les polygones de petites surfaces de la figure 6.4.	67
6.6	Histogramme des surfaces des polygones.	67
6.7	Densité des besoins de chaleur en 2035 dans les mailles retenues par l'algorithme de recherche.	68
6.8	Quatre régions intéressantes de la figure 6.7	69
6.9	Graphique faisant ressortir la densité thermique des polygones en fonction de sa surface. Chaque point bleu représente un polygone.	70
6.10	Zoom de la figure 6.9 sur les polygones de petites surfaces.	70
6.11	Répartition des bâtiments (EGID) dans le canton de Vaud. Le jaune représente les bâtiments de 0 à 20 kW (65%), l'orange ceux entre 20 et 50 kW (21%) et le rouge ceux de plus de 50 kW (14%).	71
6.12	Répartition des puissances des consommateurs en classes de 50 kW. La puissance maximale d'un bâtiment est de 5523 kW mais la différence entre les classes est tellement grande que les bâtiments avec une puissance de plus de 200 kW ne sont pas visibles dans l'histogramme.	72
6.13	Répartition des puissances des bâtiments du canton de Vaud selon des limites minimales de puissance.	72
6.14	Puissance moyenne de raccordement des clients dans chaque zones propices aux réseaux CAD (polygone).	73
6.15	Puissance moyenne de raccordement des clients dans chaque maille des zones propices aux réseaux CAD.	74
6.16	Densité énergétique moyenne des polygones en MWh/ha/an après affinement des zones propices.	75
6.17	Zoom sur quatre régions intéressantes de la figure 6.16	76

6.18	Densité énergétique moyenne des mailles en MWh/ha/an après affinement des zones propices.	77
6.19	Zoom sur quatre régions intéressantes de la figure 6.18	77
6.20	Polygones disposant de zone compatibles avec les installations techniques (vert) et ceux n'en n'ayant pas (rouge).	78
6.21	Distances de périmètres des parcelles cumulées et réparties sur la surface du polygone.	79
6.22	Épaisseur de sol meuble dans les polygones. Selon le modèle utilisé, l'épaisseur de sol meuble atteint 900m au maximum.	79
8.1	Coucher de soleil lors de Vivapoly 2022, ma dernière édition en tant qu'étudiant.	85
ii	Matrice des forces, faiblesses, opportunités et menaces d'un réseau de chauffage à distance selon SuisseEnergie [65].	95
iii	Représentation d'une courbe de charge annuelle typique d'un bâtiment où la chaleur renouvelable (en bleu) est fournie selon deux niveau de puissance. Un générateur (ou accumulateur) fournit la demande de pointe. Source : [6]	96
iv	Appel de puissance en % du maximum dans un bâtiment résidentiel datant de 2020 et situé à Zürich. Source : [6]	96
v	Sites de la convention de Ramsar dans le canton de Vaud.	97
vi	Districts francs fédéraux dans le canton de Vaud.	97
vii	Sites Emeraude dans le canton de Vaud.	98
viii	Sites pollués problématiques pour la création de réseaux thermiques du canton de Vaud. La légère transparence du fond de carte est volontaire afin de faire ressortir au mieux les sites pollués problématiques.	98
ix	Épaisseur de sol meuble dans quatre régions intéressantes. Les épaisseurs de plus de 5m ne sont pas indiquées (= transparent).	99
x	Zones compatibles avec les installations techniques dans le canton de Vaud.	99
xi	Carte des besoins en chaleur dans le canton de Vaud.	101
xii	Résultats de l'algorithme lors de la création de mailles de 50 x 50m avec les bâtiments de plus de 50 kW et avant l'affinement des résultats.	102

Liste des tables

4.1	Densités des besoins en chaleur des différents types d'affections présents dans les futures zones construites ou densifiées.	38
i	Informations sur les données de base téléchargées.	100

