

Direction Générale de l'Environnement - Vaud

Perspectives chaleur

**Perspectives de valorisation du potentiel de chaleur
renouvelable du canton de Vaud**

Lausanne, le 13.07.2021 / VD08032

Table des matières

1	Résumé	7
1.1	Objectif et méthodologie	7
1.2	Perspectives de valorisation des ressources dans les zones propices aux réseaux	9
1.3	Perspectives de valorisation des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés 11	
1.4	Perspectives de valorisation des ressources pour la chaleur de procédés	12
2	Introduction et contexte.....	14
3	État des lieux et projections, définition de zones d’approvisionnement en réseaux ou décentralisées.....	16
3.1	État actuel de la contribution des ressources pour l’approvisionnement en chaleur	16
3.2	Besoins thermiques projetés en 2035.....	20
3.2.1	Besoins pour le chauffage et l’eau chaude sanitaire	20
3.2.2	Besoins en froid – confort et procédés	21
3.3	Définition des zones propices aux réseaux thermique et propices aux systèmes décentralisés	22
3.4	Besoins en chaleur de procédés.....	24
4	Utilisation des ressources situationnelles dans les zones propices aux réseaux thermiques	26
4.1	Potentiel de valorisation des ressources situationnelles.....	26
4.1.1	STEP et rejets thermiques industriels	26
4.1.2	Eau des lacs.....	28
4.1.3	Nappes phréatiques	30
4.1.4	Aquifères à moyenne profondeur.....	31
4.1.5	Hypothèses pour l’estimation des COP	32
4.2	Valorisation combinée des ressources situationnelles	32
4.2.1	Ressources futures	32
4.2.2	Intégration des ressources situationnelles déjà valorisées dans les CAD	33
4.2.3	Répartition des ressources et analyse	34
5	Utilisation des ressources situationnelles dans les zones propices aux systèmes décentralisés	37
5.1	Nappes phréatiques	37
5.2	Sondes géothermiques	37
5.3	Aérothermie.....	38
5.4	Bilan.....	38
6	Utilisation de la ressource bois-énergie (et autres ressources non situationnelles)	41
6.1	Méthodologie d’attribution du potentiel bois-énergie à l’échelle cantonale.....	41
6.2	Bilan.....	41

6.3	Attribution particulière du potentiel bois dans les zones propices aux systèmes décentralisés	42
7	Autres ressources	43
7.1	Biogaz et solaire thermique.....	43
7.2	Électricité	44
8	Bilan de l'analyse et objectifs au niveau cantonal	45
8.1	Zones propices aux réseaux	45
8.2	Zones propices aux systèmes décentralisés	47
8.3	Chaleur de procédés industriels.....	49
8.4	Électricité pour l'alimentation des pompes à chaleur	50
8.5	Synthèse globale.....	51
9	Lignes directrices.....	52
9.1	Favoriser une utilisation optimale des ressources situationnelles dans les réseaux thermiques	52
9.2	Répartir l'utilisation du bois énergie à l'échelle cantonale de façon coordonnée	52
9.3	Favoriser l'utilisation de la géothermie sur sondes verticales et de l'aérothermie dans les zones propices aux systèmes décentralisés	53
9.4	Encourager le développement du solaire thermique	53
9.5	Utiliser le potentiel supplémentaire de gaz synthétique pour les procédés industriels.....	54
9.6	Conséquences possibles liées à la non mise en œuvre de ces lignes directrices	54
10	Concept de mesures	56
10.1	Freins à la valorisation optimale des ressources	56
10.2	Temporalité	56
10.3	Liste d'idées de mesures	57
10.3.1	Mesures de niveau 1	57
10.3.2	Mesures de niveau 2.....	57
10.3.3	Mesures de niveau 3.....	58
11	Compléments d'études à mener	59
12	Bibliographie	60
13	Impressum	61
14	Prémisses	61

Liste des figures

Figure 1 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux réseaux au niveau cantonal – situation 2020 et future.....	9
Figure 2 : Répartition future par district des ressources dans les zones propices aux réseaux – Valeurs données en MWh.....	10
Figure 3 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés au niveau cantonal – situation 2020 et future	11
Figure 4 : Répartition future par district des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés– Valeurs données en MWh.	12
Figure 5 : Utilisation des ressources pour les procédés industriels au niveau cantonal – situation 2020 et future	13
Figure 6 : Synthèse par district des contributions actuelles pour l’approvisionnement en chaleur – données en GWh – haut : histogrammes en % - bas : histogrammes en valeurs	17
Figure 7 : District de Morges – Part des agents énergétiques pour l’approvisionnement en chaleur en CAD et hors CAD – 2020	19
Figure 8 : Part relative des districts dans la demande en chaleur : 2020 et projection 2035.....	21
Figure 9 : Exemple de représentation cartographique des type de besoins thermiques chaud/froid	22
Figure 10 : Carte des zones propices aux réseaux thermique – seuil à 800 MWh/ha – selon des besoins projetés à 2035	23
Figure 11 : District de Morges – zones propices aux réseaux et hors réseaux en 2035	24
Figure 12 : Illustration de la méthode de calcul de valorisation d’une source dans un réseau de chaleur.....	27
Figure 13 : exemple de cartographie de zones réseaux dans lesquelles l’énergie d’une STEP peut être valorisée	28
Figure 14 : Exemple de cartographie de zones réseaux dans lesquelles l’énergie des nappes peut être valorisable	31
Figure 15 : Illustration du calcul des contributions combinées des ressources situationnelles dans les zones propices aux réseaux.....	34
Figure 16 : Répartition des ressources situationnelles futures et celles déjà utilisées dans les zones propices aux réseaux – Valeurs données en MWh - - haut : histogrammes en % - bas : histogrammes en valeurs....	36
Figure 17 : Répartition des ressources situationnelles ainsi que des ressources renouvelables déjà utilisées dans les zones décentralisées – Valeurs données en MWh. – haut : histogrammes en % - bas : histogrammes en valeurs.....	40
Figure 18 : Répartition du potentiel de valorisation du bois-énergie (>1000 m) selon les districts (zones propices aux systèmes décentralisés uniquement), rajouté aux autres ressources déjà analysées, pour les besoins en chaleur (hors procédés industriels) – valeurs en MWh.....	42
Figure 19 : Consommation future d’électricité pour l’alimentation des PAC – par district – données en GWh	44
Figure 20 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux réseaux au niveau cantonal – situation 2020 et future.....	46
Figure 21 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés au niveau cantonal – situation 2020 et future	48
Figure 22 : Utilisation des ressources pour les procédés industriels au niveau cantonal – situation 2020 et future	49
Figure 23 : Consommation d’électricité au niveau cantonal pour les PAC – situation 2020 et future.....	50
Figure 24 : Synthèse au niveau cantonal de l’utilisation des ressources dans les zones propices aux réseaux et aux systèmes décentralisés, ainsi que pour les procédés industriels– situation 2020 et future	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : STEP –chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts	28
Tableau 2 : Rejets thermiques industriels - chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts.....	28
Tableau 3 : Eau des lacs – chaleur valorisable dans les zones propices réseaux – par districts et zones lacustres	30
Tableau 4 : Nappes phréatiques –chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts	31
Tableau 5 : Aquifère du Malm –chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts	32
Tableau 6 : Valorisation combinée des ressources situationnelles – note globale pour la priorisation	33
Tableau 7 : Potentiel de bois-énergie du canton pour la production de chaleur	41
Tableau 8 : Bilan de l’apport du bois énergie dans le taux de couverture en ressources renouvelables	42
Tableau 9 : Utilisation actuelle et potentiel futur au niveau cantonal du biogaz et du solaire thermique.....	43

Liste des annexes

Annexe A Contribution actuelle des ressources dans l’approvisionnement en chaleur et zone de dessertes des CAD actuels.....	62
Annexe B Cartographie par district des zones propices aux réseaux et hors réseaux en 2035.....	72
Annexe C : cartographies de valorisation des STEP et des rejets thermiques industriels dans les zones propices aux réseaux en 2035.	82
Annexe D Cartographies des zones propices aux réseaux aux abords des lacs, en 2035, bathymétrie, ouvrages existants et nouveaux captages praticables.....	89
Annexe E : Cartographies de valorisation des nappes phréatiques dans les zones propices aux réseaux en 2035	92
Annexe F : Exemple de périmètres dans lesquels le développement de réseaux de froid à distance est à envisager (qualitatif).	98

Lexique

CAD : Chaleur à Distance

PAC : Pompe à Chaleur

COP : Coefficient de performance (indique le rapport entre la puissance de chaleur délivrée par une PAC et la puissance électrique nécessaire à son fonctionnement)

CCF : Couplage Chaleur Force (caractérise un système capable de produire simultanément de l'énergie sous forme de chaleur et de travail, par exemple, un moteur thermique ou un cycle à vapeur)

IDC : Indice de Dépense de Chaleur

SRE : Surface de Référence Energétique

CoCEn : Conception Cantonale de l'Energie

STEP : Station d'épuration des eaux

GES : Gaz à Effet de Serre

Aérothermie : Désigne l'utilisation de l'air ambiant comme source de chaleur, notamment au travers de PAC air/eau

Monotone : Désigne une courbe classant sur l'année du plus grand au plus petit le profil des besoins horaires en chaleur d'un réseau ou d'un bâtiment

Bathymétrie : relief et profondeur du fond des lacs

Monovalence : désigne le fait d'alimenter un bâtiment ou un réseau thermique avec un seule source d'énergie (généralement renouvelable)

Bivalence : désigne le fait d'alimenter un bâtiment ou un réseau thermique avec deux sources d'énergie (généralement renouvelable + fossile)

Maille hectométrique : maille rectangulaire de 100 m de côté sur laquelle sont calculés les besoins des bâtiments ainsi que les potentiels des ressources.

1 Résumé

1.1 Objectif et méthodologie

La stratégie énergétique fédérale vise à ramener à zéro les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050. Or, l'usage de la chaleur représente une part importante (env. 50%) de l'ensemble des prestations énergétiques délivrées aux habitants et entreprises du canton de Vaud. Cet usage comprend notamment les besoins pour le confort (chauffage et eau chaude sanitaire) mais également pour les procédés industriels.

Le territoire vaudois recèle un potentiel de ressources renouvelables indigènes qui, bien employé, pourrait à terme satisfaire la plupart des besoins de chaleur, sans recours au fossile. L'objectif de ce rapport est de décrire la répartition spatiale des ressources et des besoins thermiques, et de proposer des modes d'utilisation de ces ressources qui permettent leur valorisation optimale de manière à atteindre une fourniture de chaleur 100% renouvelable.

Cet état de valorisation optimale repose sur les principes généraux suivants :

- Une utilisation prioritaire des ressources dites situationnelles¹, là où elles se trouvent (les rejets de chaleur industriels et de STEP, la géothermie moyenne ou basse profondeur, l'eau des lacs)
- Une répartition géographique judicieuse à l'échelle cantonale des ressources non situationnelles (comme le bois-énergie et le biogaz) dans des lieux qui ne viennent pas concurrencer les ressources situationnelles (qui ne pourront pas être valorisées ailleurs), ou pour des usages de chaleur à haute température typiquement supérieurs à 100°C (procédés industriels) difficiles à satisfaire autrement.
- Le déploiement des réseaux thermiques sur des périmètres pertinents, mais suffisamment larges, pour permettre une mutualisation des ressources et donc une meilleure valorisation de leur potentiel.
- Une priorité d'utilisation des ressources à valoriser au travers de réseaux thermiques : les rejets de chaleur industriels ou de STEP, les aquifères de moyenne profondeur, les lacs, les nappes phréatiques, et le bois-énergie.
- Une priorité d'utilisation des ressources à valoriser de manière décentralisée : les nappes phréatiques, les sondes géothermiques, l'aérothermie, et le bois énergie.

Le potentiel de valorisation des ressources indigènes doit être compris comme un flux d'énergie annuel disponible, qui va rester constant sur le long terme. Le rapport montre que ce flux, s'il n'est pas valorisé dans des systèmes énergétiques de manière optimale (i.e. selon les principes généraux énoncés plus haut), ne permettra pas de couvrir tous les besoins en chaleur. Des importations substantielles seraient alors nécessaires pour atteindre l'objectif de la stratégie fédérale.