ANNEXES

A ETAT DE L'ART

<p>Forces («strengths»)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permet un approvisionnement en chaleur sans émissions de CO₂ avec la biomasse, la chaleur ambiante et les rejets de chaleur. • Dans certains cas, il est simultanément possible de couvrir les besoins en froid ou d'exploiter les synergies, par exemple par l'échange de chaleur entre les parcelles. • Les infrastructures sont techniquement éprouvées et évolutives. • Haute efficacité de la production énergétique et faible impact sur l'environnement (effet d'échelle en cas de grandes installations). • Création de valeur dans le pays même. • Les coûts de raccordement aux sources de chaleur peuvent être réduits en proportion de la quantité de chaleur produite. • Un réseau thermique permet d'exploiter au mieux une source de chaleur comme l'eau d'un lac ou des eaux souterraines. Les éventuels effets réciproques sont réduits. • Les sources de chaleur (p. ex. rejets de chaleur des UIOM et des STEP ou géothermie hydrothermale) fournissent tant d'énergie que leur exploitation n'est envisageable qu'avec un réseau thermique. • La motivation des clients potentiels de la zone desservie est plus forte si la société prend la forme d'une coopérative. <p>Avantages pour la clientèle</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveau de confort élevé et coût d'entretien minimum • Convivialité (simplicité de l'utilisation) • Haute fiabilité (approvisionnement sûr) • Faible besoin d'espace dans le bâtiment • Sécurité de planification avec des coûts stables à long terme 	<p>Faiblesses («weaknesses»)</p> <ul style="list-style-type: none"> • N'est pas disponible partout ou n'est adéquat partout (densité de consommation énergétique). • Pertes de chaleur supplémentaires lors de la distribution de la chaleur. • Horizon de mise en œuvre éloigné et investissements à long terme (exigences importantes en termes de liquidités les premières années). • L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments actuels réduit le potentiel des ventes de chaleur. • Concurrence des technologies et agents énergétiques décentralisés. • L'utilisation du sous-sol induit une pression due à la densité (surtout dans l'espace urbain). • La décision d'investissement dans un système de chauffage ne repose généralement pas sur les coûts complets (p. ex. comparaison des prix de l'énergie et des prix du combustible). • Les réseaux thermiques sont peu connus. • Lien de longue durée à l'exploitant du réseau (dépendance).
<p>Opportunités («opportunities»)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Importance croissante des thématiques de l'énergie et du climat. • Contribution à la Stratégie énergétique 2050 et à l'objectif de zéro émission nette de CO₂. • Nécessité d'un approvisionnement en chaleur exempt de CO₂ (remplacement des générateurs de chaleur fossiles actuels, futures restrictions applicables aux chauffages fossiles). • Réduction de la dépendance envers les fournisseurs d'énergie établis hors de Suisse (agents énergétiques fossiles). • Les besoins croissants en froid sont une opportunité pour le froid à distance et le couplage des secteurs. • Développement du réservoir de chaleur saisonnier du sous-sol. • Les potentiels de la biomasse et des rejets de chaleur ne sont pas encore épuisés. • Subventions et redevances incitatives actuelles et futures. • Bonus pour les réseaux thermiques lors de l'évaluation écologique des bâtiments. • Après la sortie du nucléaire, les installations CCF au bois et au biogaz seront importantes pour la production d'électricité en hiver. Les réseaux thermiques contribuent à l'utilisation de leurs rejets de chaleur en hiver. 	<p>Menaces («threats»)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les mesures en faveur de l'environnement et du climat ne sont pas réalisées assez rapidement. • La mise en œuvre au niveau politique se fait attendre. • Les incertitudes ou les retards dans le développement du réseau menacent la rentabilité. • Oppositions contre des installations essentielles et les développements de réseau. • Résistance des clients contre la dépendance envers un fournisseur unique. • Dépendance envers des clients clés (grands consommateurs individuels) et des fournisseurs clés (pour l'utilisation des rejets de chaleur). • Concurrence des systèmes de chauffage décentralisés reposant sur les énergies renouvelables. • Planification temporelle du raccordement des clients (remplacement des chauffages actuels par des technologies et des agents énergétiques décentralisés).

FIGURE II – Matrice des forces, faiblesses, opportunités et menaces d'un réseau de chauffage à distance selon SuisseEnergie [65].