Quant aux besoins en chaleur, nous considérons comme référence l'état de leur projection à 2035, pour déterminer l'usage optimal des ressources. Là encore, cette projection à 2035 (environ -10% par rapport à aujourd'hui) doit être considérée comme une base de calcul qui reste assez constante à moyen terme et qui sera par la suite vouée à baisser sous l'effet des rénovations et l'amélioration des standards. L'augmentation des besoins liés à la densification de l'habitat, prévue pour répondre à l'évolution démographique, devrait en principe être bien inférieure à l'effet des rénovations

La granularité spatiale utilisée pour cette approche cantonale est la maille hectométrique. Toutefois, une approche à l'échelle du bâtiment a parfois été nécessaire au cas par cas pour fiabiliser certaines données ou calculs.

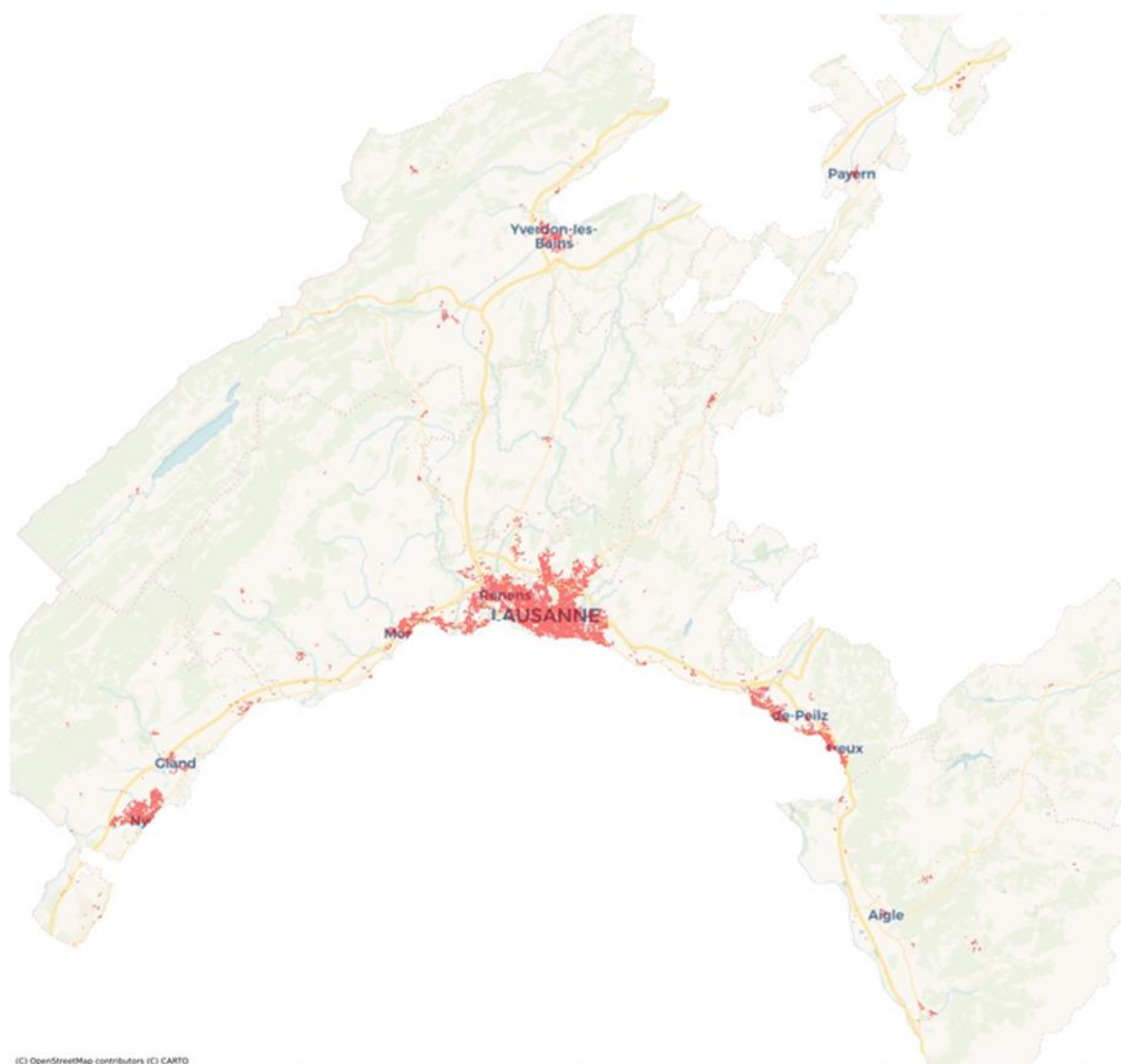
¹ Il s'agit de ressources non transportables ne pouvant être valorisées que là où elles se trouvent ou dans un certain périmètre autour de leur localisation

Au final, le concept de mesures proposé dans ce rapport fournit des pistes aux collectivités publiques quant aux mesures à mettre en œuvre (communicationnel, organisationnel, financier ou législatif) pour orienter les projets dans la direction d'une valorisation optimale des ressources, sans gaspillage.

La figure ci-dessous montre en rouge l'ensemble des mailles hectométriques dans lesquelles les réseaux thermiques devraient être déployés ou renforcés dans le futur, en y valorisant des ressources indigènes. Les zones ainsi dessinées correspondent à des densités de besoins en chaleur supérieures à 800 MWh/ha/an. Elles se trouvent particulièrement (et logiquement) dans les secteurs suivants :

- Agglomération de Lausanne-Morges
- Agglomération de Vevey-Montreux
- Agglomération de Nyon-Gland
- Agglomération d'Yverdon-les-Bains

Les zones propices aux systèmes décentralisés correspondent à tout le reste du canton.



1.2 Perspectives de valorisation des ressources dans les zones propices aux réseaux

Pour les zones propices aux réseaux, les perspectives idéales à atteindre, à partir de la situation actuelle, sont synthétisées dans la figure suivante.

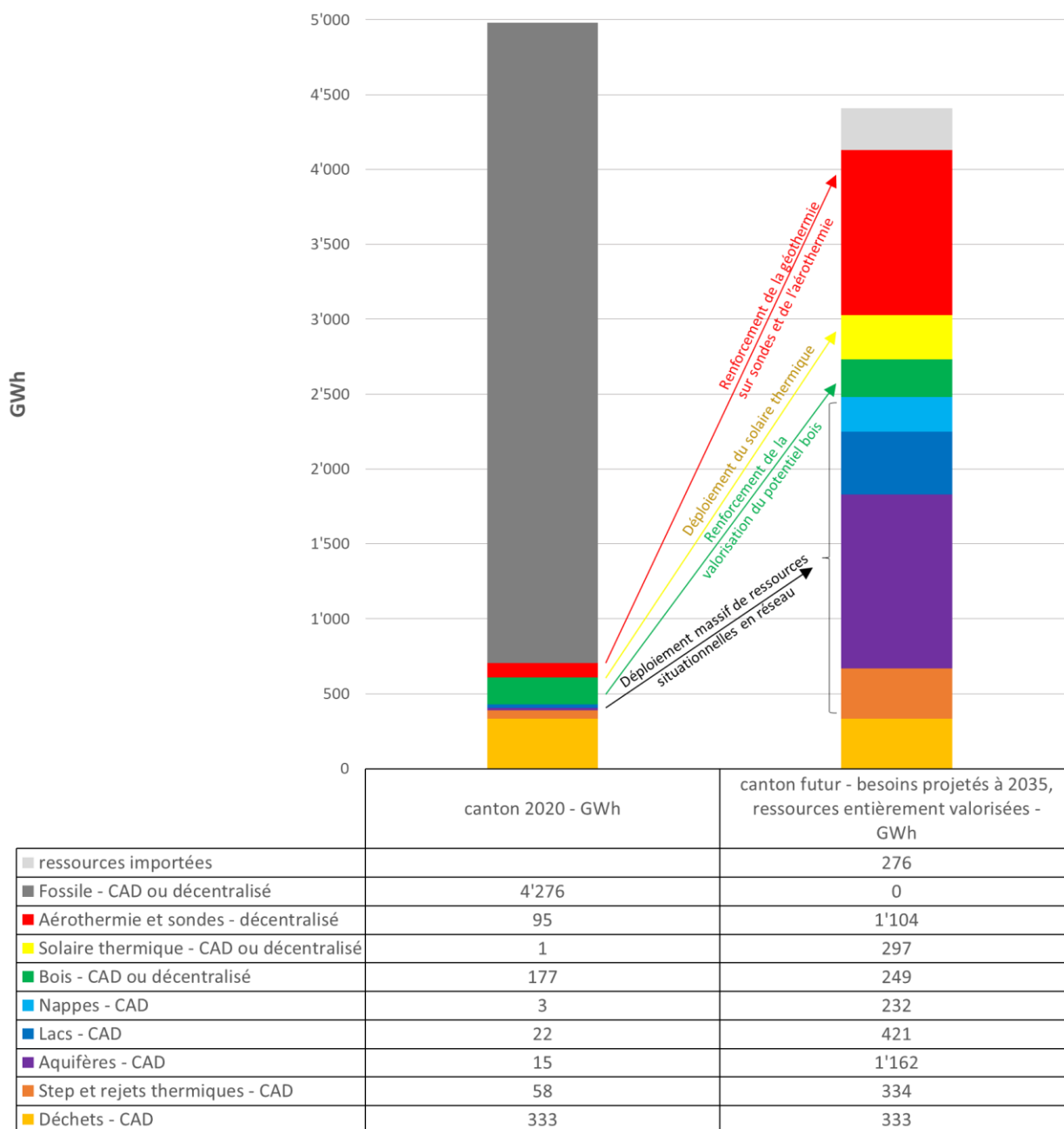


Figure 1 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux réseaux au niveau cantonal – situation 2020 et future

Les éléments suivants sont à retenir :

- L'utilisation actuelle **des déchets dans des réseaux** devrait rester à son niveau actuel (**330 GWh/an**) avec probablement une tendance à la baisse avec l'amélioration du recyclage et la baisse de l'usage des matières plastiques.

- Les ressources **situationnelles** constituées par **les STEP/rejets thermiques, les aquifères, les lacs et les nappes phréatiques** devraient connaître une très forte expansion dans les réseaux (**de 22 à 2200 GWh**)
- L'utilisation du **bois énergie**, actuellement utilisé dans des réseaux ou de manière décentralisée, devrait être réaffectée pour des usages nécessitant de la haute température et pour les bâtiments d'altitude. La part attribuable aux réseaux thermiques ayant une évolution limitée (**de 180 à 250 GWh**)
- L'énergie **solaire thermique**, décentralisée ou en réseau, pourrait se développer jusqu'à un niveau d'environ **300 GWh**
- L'utilisation de **des sondes géothermiques et de l'aérothermie** et, de manière décentralisée, passerait de 95 à 1100 GWh
- Un résidu de 276 GWh devrait être comblé par des ressources importées et si possible renouvelables, ou bien peu à peu réduit grâce à la diminution renforcée des besoins des bâtiments.
- Enfin, l'utilisation de l'énergie fossile devrait être réduite proche de zéro selon le contenu des ressources importés dans le résidu cité ci-dessus.

On constate ainsi que dans ces zones, les réseaux thermiques ne devraient pas se déployer partout et certains périmètres devront plutôt être alimentés par des systèmes décentralisés (aérothermie et sondes notamment). C'est au niveau des planifications communales que les périmètres exacts de déploiement de réseaux devront être affinés de façon à répondre à l'objectif cantonal.

A titre d'illustration, la figure suivante montre comment devraient se répartir, par district, les potentiels de valorisation des ressources (valeurs en MWh).

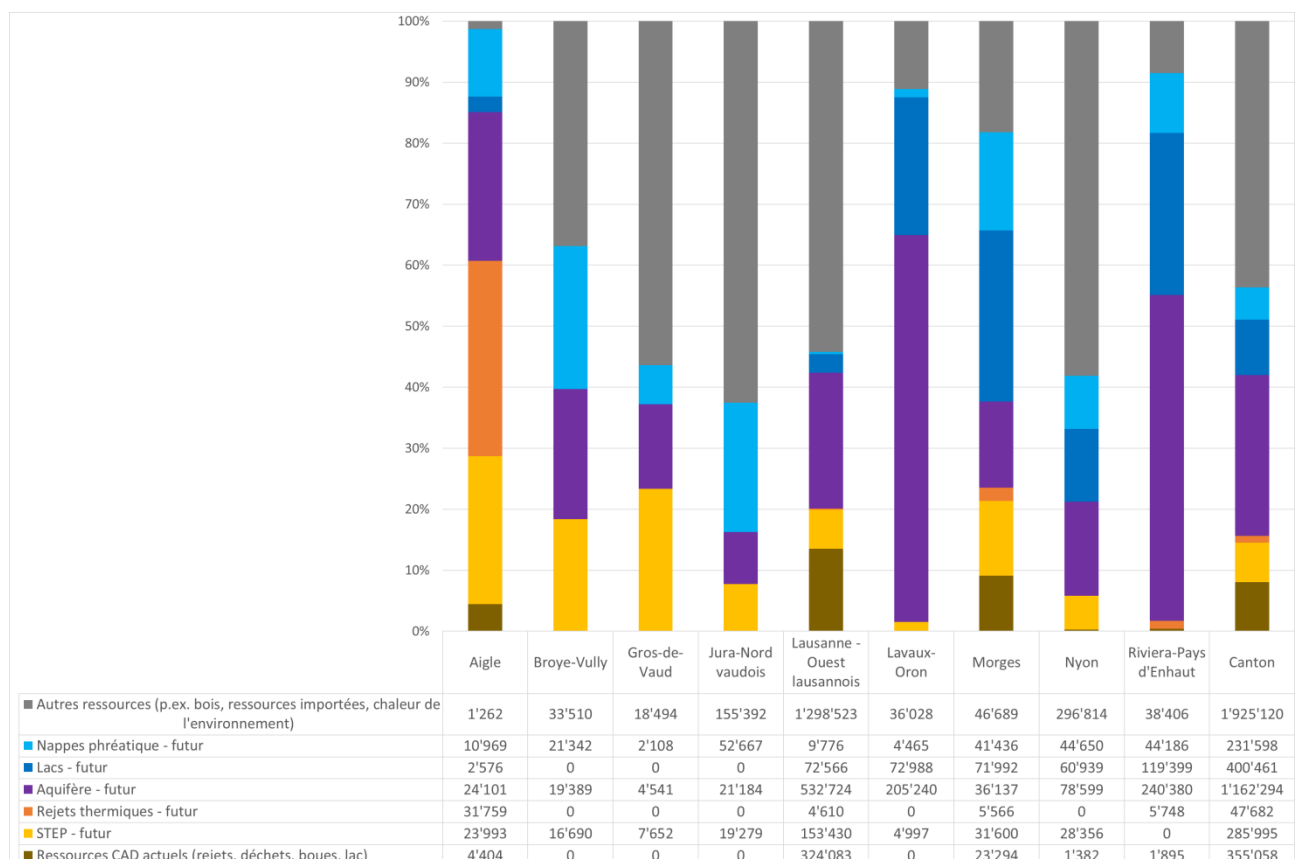


Figure 2 : Répartition future par district des ressources dans les zones propices aux réseaux – Valeurs données en MWh

Aucune répartition n'est indiquée à ce stade pour le bois utilisé en réseau et l'énergie solaire thermique, ainsi que pour l'aérothermie et les sondes géothermiques. Cette répartition devra se faire au fur et à mesure en tenant compte des périmètres de déploiement des réseaux.

1.3 Perspectives de valorisation des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés

Les perspectives idéales à atteindre pour les zones propices aux systèmes décentralisés, à partir de la situation actuelle, sont synthétisées dans la figure suivante.

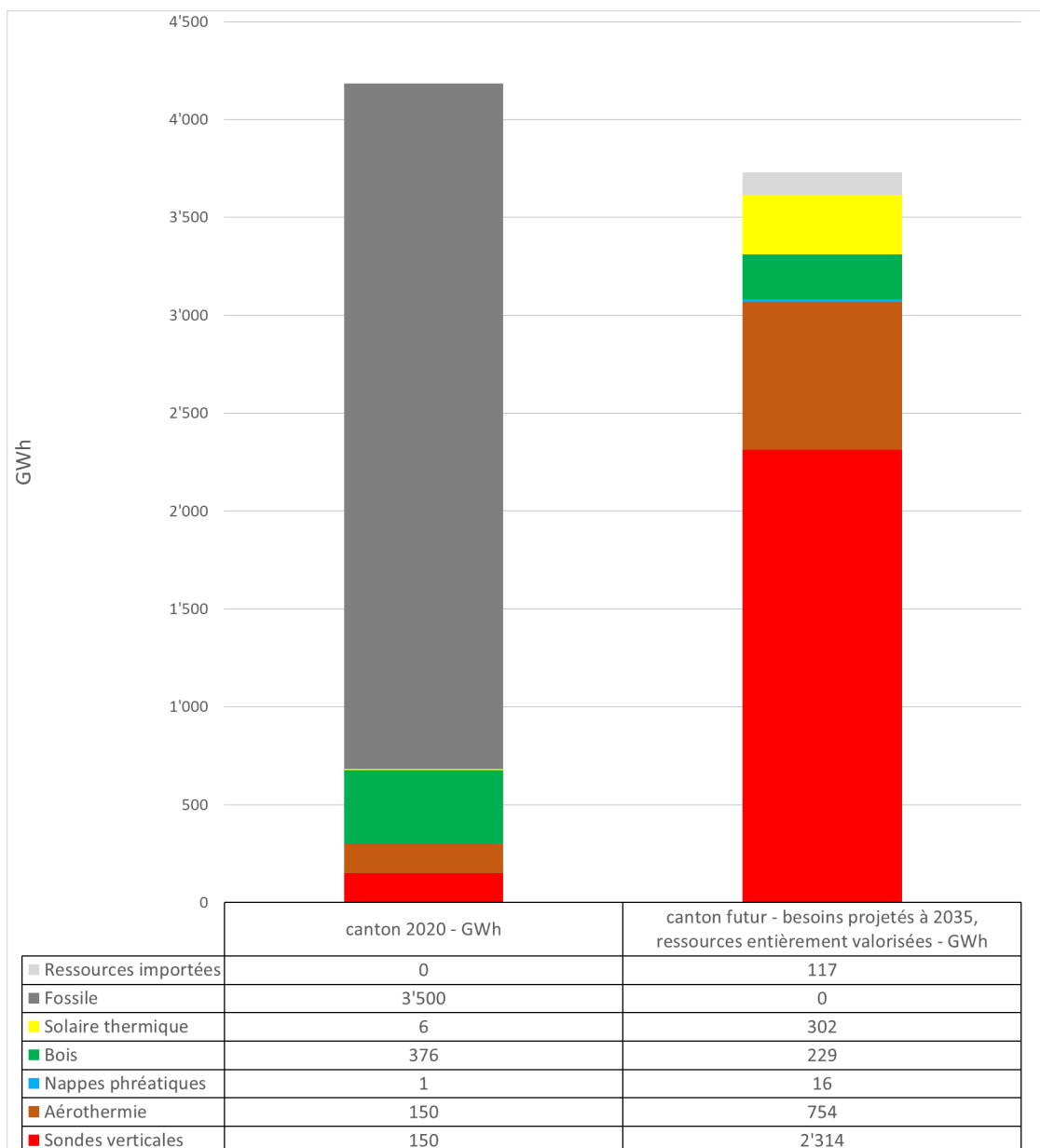


Figure 3 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés au niveau cantonal – situation 2020 et future

Les éléments suivants sont à retenir :

- L'utilisation des **sondes verticales** devrait augmenter considérablement (**150 à 2'300 GWh/an**)
- L'utilisation de l'**aérothermie** augmenterait de **150 à 755 GWh/an**.
- L'utilisation des **nappes phréatiques** connaîtrait un développement très modeste à **15 GWh** pour une utilisation décentralisée. Son utilisation large dans des systèmes décentralisés est en effet très

contrainte par rapport à une utilisation en réseau (pas de possibilité de mutualisation ou d'effet d'échelle).

- L'utilisation du **bois énergie** serait idéalement réaffectée à des usages haute température et pour des chauffages individuels de bâtiments à des **altitudes supérieures à 1000 m**, là où l'utilisation de sondes verticales ou de nappes phréatique est difficilement réalisable Le potentiel du bois-énergie pour les chauffages individuels a ainsi plutôt tendance à baisser (de **375 à 230 GWh/an**)
- L'énergie **solaire thermique** pourrait se développer jusqu'à un niveau d'environ **300 GWh/an**
- L'utilisation de l'énergie fossile devrait être réduite à zéro
- Enfin, un résidu de 117 GWh devrait être comblé par des ressources renouvelables importées, ou bien peu à peu réduit grâce à la diminution renforcée des besoins des bâtiments.

La figure suivante montre comment devrait se répartir par district (valeurs en MWh) les différentes ressources renouvelables (hormis le solaire thermique dont il est difficile de prédire la répartition exacte).

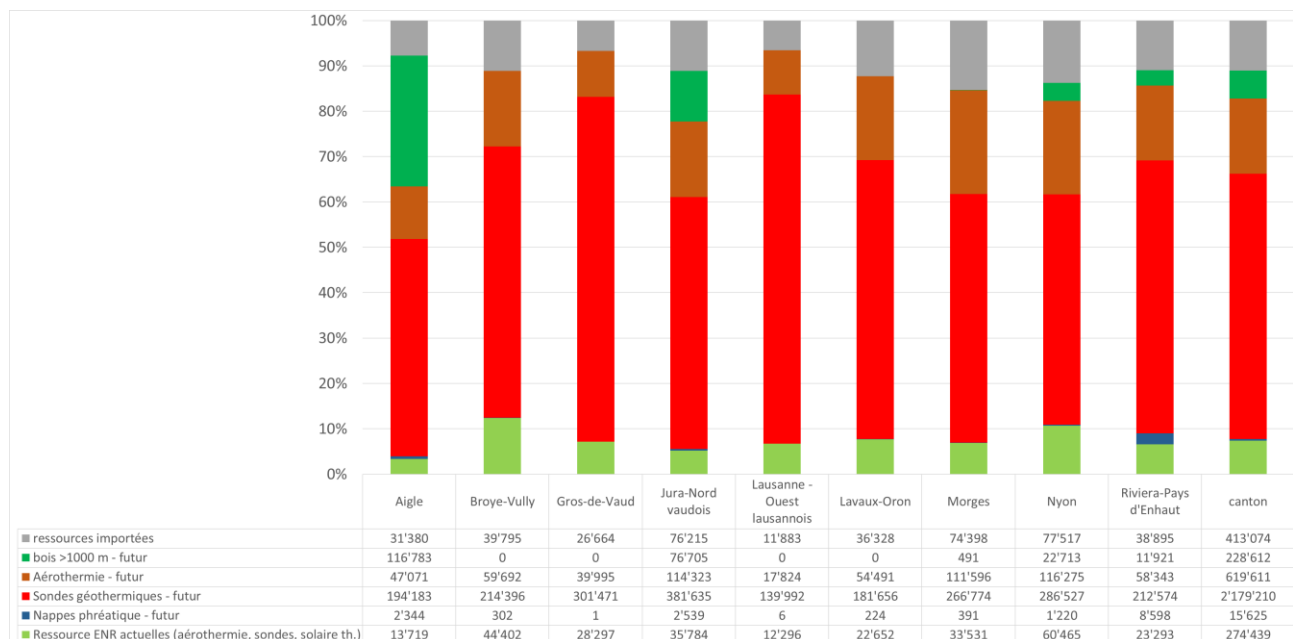


Figure 4 : Répartition future par district des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés– Valeurs données en MWh.

1.4 Perspectives de valorisation des ressources pour la chaleur de procédés

La chaleur de procédés est traitée à part et de manière globale à l'échelle cantonale. La figure suivante montre les perspectives idéales de valorisation à atteindre, à partir de la situation actuelle.