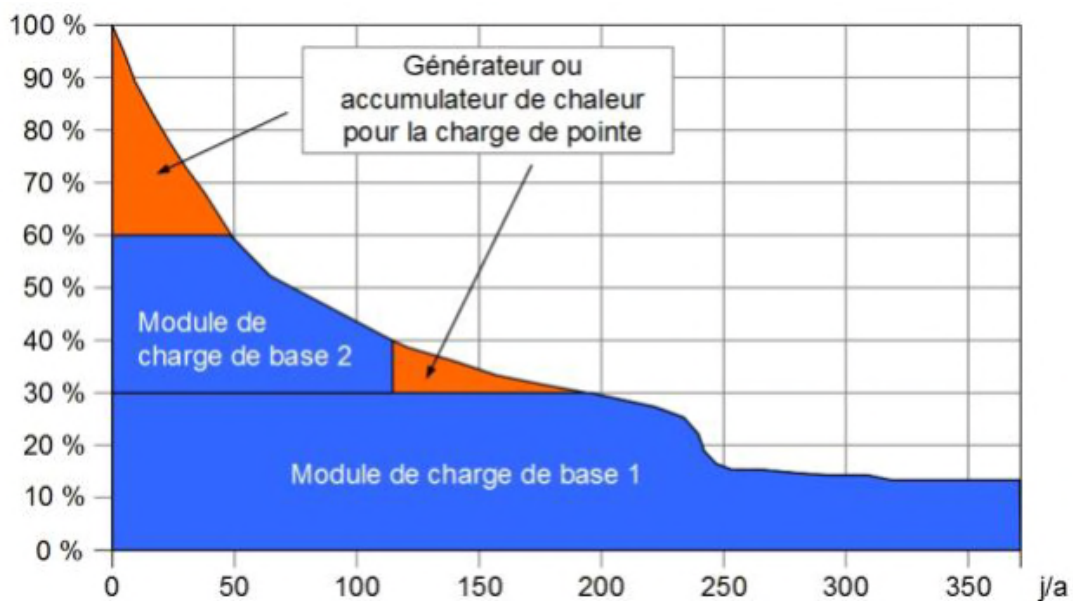


FIGURE III – Représentation d’une courbe de charge annuelle typique d’un bâtiment où la chaleur renouvelable (en bleu) est fournie selon deux niveau de puissance. Un générateur (ou accumulateur) fournit la demande de pointe. Source : [6]

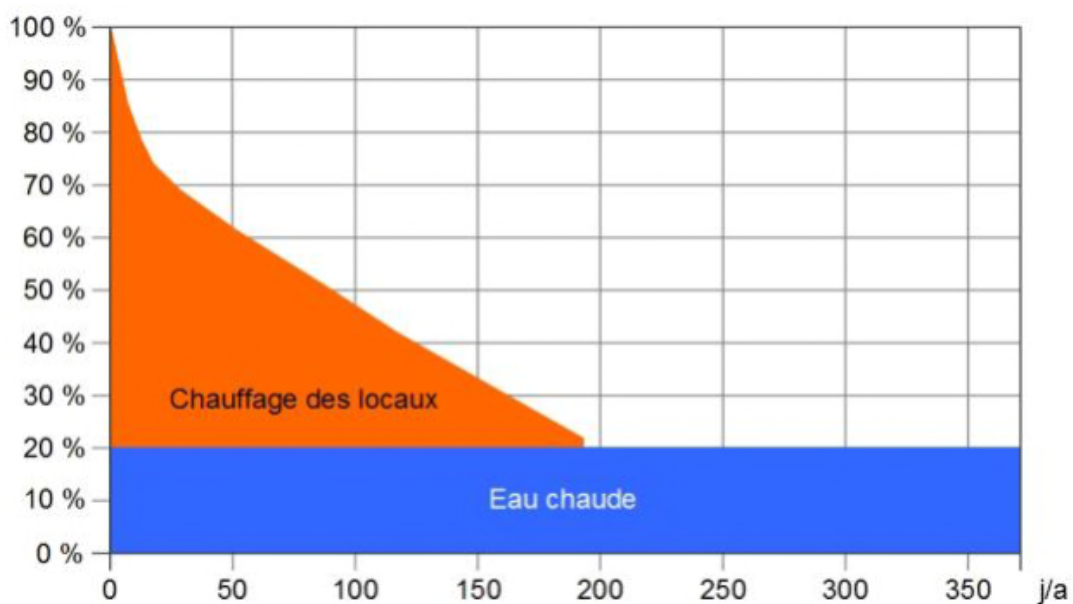


FIGURE IV – Appel de puissance en % du maximum dans un bâtiment résidentiel datant de 2020 et situé à Zürich. Source : [6]