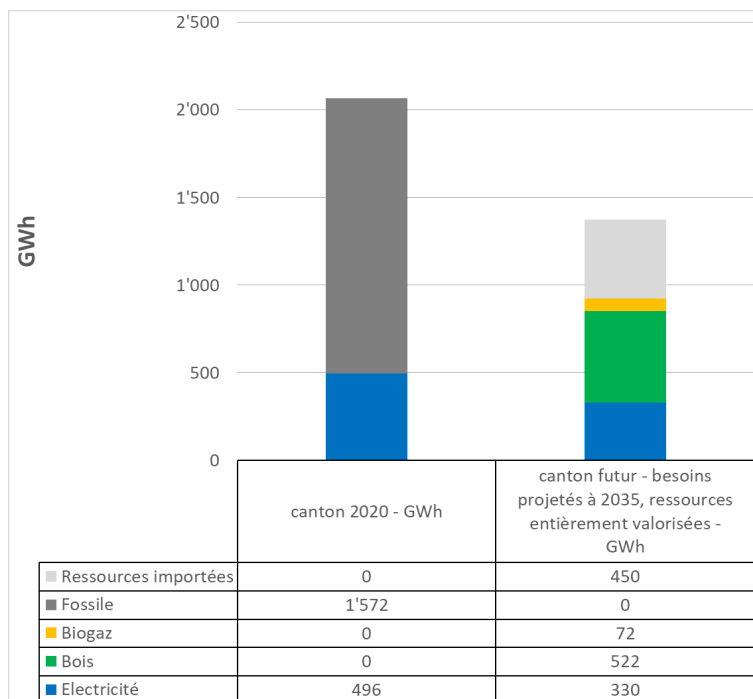


Figure 5 : Utilisation des ressources pour les procédés industriels au niveau cantonal – situation 2020 et future

Une affectation importante du potentiel **bois-énergie** du canton (**520 GWh**) devrait être consacrée dans le futur à ces besoins, qui devraient aussi être couverts par une part importante d'électricité.

Les ressources importées, utilisées pour compléter l'approvisionnement, devraient être idéalement renouvelables.

Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie doit aussi contribuer à maximiser l'utilisation du potentiel renouvelable.

2 Introduction et contexte

La chaleur représente une part importante (env. 50%) de l'ensemble des prestations énergétiques délivrées aux habitants et entreprises du canton de Vaud. Celle-ci comprend notamment les besoins pour le confort (chauffage et eau chaude sanitaire) mais également pour les procédés industriels. Plutôt que l'expression «besoins en chaleur», nous parlerons souvent de «besoins thermiques» qui est une formulation plus générale et indique la prise en compte d'une plage de température intégrant également les prestations de froid (confort ou procédés).

La maîtrise des besoins thermiques et de ses sources d'approvisionnement constitue un levier important pour atteindre les objectifs énergétiques, inscrits notamment dans la CoCEn 2019, et justifie entièrement la nécessité de déterminer les perspectives d'utilisation du potentiel de chaleur renouvelable pour le canton.

Les ressources énergétiques locales qui peuvent être employées pour garantir un approvisionnement thermique durable sont multiples et leur développement commence à prendre son essor. Mais le potentiel de ces ressources n'est pas illimité et il convient de les utiliser de manière rationnelle et coordonnée à l'échelle vaudoise afin de garantir leur valorisation de manière optimale.

Cette valorisation peut s'envisager à travers de multiples systèmes en fonction de la ressource disponible, de la typologie de l'habitat (dense, ou pas) et des besoins thermiques (niveaux de température).

Ce rapport décrit un état des lieux de la situation actuelle du canton du point de vue de son approvisionnement en chaleur et de ses besoins thermiques. L'horizon temporel de 2035 est utilisé pour réaliser une projection des besoins thermiques de base qui reste valable sur le moyen, long terme. Ensuite, une évaluation des perspectives de valorisation des ressources renouvelables pour l'approvisionnement thermique est décrite. Parmi les ressources prises en compte, on distingue celles qui sont situationnelles (les rejets thermiques, l'aquathermie, l'aérothermie ou la géothermie) de celles qui ont une extension régionale (le bois). Par ailleurs, il est fait la distinction entre les zones qui ont une densité thermique suffisamment élevée et approvisionnée plutôt de façon centralisées (i.e. propices au déploiement de réseaux thermiques), des zones moins denses et plus appropriées aux systèmes décentralisés.

Le rapport n'entre pas en matière sur la temporalité de mise en œuvre du potentiel de valorisation des ressources renouvelables, il donne par contre une vision des perspectives idéales à atteindre en matière d'énergie thermique. Ceci pour satisfaire les objectifs cantonaux et fédéraux en matière d'énergie est de climat. Les principes de base qui ont été considérés sont :

1. L'utilisation de toutes les ressources d'énergies renouvelables indigènes quel que soit le prix de leur mise en œuvre
2. L'usage exclusif de technologies classiques éprouvées. Bien qu'intéressantes, les systèmes encore peu usuels comme le stockage saisonnier, la convergence des réseaux, et les possibilités plus technologiques comme le « carbon capture », n'ont pas été pris en compte.
3. Les installations sont réalisables de manière simultanée et immédiatement (le facteur lié à l'adaptation du marché et aux coûts n'a pas été pris en compte)

Un ensemble de lignes directrices et un concept de mesures, qui permettront d'atteindre cette vision des perspectives chaleur, sont proposées. Celles-ci doivent être comprises comme une sorte de boîte à outil à disposition, dont la vitesse ou l'ampleur avec laquelle elles seront utilisées aura une influence sur l'échéance à laquelle les objectifs seront atteints.

L'échelle générale d'analyse employée pour cette approche cantonale est la maille hectométrique. Toutefois l'approche à l'échelle du bâtiment a parfois été nécessaire pour obtenir certaines statistiques par agent énergétique.

L'estimation du potentiel des ressources est calculée sur la base de critères globaux de disponibilités, de priorité d'utilisation et de viabilité économique. Pour cela, un ensemble d'algorithmes s'appuyant sur les systèmes d'information géographiques ont été développés.

Il faut toutefois préciser que les valeurs calculées doivent être considérées comme correspondant à une utilisation des ressources qui seraient optimale (ou idéale), sans tenir compte de contraintes telles que : les conflits de politiques publiques, les contraintes d'acteurs et les contraintes territoriales situées à une échelle d'analyse plus basse (notamment le bâtiment et la parcelle). Par ailleurs, le potentiel brut des ressources (notamment la géothermie) est calculé sur la base des connaissances actuelles dont la fiabilité est variable.

Pour le rendu cartographique des résultats, il a été convenu d'utiliser un découpage du canton en utilisant le contour des districts soit :

- District d'Aigle
- District de Broye-Vully
- District du Gros-de-Vaud
- District du Jura-Nord vaudois
- Les deux districts regroupés de Lausanne et Ouest lausannois
- District de Lavaux-Oron
- District de Morges
- District de Nyon
- District de Riviera-Pays d'Enhaut

3 État des lieux et projections, définition de zones d'approvisionnement en réseaux ou décentralisées

3.1 État actuel de la contribution des ressources pour l'approvisionnement en chaleur

Les données utilisées pour établir cet état actuel (année 2020) sont les suivantes :

- Table centrale du cadastre des bâtiments (la couche des besoins thermiques à l'hectare n'a pas été utilisée car elle ne permet pas de différencier les différents agents énergétiques).
- Les données de l'enquête CAD 2017 qui permettent de connaître le mix énergétique des CAD existants.

Il a été remarqué que les données de consommation globale de l'enquête CAD 2017 (729 GWh/an) ne correspondent pas avec les données qui sont référencées à l'attribut « agent énergétique CAD » dans la table centrale (626 GWh/an). Nous nous sommes fiés tout de même aux données de l'enquête 2017 en faisant abstraction de l'attribut « agent énergétique CAD » dans la table centrale (cela signifie que dans les statistiques, les 626 GWh/an ont été remplacés par les 729 GWh/an de l'enquête CAD avec leur répartition géographique qui reste quand même conforme à celle des 626 GWh/an de l'attribut « agent énergétique CAD »).

La Figure 6 présente une synthèse, par district, des contributions des ressources en distinguant :

- les pompes à chaleur (PAC) qui sont principalement utilisées avec l'aérothermie (air ambiant) ou bien des sondes géothermiques verticales
- le solaire thermique
- le bois
- la fourniture des CAD existants (selon l'enquête 2017)
- le fossile (gaz et mazout) et l'électricité directe qui sont des ressources à substituer (l'électricité étant toutefois très minoritaire par rapport à l'ampleur du gaz ou du mazout)

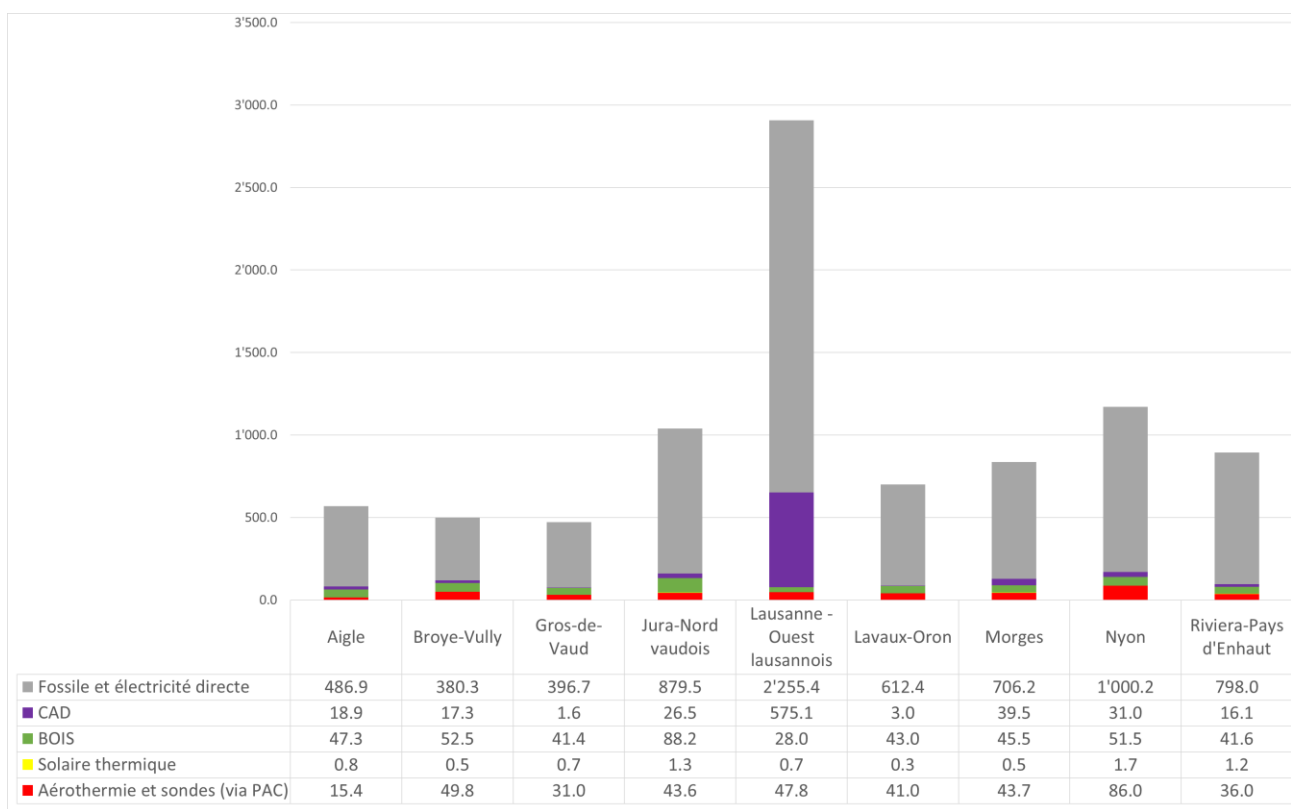
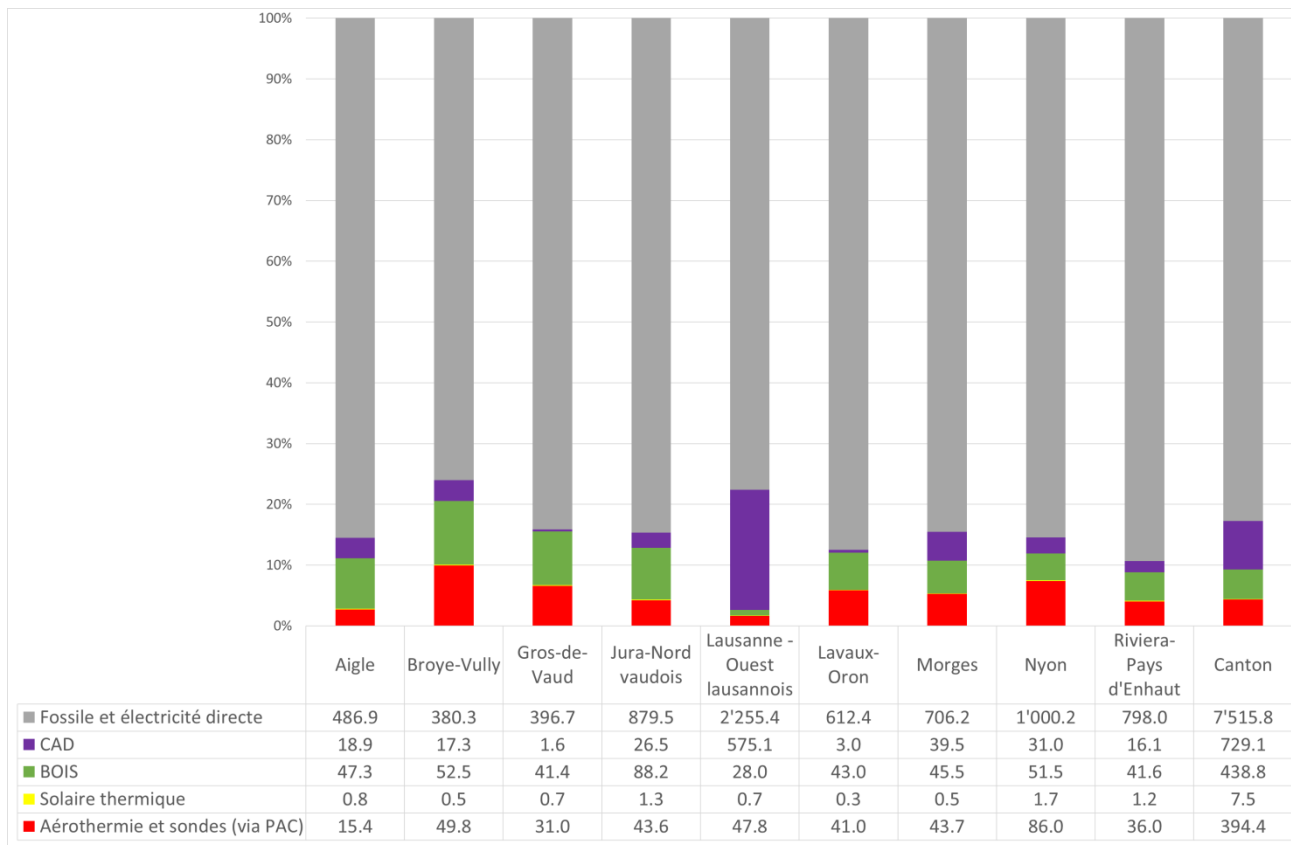