B MÉTHODOLOGIE

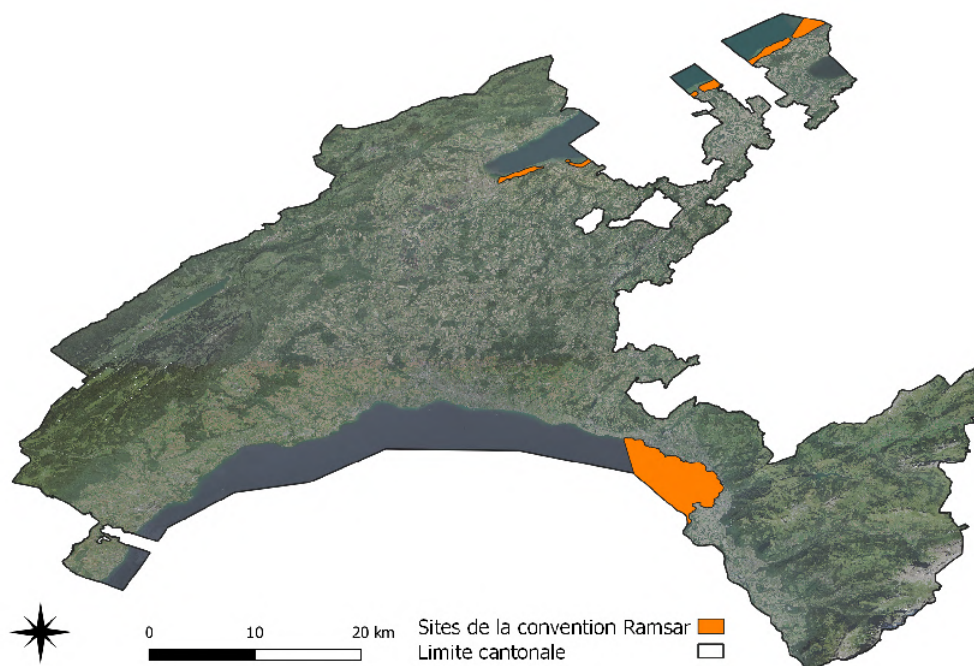


FIGURE V – Sites de la convention de Ramsar dans le canton de Vaud.

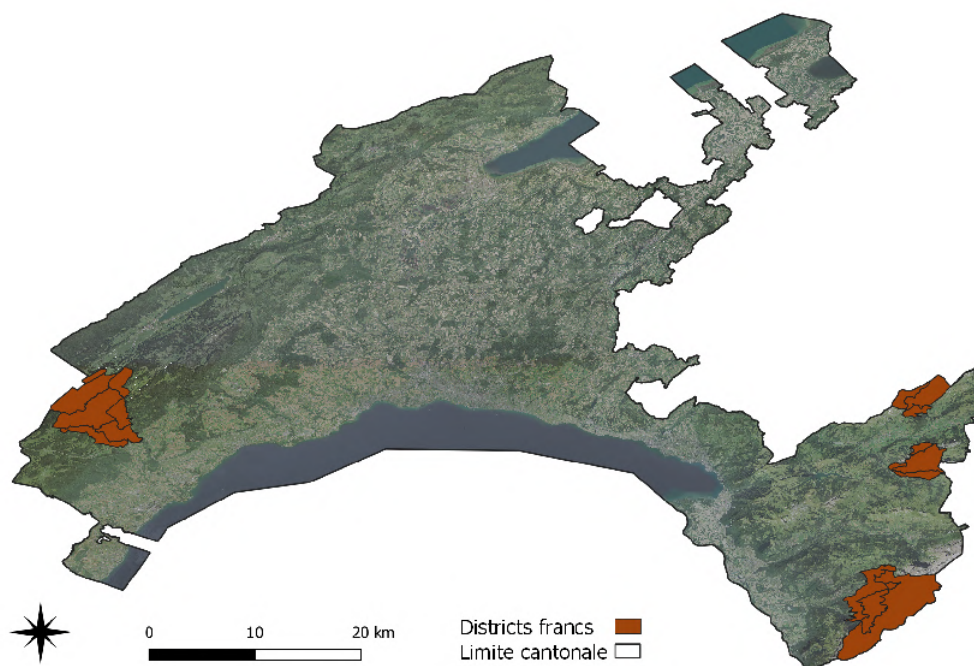


FIGURE VI – Districts francs fédéraux dans le canton de Vaud.