Figure 6 : Synthèse par district des contributions actuelles pour l’approvisionnement en chaleur – données en GWh – haut : histogrammes en % - bas : histogrammes en valeurs

Le détail de contribution des ressources ainsi que les zones de dessertes des CAD actuels sont montrées pour tous les districts dans l'Annexe A. La représentation par district y est faite de la façon suivante (voir un exemple Figure 7).

- Un diagramme anneau indiquant la part des différents agents utilisés dans les CAD (selon enquête 2017).
- Un diagramme en anneau indiquant la part des différents agents énergétiques utilisés hors CAD détaillant notamment la répartition entre gaz, mazout et électricité directe.

Sur chaque district, les zones de dessertes des CAD actuels ont été définies (en rouge sur la Figure 7) en définissant un contour à partir des bâtiments ayant l'attribut « agent énergétique CAD » dans la table centrale. Ces contours ont par la suite été confrontés avec les données de l'enquête CAD 2017. Dans certains cas, l'attribution « agent énergétique CAD » ne correspond en effet pas à un vrai CAD mais seulement à 2 bâtiments reliés à une chaudière et, à l'inverse, dans d'autre cas l'attribution « agent énergétique CAD » n'est tout simplement pas indiqué dans des lieux répertoriés par l'enquête CAD 2017 (cela explique les différences de chiffre observées plus haut).

3.2 Besoins thermiques projetés en 2035

3.2.1 Besoins pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

Concernant les besoins pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, les projections sont réalisées de manière quantitative en distinguant :

- Les bâtiments existants avec un potentiel de rénovation estimé de la façon suivante :
 - Taux de rénovation : 1,2% de la SRE/an²
 - Calcul à la maille hectométrique à partir d'une pondération des IDC sur l'ensemble des bâtiments de chaque maille
 - Application du standard Minergie rénovation (SIA 380/1 éd.2016)
- Les besoins des futures constructions sont déterminés :
 - en utilisant la couche géo référencée *Mesure Urbanisation* qui donne des valeurs de surfaces à construire par affectation
 - En appliquant un Standard Minergie avec un facteur de forme 1.2

Note : le scénario statistique moyen d'augmentation de la population retenu par le canton est de 135'000 habitants. En considérant un ratio de 50 m² de surface de plancher par habitant, cela implique la construction de 6'750'000 m² supplémentaire. Les données de la couche *Mesure Urbanisation* donnent une valeur de 7'300'000 m² ce qui est donc suffisant pour accueillir les habitants supplémentaires. Aussi, la couche *réserves de zones à bâtir* n'a pas été utilisée pour déterminer les besoins en chaleur des futures constructions car cela aurait induit une surestimation des besoins par rapport au scénario moyen. Les mesures d'urbanisation (décrites dans la couche éponyme) concernent les zones qui auront la plus forte augmentation de la population selon le Plan Directeur Cantonal.

Au niveau cantonal la projection en 2035 donne au final les valeurs suivantes :

- Besoins 2020 : **8'960 GWh**
- Besoins 2035
 - Bâtiments rénovés : 8'097 GWh
 - Bâtiments à construire : 57 GWh
 - Total : **8'150 GWh**

Les répartitions des densités territoriales de besoin en chaleur, à la maille hectométrique, sont quasiment similaires entre 2020 et 2035. Les parts relatives des besoins en chaleur des différents districts restent également inchangées (voir Figure 8)

² Il a été décidé récemment d'avancer les objectifs de la CoCEn à 2030 à la place de 2035. Aussi le taux de rénovation qui a été estimé pourrait être plus élevé ce qui réduirait d'avantage les besoins thermiques en 2035.

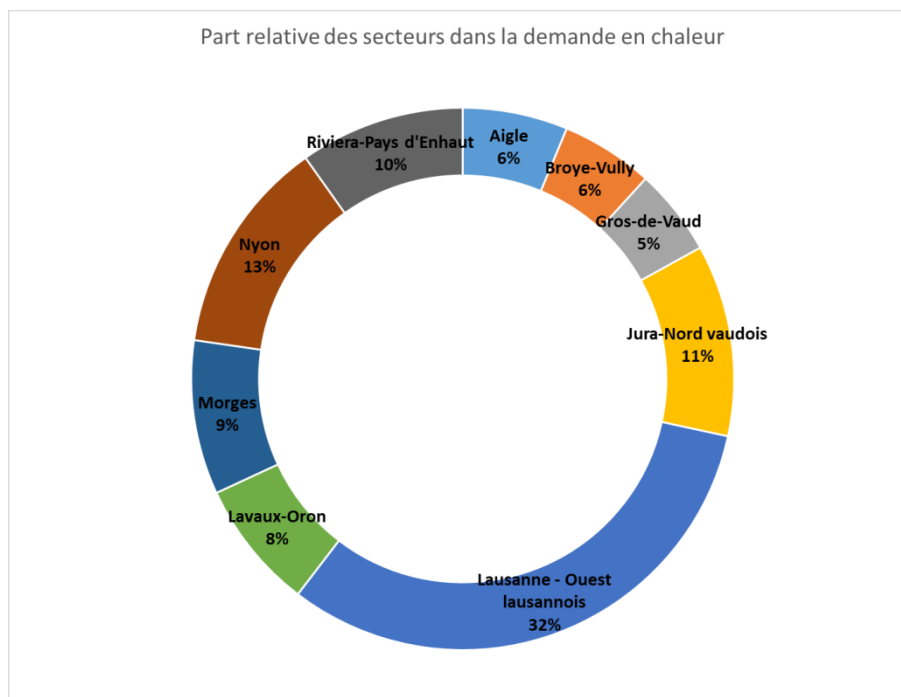


Figure 8 : Part relative des districts dans la demande en chaleur : 2020 et projection 2035

La distinction des niveaux de température de chauffage (i.e. température de l'eau dans les émetteurs) qui est répertoriée, dans la table centrale du cadastre, par trois valeurs (40, 55 et 70°C) ne s'est pas avérée pertinente dans une analyse à l'échelle hectométrique. En effet, une représentation cartographique des niveaux de température fait apparaître une grande majorité de mailles avec des besoins à 70°C, ne permettant pas de tirer des conclusions pertinentes, par exemple sur le niveau de température des réseaux de chaleur.

3.2.2 Besoins en froid – confort et procédés

Il n'est pas possible d'avoir des estimations quantitatives sur des besoins en froid en raison de l'absence de relevés systématiques et d'une grande hétérogénéité selon les affectations. Nous avons donc opté pour une évaluation plutôt qualitative en indiquant en % de SRE par maille le type de besoin thermique, soit

- Besoins chaud uniquement pour les bâtiments correspondant à des affectations sans besoins de froid (logements, écoles, dépôts).
- Besoins chaud + froid pour les bâtiments correspondant à des affectations avec besoins froids (activités, industries, commerces).

Cette évaluation est représentée de façon cartographique, par maille hectométrique, selon l'exemple de la Figure 9 : plus les mailles sont rouge, plus les besoins thermiques sont de type exclusivement *chaud*, plus les mailles sont bleus, plus les besoins thermiques sont de type *chaud et froid*.

Scale 1:

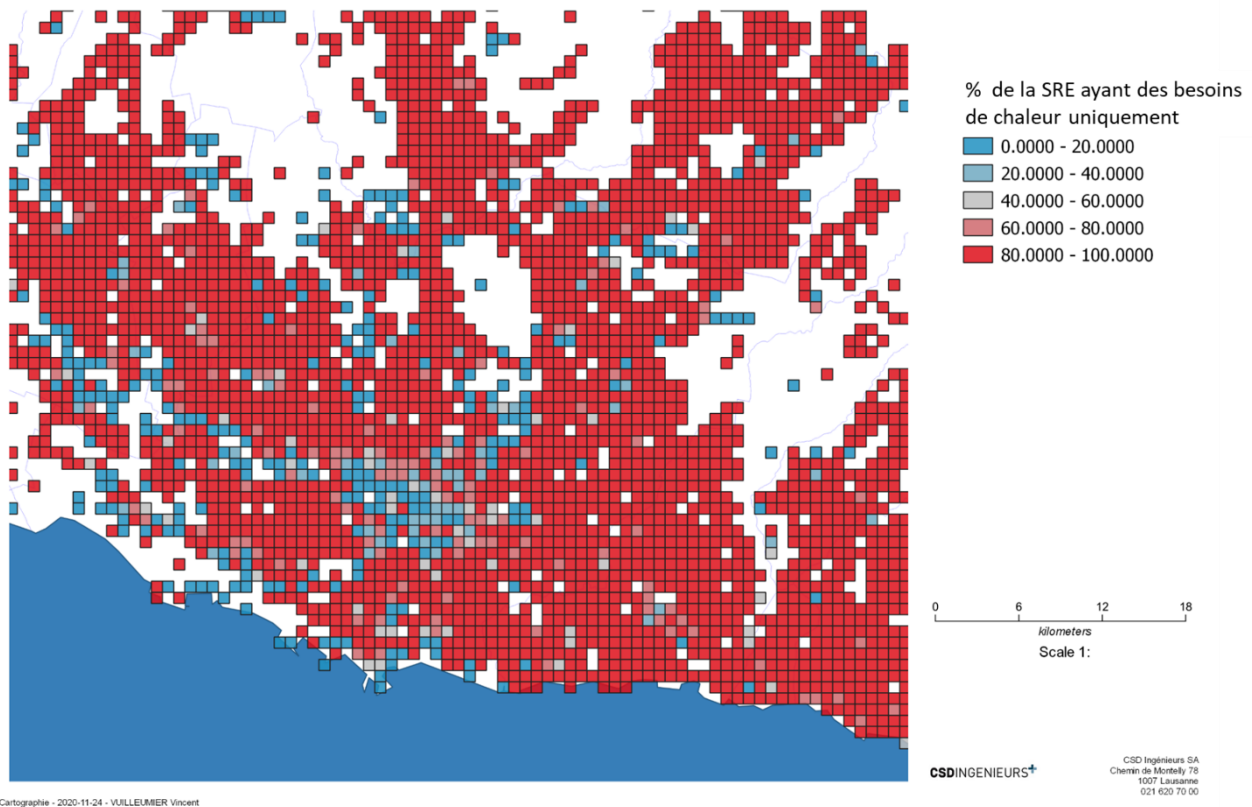


Figure 9 : Exemple de représentation cartographique des type de besoins thermiques chaud/froid

Cette représentation, qui est faite à partir de la projection 2035, permet d'identifier qualitativement les zones dans lesquelles des besoins en froid potentiels sont à satisfaire. Il serait aussi possible de calculer des valeurs de besoins en utilisant par exemple la SIA 2024 par bâtiment, mais cela n'a pas d'intérêt ici dans le cadre de la définition d'une stratégie globale. Cela d'autant plus que l'utilisation des valeurs SIA 2024 peuvent donner des résultats très trompeurs une fois agrégés à la maille.

3.3 Définition des zones propices aux réseaux thermique et propices aux systèmes décentralisés

La densité de chaleur à l'hectare est le critère de base pour définir les zones propices aux réseaux thermiques (ceux-ci sont en effet largement prépondérant par rapport aux besoins de froid dont il n'existe d'ailleurs aucune estimation quantitative suffisamment fiable).

En partant de la cartographie des besoins de chaleur à l'hectare, projetés à l'horizon 2035, un algorithme d'agrégation des mailles en grappes de densités supérieures à une valeur seuil a été utilisé (seuil à partir duquel le déploiement d'un réseau thermique serait viable). Plus la valeur du seuil est basse, plus la taille des grappes (et donc des zones propices aux réseaux) est grande.

Toute maille agrégée qui comporte moins de trois bâtiments n'est pas prise en compte. Cela évite de prendre en compte des mailles dont la densité est due à un ou deux gros bâtiments (par exemple un site grand consommateur isolé).

Un seuil raisonnable de 800 MWh/ha a été choisi. Celui-ci entraîne l'agrégation des mailles en zones propices représentant une demande totale en chaleur de 4'400 GWh (soit environ 50 % de la demande totale du canton)

La répartition cantonale des zones propices aux réseaux est montrée, par maille hectométrique, sur la Figure 10 (en rouge). Ces zones se répartissent principalement dans les 4 principaux pôles urbains du canton :

- Agglomération de Lausanne-Morges
- Agglomération de Vevey-Montreux
- Agglomération de Nyon-Gland
- Agglomération d'Yverdon-les-Bains

Toutes les autres mailles hectométriques bâties (i.e. ayant des besoins thermiques), situées en dehors de ces zones propices, sont considérées comme faisant partie des zones hors réseaux (i.e. propices aux systèmes décentralisés).

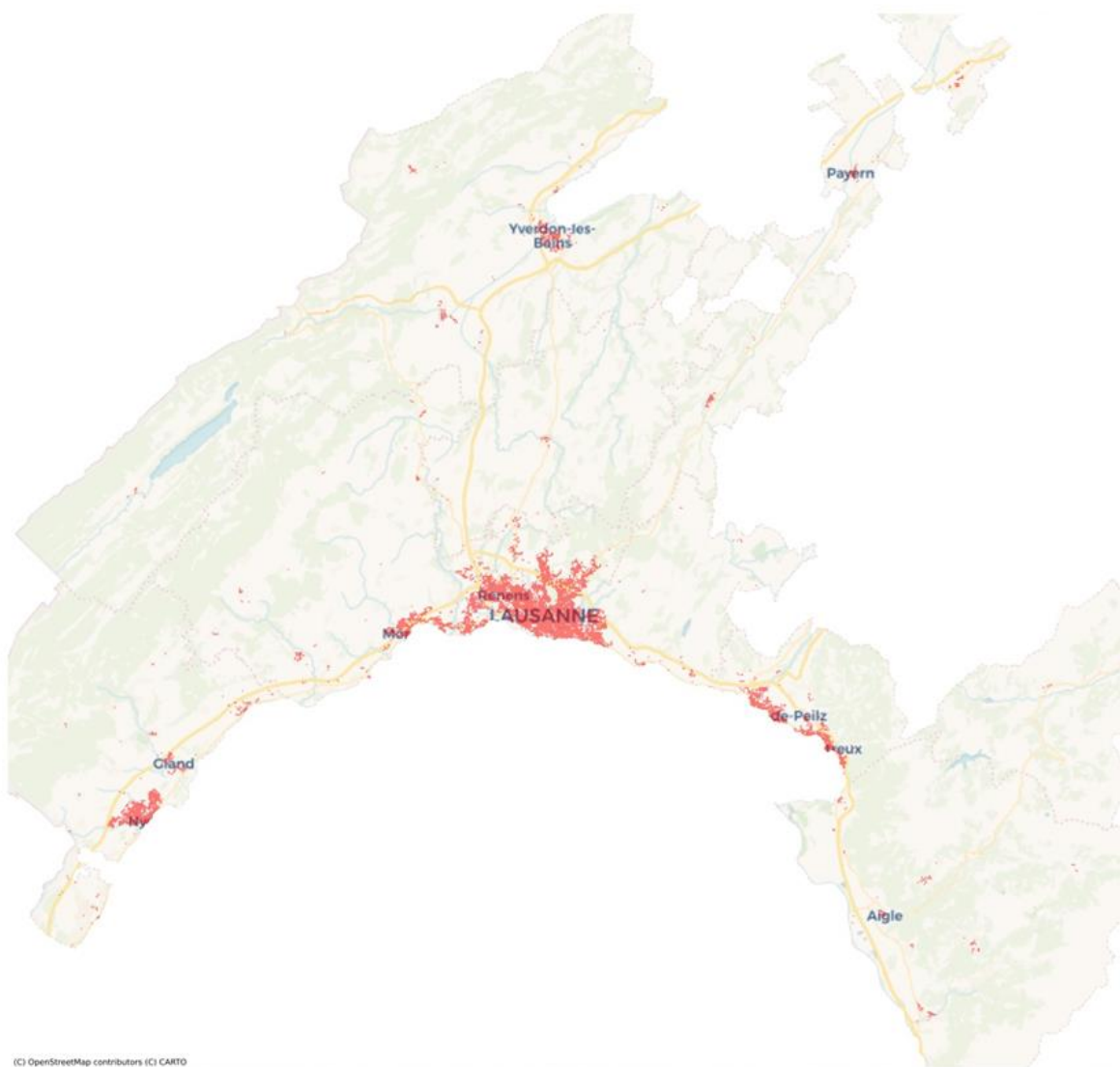


Figure 10 : Carte des zones propices aux réseaux thermique – seuil à 800 MWh/ha – selon des besoins projetés à 2035

La cartographie des zones réseaux et hors réseaux est présentée de manière plus détaillée par district dans Annexe B. Dans chaque district, un diagramme en anneau représente, par rapport à la projection des besoins en 2035 :

- En bleu : la part des besoins en chaleur du district fournie par les CAD actuels
- En vert : la part des besoins en chaleur situés dans les zones propices aux systèmes décentralisés (tels que définis précédemment)
- En orange : la part de besoins supplémentaires qui seraient à fournir par les CAD si l'on voulait couvrir toute la demande des zones propices aux réseaux.

La part relative des couleurs bleu et orange donne une idée, par district, de l'effort à produire en terme de développement de réseau si l'on souhaite développer l'ensemble des zones propices par rapport à la situation actuelle (voir exemple Figure 11).

Morges

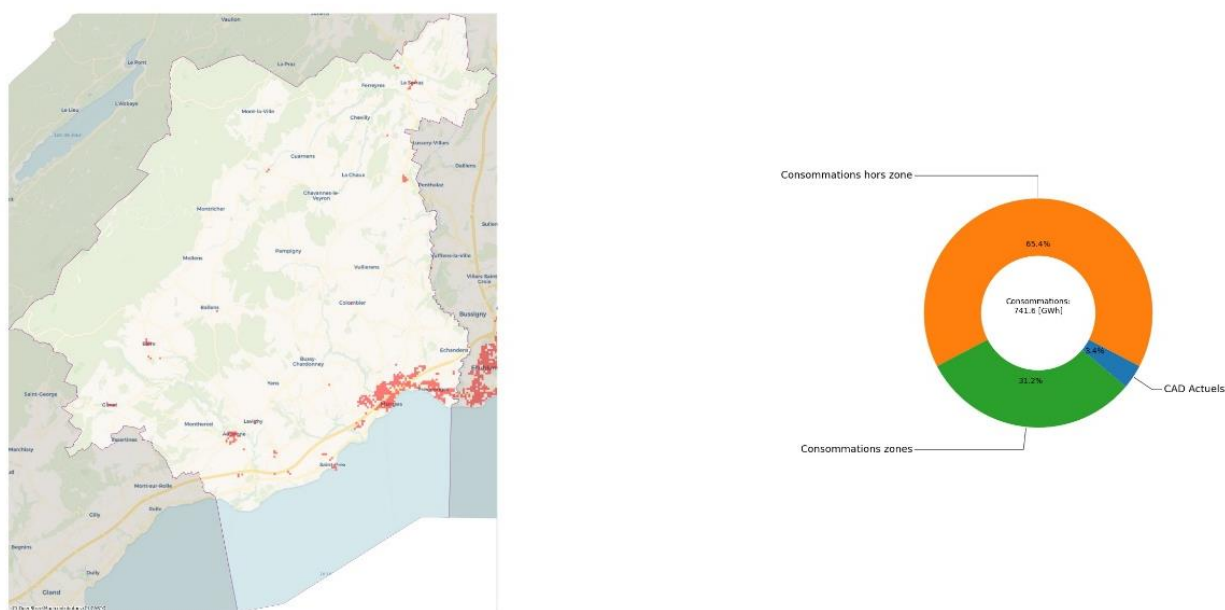


Figure 11 : District de Morges – zones propices aux réseaux et hors réseaux en 2035

3.4 Besoins en chaleur de procédés

Il n'existe pas de données officielles sur les besoins en chaleur pour les procédés industriels dans le canton de Vaud. Une estimation globale, extrapolée au niveau du canton à partir de données nationales de l'OFEN donne un chiffre de **2'068 GWh/an**. Toujours sur la base de données fédérale, on estime que :

- 24 % de la chaleur de procédés est fournie par l'électricité
- 76% de la chaleur de procédés est fournie par le gaz et le mazout

La chaleur de procédés doit en effet la plupart du temps être disponible à des températures supérieures à 100°C.

A noter que les grands consommateurs thermiques sont bien pris en compte dans ces valeurs.