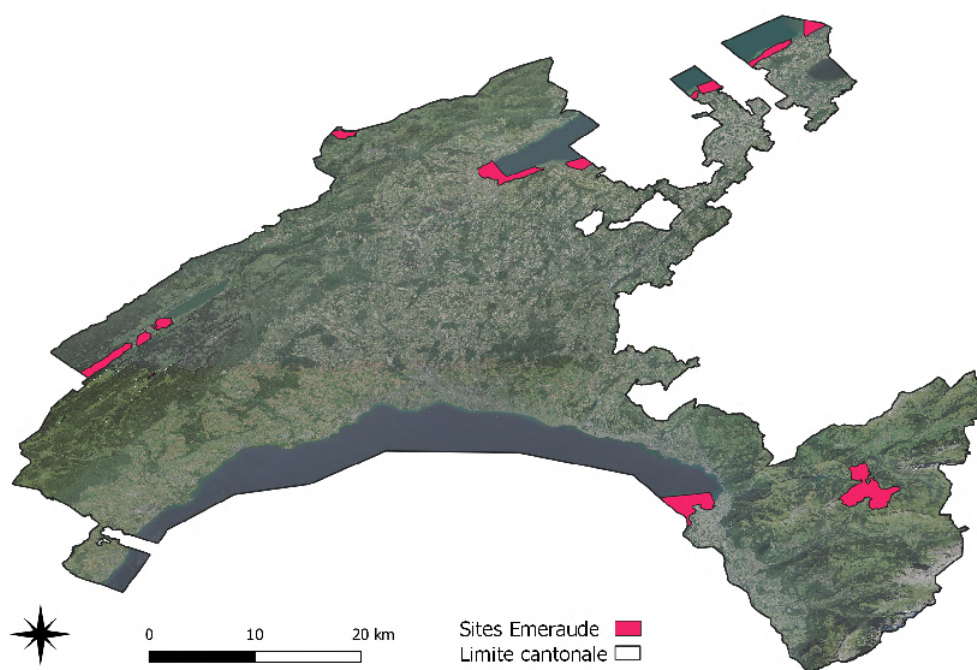


FIGURE VII – Sites Emeraude dans le canton de Vaud.

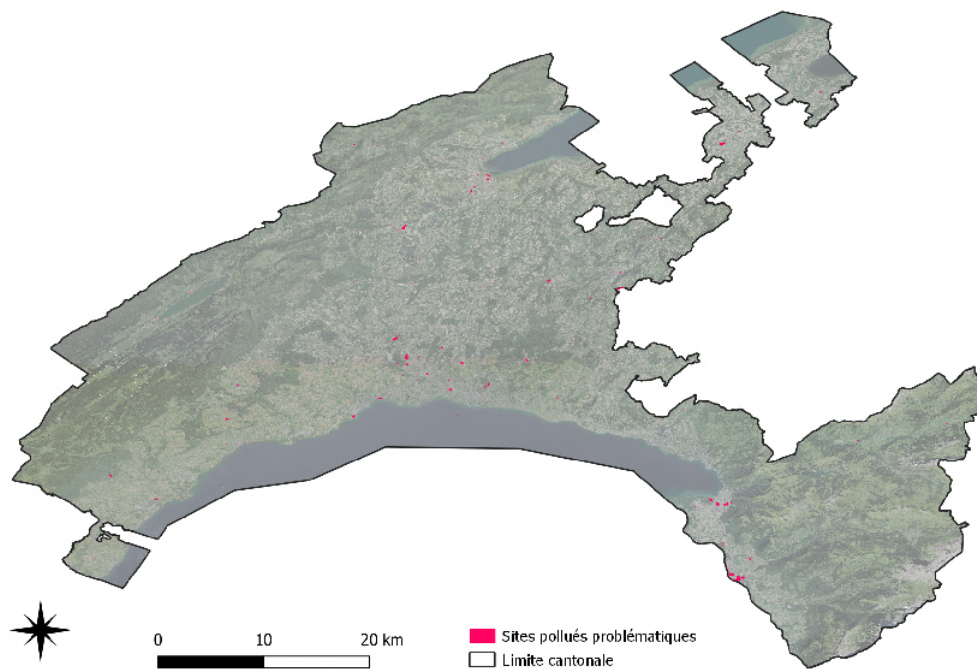


FIGURE VIII – Sites pollués problématiques pour la création de réseaux thermiques du canton de Vaud. La légère transparence du fond de carte est volontaire afin de faire ressortir au mieux les sites pollués problématiques.



FIGURE IX – Epaisseur de sol meuble dans quatre régions intéressantes. Les épaisseurs de plus de 5m ne sont pas indiquées (= transparent).

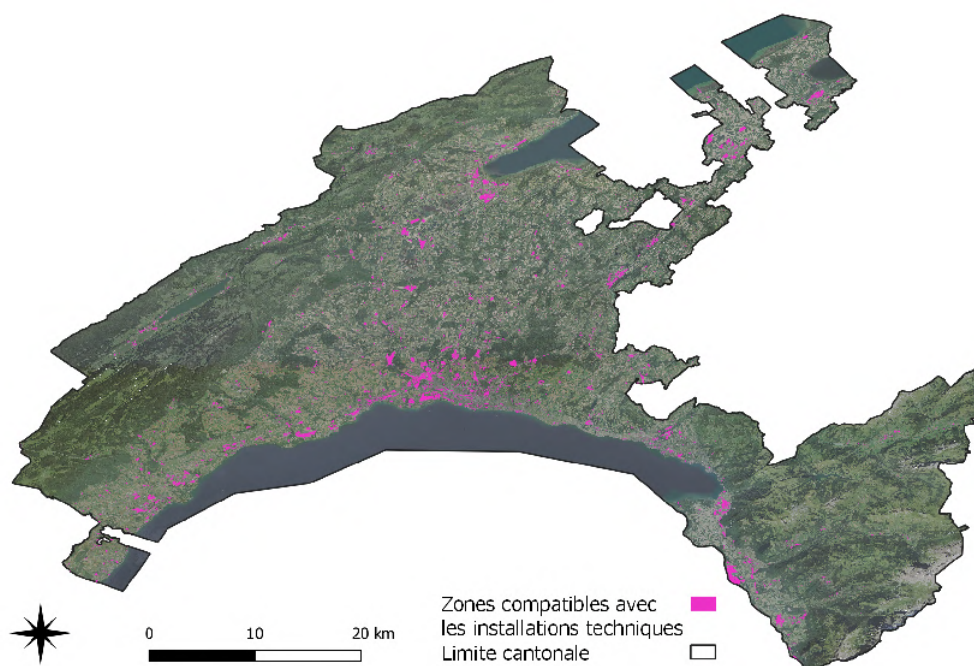


FIGURE X – Zones compatibles avec les installations techniques dans le canton de Vaud.

C DONNÉES

Nom dans le rapport	Nom de téléchargement	Version	Source
Bâtiments			
Batiments 2020		2020	Administration cantonale vaudoise
Zone agrandissement futur		28.07.2020	Administration cantonale vaudoise
Sources			
Aquifères	Cadastre de géothermie profonde	31.05.2022	Administration cantonale vaudoise
Lacs	Lacs	01.01.2007	Swisstopo
Nappes phréatiques	Cadastre de géothermie basse température	09.03.2022	Administration cantonale vaudoise
Rejets thermiques	Cadastre des rejets de chaleur	31.01.2019	Administration cantonale vaudoise
STEP	Stations d'épuration (STEP)	25.01.2019	Administration cantonale vaudoise
Contraintes			
Convention de Ramsar	Convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau (Convention de Ramsar)	02.02.2005	Swisstopo
Districts francs	Inventaire fédéral des districts francs fédéraux (y compris réseau d'itinéraires) - Districts francs	01.01.2014	Swisstopo
Fortes déclivités	MNT25	03.12.2013	Swisstopo
Glissements de terrain permanents	Cartes des dangers naturels	22.03.2022	Administration cantonale vaudoise
Glissements de terrain spontanés	Cartes des dangers naturels	22.03.2022	Administration cantonale vaudoise
Grandes routes	swissTLM3D	15.04.2021	Swisstopo
Parcelles	Cadastre - MO et NPC - ShapeFile	24.05.2022	Administration cantonale vaudoise
Parcs nationaux	Parc national suisse	17.01.2001	Swisstopo
Réseaux thermiques existants	Réseaux thermiques (chauffage de proximité, chauffage et froid à distance)	13.11.2020	Swisstopo
Réserve de biosphère	Réserves de biosphère	01.01.2017	Swisstopo
Réserves forestières	Réserves forestières	31.12.2019	Swisstopo
Rivières	swissTLM3D	15.04.2021	Swisstopo
Sites de l'UNESCO	UNESCO sites naturels	24.07.2008	Swisstopo
Sites Emeraude	Sites Emeraude	17.09.2009	Swisstopo
Sites marécageux	Inventaire fédéral des sites marécageux d'une beauté particulière et d'importance nationale	01.11.2017	Swisstopo
Sites pollués	Cadastre des sites pollués	03.01.2022	Administration cantonale vaudoise
Sites Pro Natura forestières	Pro Natura: Réserves forestières	31.12.2019	Swisstopo
Sites Pro Natura naturelles	Pro Natura: Réserves naturelles	31.12.2019	Swisstopo
Sol meuble	Modèle d'épaisseur des terrains meubles	21.10.2021	Swisstopo
Toit du rocher	Modèle d'altitude du toit du rocher	01.11.2017	Swisstopo
Voies de chemin de fer	Chemin de fer swissTLM3D	05.04.2022	Swisstopo
Zone alluviale hors inventaire	Zones alluviales en dehors de l' inventaire fédéral	01.11.2017	Swisstopo
Zones alluviales	Inventaire fédéral des zones alluviales d'importance nationale	01.11.2017	Swisstopo
Zones alluviales en annexe	Inventaire fédéral des zones alluviales d'importance nationale - Annexe 2	01.11.2017	Swisstopo
Zones IFP	Inventaire fédéral des paysages, sites et monuments naturels (IFP)	01.06.2017	Swisstopo

TABLE I – Informations sur les données de base téléchargées.