En se fondant sur les objectifs de la CoCEn en matière de réduction de chaleur « industrie et service », une projection des besoins en chaleur procédés à l'horizon 2035 donne **1374 GWh**. En considérant la même répartition par agents énergétique qu'actuellement, cela donne :

- 24% soit 330 GWh à fournir par l'électricité
- 76% soit 1044 GWh à fournir par des agents énergétiques se substituant le plus possible au fossile (type bois/biogaz/électricité pour PAC haute température)

4 Utilisation des ressources situationnelles dans les zones propices aux réseaux thermiques

4.1 Potentiel de valorisation des ressources situationnelles

Les ressources situationnelles étudiées sont les suivantes :

- STEP et rejets thermiques industriels
- Aquifères à moyenne profondeur
- Eau des lacs
- Nappes phréatiques

Dans un premier temps, le potentiel de valorisation de ces ressources dans les zones propices aux réseaux est évalué. Les algorithmes de calcul, par ressource, sont décrits ci-après. Ils ont pour point commun de :

- Considérer chaque ressource individuellement
- Considérer la totalité de la demande des zones propices en 2035 sans tenir compte des autres ressources renouvelables déjà valorisées dans les CAD actuels

Le potentiel des sondes géothermiques n'est pas calculé car cela nécessiterait, pour être pertinent, une analyse plus fine au niveau du bâtiment ou de la parcelle pour déterminer les espaces réellement disponibles pour leur implantation dans des zones au bâti dense. Par ailleurs, nous considérons que l'emploi de sondes verticales n'est généralement pas favorable pour alimenter à grande échelle des réseaux thermiques car cela nécessite l'implantation de larges champs avec des investissements très élevés pour obtenir une contribution énergétique significative. De plus, sur le long terme, les champs de sondes ne sont viables que s'il y a la possibilité d'avoir un équilibre thermique sur l'année, avec une recharge estivale suffisante par la production de froid. Cette situation d'équilibre entre les besoins en chaud et en froid ne se rencontre finalement qu'un nombre limité de fois pour espérer obtenir une contribution significative à l'échelle de toutes les zones propices aux réseaux.

4.1.1 STEP et rejets thermiques industriels

Les STEP et rejets thermiques industriels pris en compte sont les suivants:

- des 16 STEP constituées à ce jour ou d'ici 2035 en pôles micro-polluants. Elles représentent 88% des équivalents-habitants du canton.
- des 4 sites répertoriés avec des rejets thermiques industriels supérieurs à 4 GWh/an (informations extraites de la couche *RejetsThermiques* fournie par la DIREN) soit Brain Serve à Crissier, Merck Serono à Corsier, Holcim à Eclepens, Bains de Lavey. À noter que les données de la couche ne sont pas exhaustives, ainsi il y a certainement d'autres rejets exploitables qui n'ont pas pu être identifiés.

Chaque site est considéré comme une source de chaleur ponctuelle. E_{source} est la quantité de rejets de chaleur annuelle, supposée constante toute l'année, et P_{source} est la puissance moyenne de la source, soit $E_{source}/8760h$ (E_{source} et P_{source} sont calculés en valeurs « sortie PAC » avec un **COP** supposé de **3,5**) La méthode de calcul utilisée pour déterminer le potentiel de valorisation de ces sources de chaleur est la suivante :

- Uniquement les mailles situées dans un rayon de 4 km autour d'une source sont prises en compte (pour éviter d'alourdir inutilement le temps de calcul)

- À l'intérieur de ce rayon, les mailles sont agrégées en grappes de densités supérieures à 800 MWh/ha (seuil retenu pour les zones propices au réseau)
- Les mailles sont agrégées tant que : $E_{grappes}/2000 h < 10 \times P_{source}$. Où $E_{grappes}$ est la demande en chaleur cumulée des grappes et $E_{grappes}/2000 h = P_{grappes}$ est la puissance spécifique de la demande en chaleur (les 2000 h correspondant à la valeur moyenne d'heure annuelle de fonctionnement à pleine charge pour un réseau de chaleur).
- L'énergie valorisable par la source de chaleur dans l'ensemble des mailles agrégées est $E_{valo} = f(P_{source}/P_{grappes}) * E_{grappes}$ Où la fonction f donne le ratio classique (selon la monotone de chaleur standard d'un réseau CAD) d'énergie fournie par une puissance P_{source} dans un réseau de chaleur de puissance max $P_{grappes}$
- Les grappes pour lesquelles la condition, *demande en chaleur/distance minimale à la source de chaleur* < 2,5 MWh/m, est vérifiée sont éliminées et le calcul de l'énergie valorisable par la source est remis à jour en retranchant la demande en chaleur de la grappe éliminée. Cette condition finale évite de retenir des grappes trop éloignées de la source pour lesquelles la construction d'un réseau ne serait pas viable (critère de densité trop faible). Le critère de densité choisi (2,5 MWh/m) est calculé sur une distance en ligne droite, il est donc plus élevé que les critères généralement admis en Suisse (jusqu'à 1,8 MWh/m).

Le principe général de la méthode est donc de calculer la valorisation maximale (jusqu'à 10% de la puissance) d'une source dans un réseau de chaleur (voir illustration de la Figure 12).

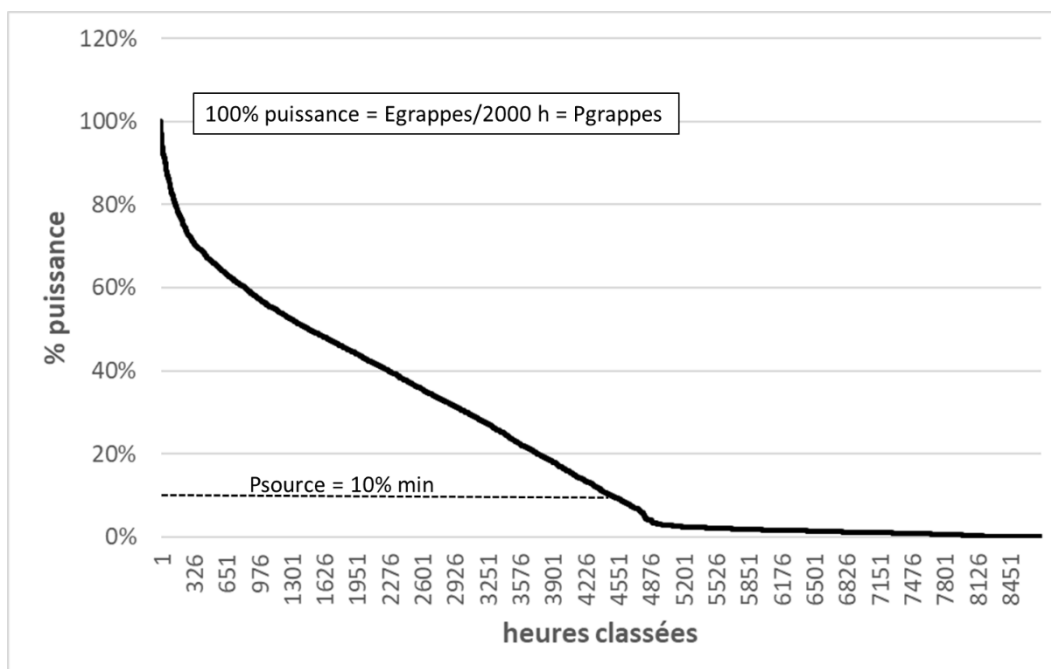


Figure 12 : Illustration de la méthode de calcul de valorisation d'une source dans un réseau de chaleur

L'algorithme détermine un ensemble de mailles agrégées autour d'une source de chaleur avec notamment la valeur d'énergie valorisable (E_{valo}) ainsi que le ratio entre la puissance de la source et la puissance spécifique de la demande en chaleur des grappes ($P_{source}/P_{grappes}$). Les mailles sont incluses dans les zones propices aux réseaux puisqu'elles sont agrégées avec le même seuil de densité. Un exemple de résultat est montré sur la Figure 13 dans le cas de la STEP de Pully.

La monotone utilisée pour le calcul de valorisation (voir Figure 12), est la même pour toutes les mailles (donc pour tous les bâtiments qui pourraient être raccordés, sans distinction de performance). Cette monotone est calculée sur la base d'une performance moyenne plus élevée (pente assez raide) que celle que l'on devrait rencontrer pour les réseaux thermiques. Ce choix permet d'éviter de surestimer le potentiel calculé, par rapport à ce qui pourra se faire dans la réalité.

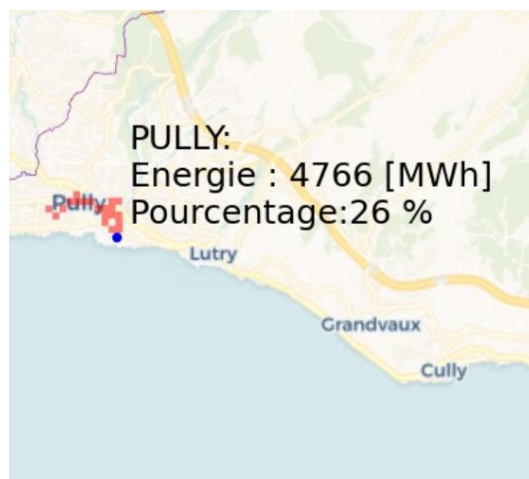


Figure 13 : exemple de cartographie de zones réseaux dans lesquelles l'énergie d'une STEP peut être valorisée

L'ensemble des cartographies par district est disponible dans Annexe C.

Les valeurs calculées sont résumées dans les Tableau 1 et Tableau 2. Le calcul des quantités de chaleur disponibles est fait en considérant l'utilisation de PAC avec un **COP de 3,5**.

District	Rejets disponibles STEP - MWh	Puissance thermique disponible STEP - MW	Demande de la zone propice - MWh	Puissance zone propice - MW	Energie valorisée - MWh
Aigle	79'143	9.0	31'512	15.8	24'936
Broye-Vully	36'681	4.2	50'122	25.1	16'638
Gros-de-Vaud	13'186	1.5	25'404	12.7	7'659
Jura-Nord vaudois	31'959	3.6	71'404	35.7	18'854
Lausanne - Ouest lausannois	282'416	32.2	644'170	322.1	166'964
Lavaux-Oron	8'079	0.9	18'068	9.0	4'767
Morges	57'489	6.6	130'280	65.1	33'965
Nyon	48'329	5.5	79'393	39.7	27'544
Totaux	557'282	64	1'050'353	525	301'328

Tableau 1 : STEP –chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts

District	Rejets disponibles - MWh	Puissance thermique disponible - MW	Demande de la zone propice - MWh	Puissance zone propice - MW	Energie valorisée - MWh
Lausanne - Ouest lausannois	8'788	1.0	18'822	9.4	5'162
Morges	11'557	2.0	6'438	3.2	6'371
Riviera-Pays d'Enhaut	8'885	1.1	19'686	9.8	5'495
Totaux	29'230	4	44'946	22	17'029

Tableau 2 : Rejets thermiques industriels - chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts

Pour les **STEP** sur une quantité de chaleur disponible totale de **557 GWh**, le potentiel de valorisation maximal serait de **301 GWh**

Pour les **rejets thermiques industriels**, sur une quantité de chaleur disponible totale de **29 GWh**, le potentiel de valorisation maximal serait de **17 GWh**. À cette quantité, il est rajouté un potentiel de valorisation de **40 GWh** dans le district d'Aigle qui est une donnée d'une étude en cours pour la valorisation de la chaleur de la SATOM dans un futur CAD couvrant la commune d'Aigle

4.1.2 Eau des lacs

Les lacs considérés comme ressource potentielle à valoriser sont

- Léman
- Neuchâtel
- Morat

La méthode appliquée pour calculer le potentiel de valorisation des lacs est la suivante :