D RÉSULTATS

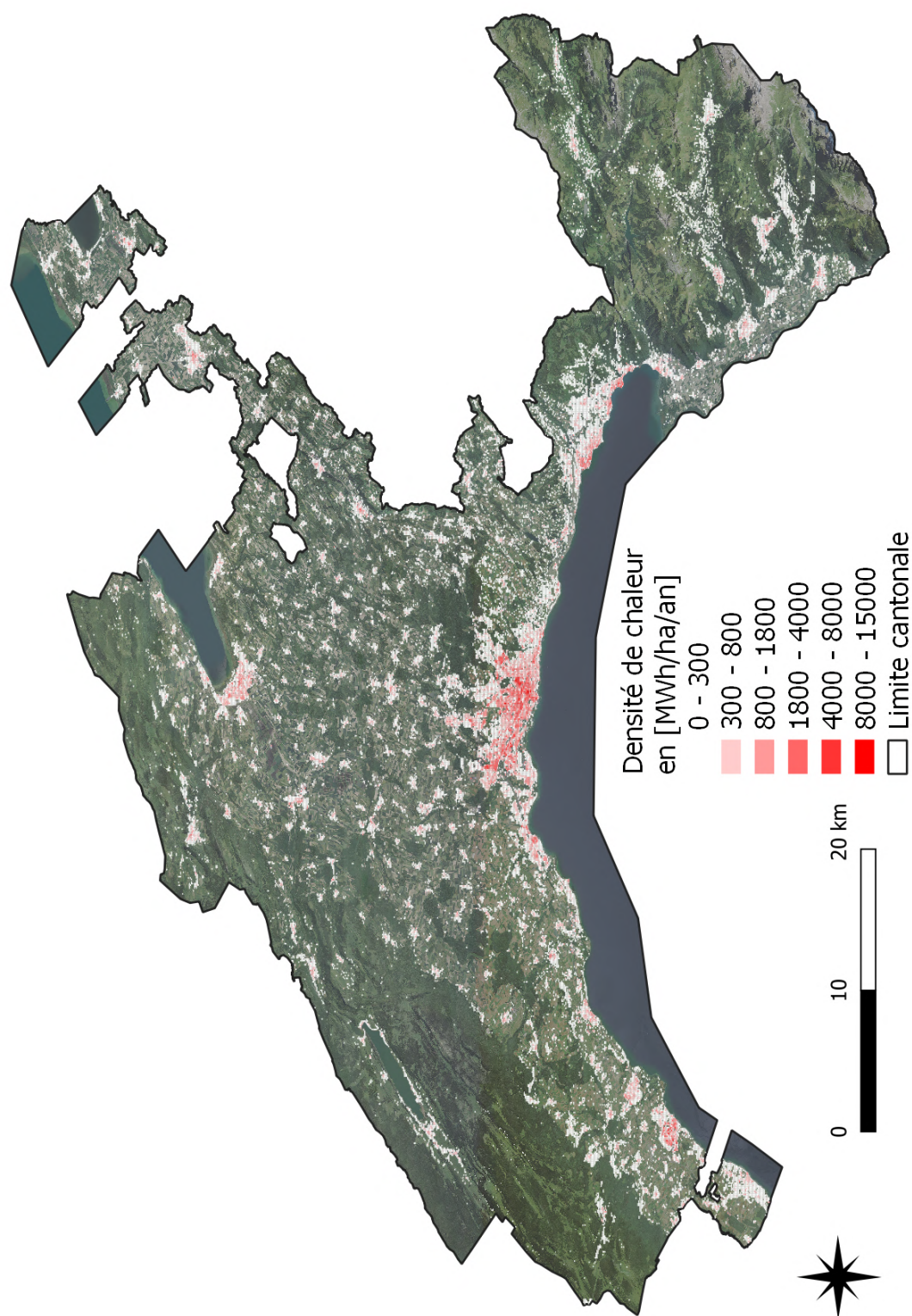
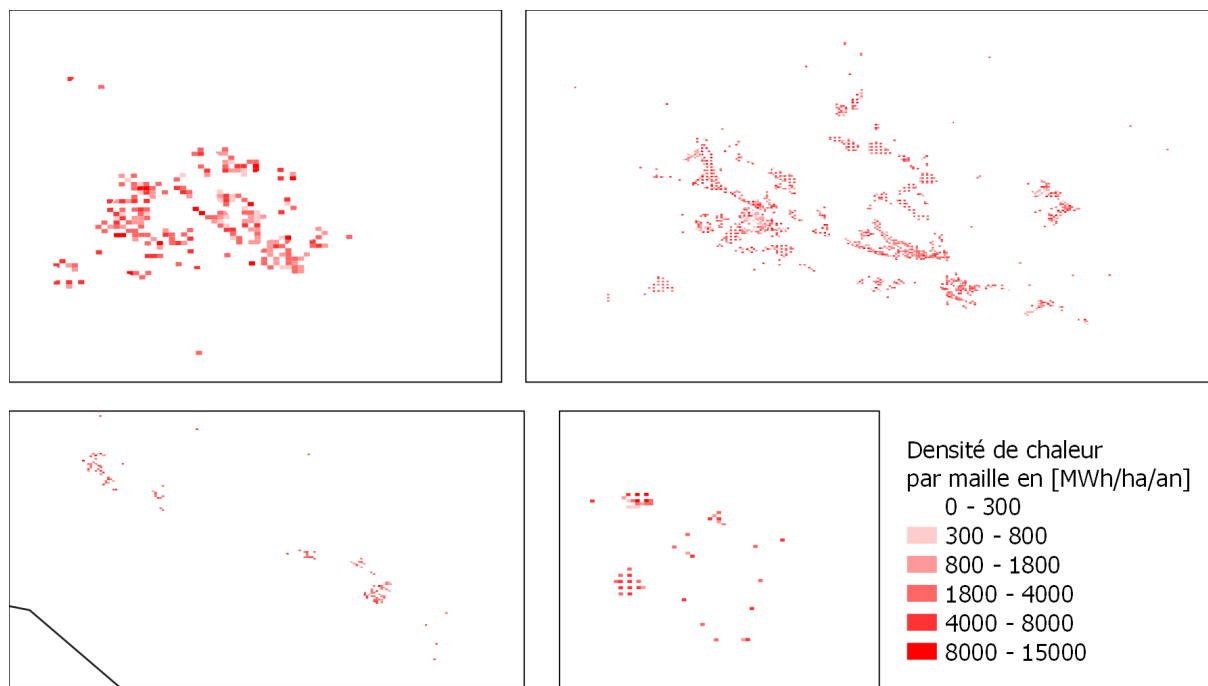
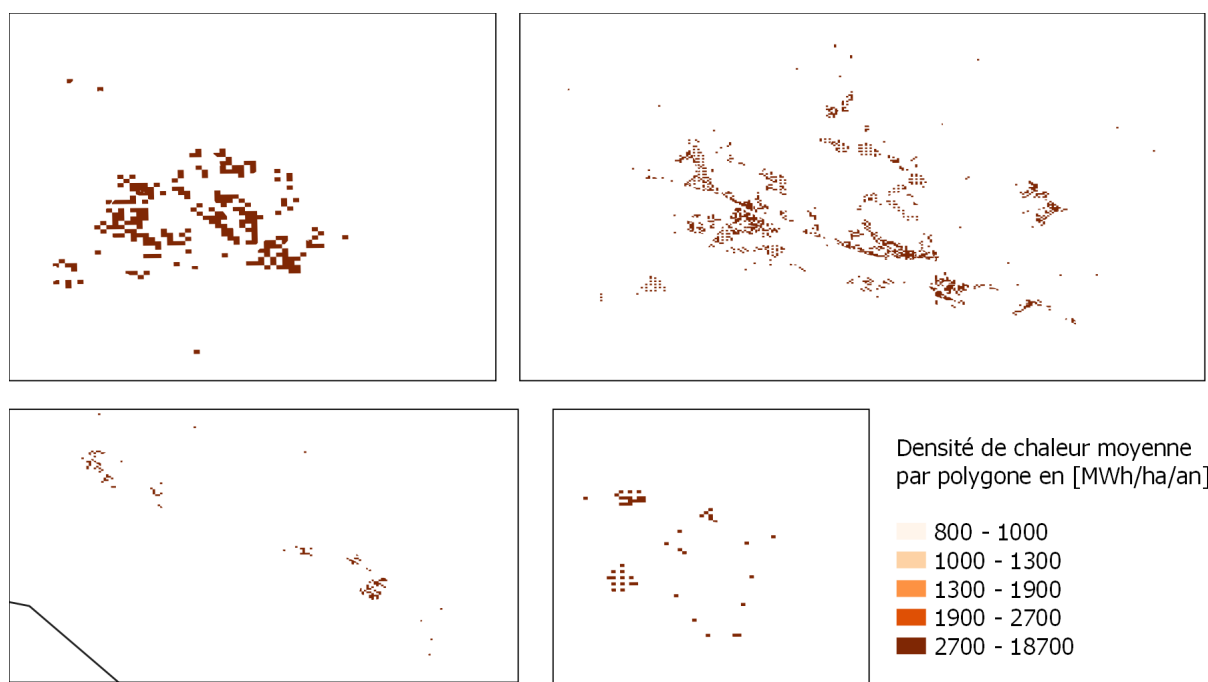


FIGURE XI – Carte des besoins en chaleur dans le canton de Vaud.

E DISCUSSION



(a) Mailles propices aux réseaux CAD.



(b) Polygones

FIGURE XII – Résultats de l'algorithme lors de la création de mailles de 50 x 50m avec les bâtiments de plus de 50 kW et avant l'affinement des résultats.