- Uniquement les mailles situées à une distance inférieure à 2 km d'un lac sont prises en compte (il est supposé en effet qu'aucun projet situé à distance supérieure à 2 km de la berge n'est susceptible de se développer)
- À l'intérieur de ce périmètre, les mailles sont agrégées en grappes de densités supérieures à 800 MWh/ha (seuil retenu pour les zones propices au réseau)
- Les grappes pour lesquelles la condition, *demande en chaleur/distance minimale au lac* < 2,5 MWh/m, est vérifiée sont éliminées, pour la même raison que celle expliquée dans le cas des STEP et rejets thermiques industriels.
- Contrairement aux autres ressources, les lacs représentent en eux-mêmes un potentiel gigantesque, aucune limitation sur la demande cumulée des mailles agrégées n'est donc appliquée. La limitation sur le potentiel exploitable des lacs est déterminée par le nombre et la capacité (en termes de débit) des captages praticables. Cette limitation est déterminée sur la base des hypothèses suivantes :
 - Les zones propices situées le long de berges du lac pour lesquelles la bathymétrie est incompatible avec la pose de conduite sous lacustre sont éliminées. Une bathymétrie incompatible correspond à un profil du fond du lac où la cote - 60 m est située à plus de 2 km de la berge (pose de conduite trop coûteuse pour arriver à une profondeur de captage acceptable selon l'état de l'art actuel). Cette condition permet d'éliminer d'emblée tous les abords des lacs de Neuchâtel et de Morat. La définition de la cote limite de -60 m a été choisie, de manière conservatrice, en fonction des profondeurs atteintes pour des projets existants (autour de -50 m). Toutefois à 10 m près, cette valeur limite ne change pas les conclusions quant aux parties de berges retenues.
 - Le nombre de captages est limité par la présence des ouvrages existants (de rejet ou de captage) : il est considéré un captage praticable entre deux ouvrages distants de plus de 1km. Uniquement les nouveaux captages sont pris en compte dans l'apport d'énergie thermique. Les ouvrages existants ne sont pas considérés comme pouvant être transformés à des fins énergétiques, ceux qui correspondent déjà à des utilisations énergétiques (par exemple pour l'EPFL) sont comptabilisés par le biais de l'enquête CAD 2017. Les installations de rejets, situées généralement à des profondeurs modérées, n'empêchent pas a priori l'installation d'un captage à moins de 1km dans la mesure où ceux-ci peuvent être pratiqués à des profondeurs plus importantes (>50 m).
 - Les captages praticables, selon les règles précédentes, qui ne se situent pas au droit d'une zone propice sont éliminés. Dans le district Lavaux-Oron, un captage a priori praticable (selon les hypothèses définies) au droit de la commune de Puidoux a été supprimé compte tenu de la réalité du terrain.
 - La capacité des captages est définie par un débit maximal de 1300 m³/h soit 6 MW thermique extrait avec un ΔT de 4K soit 9 MW produit par une PAC avec un COP de 3.
- Le calcul de l'énergie valorisable par le Léman (puisque c'est celui qui reste) dans les zones propices est fait en considérant le ratio entre la puissance de production de chaleur des captages possibles (au niveau des PAC) et la puissance de la demande en chaleur des zones propices (besoins thermiques zones/2000 h). Comme expliqué pour les STEP, une fonction (issue d'un profil de monotone de chaleur standard) donne une relation entre la valeur de ce ratio et la part d'énergie valorisable à partir des captages dans les zones propices.

Les valeurs d'énergie valorisable par districts sont données dans le Tableau 3. Dans les districts de Lavaux-Oron et d'Aigle, on constate que la puissance des captages possibles dépasse celle de la demande dans 2 zones ; dans ce cas l'énergie valorisable correspond à 100% de la demande de la zone propice.

Les cartographies des zones propices avec l'indication des captages sont disponibles dans l'Annexe D.

Nom	Demande de la zone propice - MWh	Puissance zone propice - MW	nb captage possibles	Puissance des captage (MW)	Energie valorisée - MWh
Aigle	8'183	4.1	1	9	8'183
Jura-Nord vaudois	127'256	63.6	0	0	0
Lausanne - Ouest lausannois	1'109'365	554.7	2	18	102'810
Lavaux-Oron	10'487	5.2	0	0	0
	6'430	3.2	1	9	6'430
	4'817	2.4	0	0	0
	554'683	277.3	3	27	143'566
Morges	554'683	277.3	2	18	99'157
	4'075	2.0	0	0	0
	8'174	4.1	0	0	0
Nyon	25'887	12.9	0	0	0
	22'446	11.2	1	9	22'408
	358'895	179.4	1	9	50'395
Riviera-Pays d'Enhaut	221'797	110.9	2	18	89'351
	188'801	94.4	3	27	118'154
Totaux	3'205'979	1'603	16	144	640'454

Tableau 3 : Eau des lacs – chaleur valorisable dans les zones propices réseaux – par districts et zones lacustres

Pour l'eau des lacs, le potentiel maximal de valorisation dans les zones propices serait de **640 GWh**.

Les cartographies des zones propices aux réseaux aux abords des lacs, ainsi que la bathymétrie et les captages existants sont présentées dans Annexe D.

4.1.3 Nappes phréatiques

Le potentiel des nappes phréatiques est déterminé à partir des données de la couche géothermie de la DIREN. Le paramètre de base utilisé est P_{nappe} , correspondant à la puissance maximale extractible d'une nappe avec des doublets et des PAC (calculée à partir des hypothèses de l'étude de CSD sur l'évaluation du potentiel géothermique exploitable des nappes phréatiques dans le canton de Vaud). P_{nappe} est donné en « sortie PAC » avec un **COP** de 4.

La méthode de calcul utilisée pour déterminer le potentiel de valorisation des nappes phréatiques est très proche de celle des STEP et des rejets thermiques industriels :

- Uniquement les mailles situées à l'intérieur du périmètre des nappes + une distance tampon de 2 km sont prises en compte.
- À l'intérieur de ces périmètres, les mailles sont agrégées en grappes de densités supérieures à 800 MWh/ha (seuil retenu pour les zones propices au réseau)
- Les mailles sont agrégées tant que : $E_{grappes}/2000 h < 10 \times P_{nappe}$. Où $E_{grappes}$ est la demande en chaleur cumulées des grappes et $E_{grappes}/2000 h = P_{grappes}$ est la puissance spécifique de la demande en chaleur (les 2000 h correspondant à la valeur moyenne d'heure annuelle de fonctionnement à pleine charge pour un réseau de chaleur).
- L'énergie valorisable par la source de chaleur dans l'ensemble des mailles agrégées est $E_{valo} = f(P_{nappe}/P_{grappes}) \times E_{grappes}$ Où la fonction f donne le ratio classique (selon la monotone de chaleur standard d'un réseau CAD) d'énergie fournie par une puissance P_{nappe} dans un réseau de chaleur de puissance max $P_{grappes}$
- Les grappes pour lesquelles la condition, *demande en chaleur/distance minimale à la nappe* < 2,5 MWh/m, est vérifiée sont éliminées et le calcul de l'énergie valorisable par la nappe est remis à jour en retranchant la demande en chaleur de la grappe éliminée. Cette condition finale évite de retenir des grappes trop éloignées d'une nappe phréatique pour lesquelles la construction d'un réseau ne serait pas viable (critère de densité trop faible).

L'algorithme détermine donc des ensembles de mailles agrégées autour et à l'intérieur des nappes. Les mailles sont incluses dans les zones propices aux réseaux puisqu'elles sont agrégées avec le même seuil de densité. Un exemple de résultat est montré sur la Figure 14 dans le cas de nappes autour d'Aubonne et de St-Prex.

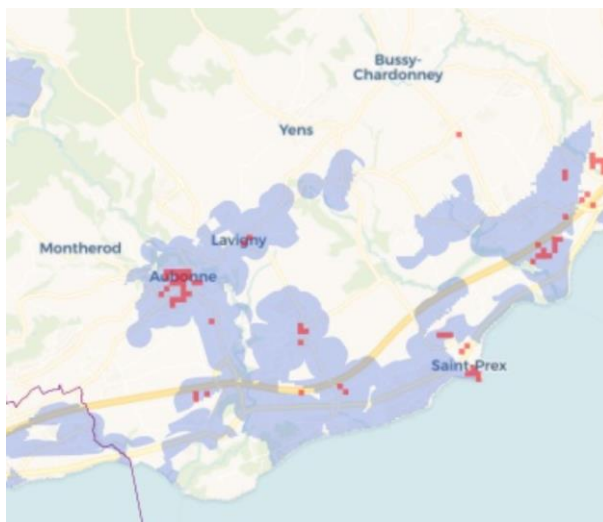


Figure 14 : Exemple de cartographie de zones réseaux dans lesquelles l'énergie des nappes peut être valorisable

L'ensemble des cartographies par district est disponible dans Annexe E.

Les valeurs calculées sont résumées dans le Tableau 4. Le calcul des quantités de chaleur disponible est fait en considérant l'utilisation de PAC avec un **COP de 4**.

District	Energie disponible - MWh	Puissance disponible - MW	Demande de la zone propice - MWh	Puissance zone propice - MW	Energie valorisée - MWh
Aigle	172'515	19.7	81'405	40.7	50'046
Broye-Vully	77'231	8.8	63'587	31.8	30'072
Gros-de-Vaud	7'115	0.8	6'628	3.3	2'876
Jura-Nord vaudois	152'478	17.4	183'316	91.7	60'191
Lausanne - Ouest lausannois	32'627	3.7	47'136	23.6	14'119
Lavaux-Oron	35'285	4.0	53'703	26.9	15'371
Morges	217'968	24.9	219'567	109.8	83'784
Nyon	177'679	20.3	123'664	61.8	59'126
Riviera-Pays d'Enhaut	311'189	35.5	446'432	223.2	133'590
totaux	1'184'088	135.2	1'225'438	612.7	449'175

Tableau 4 : Nappes phréatiques –chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts

Pour les **nappes phréatiques**, sur une quantité de chaleur disponible totale de **1'200 GWh**, le potentiel de valorisation maximal serait de **449 GWh**

4.1.4 Aquifères à moyenne profondeur

L'aquifère que nous avons considéré est celui du Malm qui est a priori le plus prometteur avec une bonne perméabilité. La méthode de calcul utilisée pour le calcul du potentiel repose sur les hypothèses suivantes concernant l'aquifère (elles sont reprises de l'étude de CSD sur *l'évaluation du potentiel géothermique exploitable des aquifères de moyenne et grande profondeur dans le canton de Vaud*) :

- L'aquifère est supposé réparti sur tout le canton
- Débit de pompage : 20 l/s par doublet
- Emprise d'un doublet : 127 ha
- La puissance thermique fournie par un doublet est calculée en fonction du débit (20 l/s), de la température de l'aquifère : globalement de moins de 40°C à plus de 105°C en allant de l'ouest à l'est du canton, et de la température de restitution prise à 10°C.
- Le fait de prendre une température de restitution à 10°C, permet d'augmenter considérablement la puissance extraite lorsque la température de l'aquifère augmente. On considère donc que des PAC

sont systématiquement installées (en direct pour les aquifères à température proches de 50-60°C ou bien en sous-refroidissement sur le retour pour les aquifères à température plus élevée). Un COP global de 5 est considéré.

Ensuite, le calcul du potentiel valorisable dans les zones propices aux réseaux est fait de la façon suivante :

- Calcul du nombre de doublets possibles (selon l'aire des zones propices et l'emprise nécessaire à chaque doublet, soit 127 ha)
- Calcul de la puissance totale extractible selon le nombre de doublets, transformée en puissance de production de chaleur en appliquant un COP de 5.
- Calcul de l'énergie valorisable par l'aquifère dans la zone propice en considérant le ratio entre la puissance de production de chaleur calculée précédemment et la puissance de la demande en chaleur de la zone (selon le profil de la monotone type déjà utilisé pour les autres ressources).

Les résultats du calcul sont présentés dans le Tableau 5.

District	Puissance moyenne par doublet MW	nombre de doublets possibles dans les zones propices	Puissance extractible des doublets - MW	Puissance disponible totale à la PAC (COP = 5) - MW	Energie disponible - MWh	Demande de la zone propice - MWh	Puissance zone propice - MW	Energie valorisée MWh
Aigle	8.8	0.9	7.6	9.5	83'455	99'064	50	45'845
Broye-Vully	4.4	0.8	3.4	4.2	37'026	90'931	45	22'581
Gros-de-Vaud	3.5	0.2	0.8	1.0	8'703	32'794	16	5'499
Jura-Nord vaudois	1.4	2.1	3.1	3.9	33'919	248'523	124	22'148
Lausanne - Ouest lausannois	4.6	20.5	95.3	119.1	1'043'518	2'395'711	1'198	631'980
Lavaux-Oron	7.5	5.1	38.2	47.7	418'048	323'718	162	206'993
Morges	2.0	3.2	6.3	7.9	69'467	256'715	128	43'835
Nyon	2.4	4.9	11.8	14.8	129'635	510'740	255	82'149
Riviera-Pays d'Enhaut	9.6	4.4	41.7	52.2	457'141	450'013	225	241'181
Totaux	44.3	42.1	208.3	260.4	2'280'913	4'408'209	2'204	1'302'211

Tableau 5 : Aquifère du Malm –chaleur disponible et valorisable dans les zones propices réseaux – par districts

Pour **les aquifères de moyenne profondeur**, le potentiel maximal de valorisation dans les zones propices serait de **1'300 GWh**.

4.1.5 Hypothèses pour l'estimation des COP

Pour les 4 ressources situationnelles analysées précédemment, l'estimation des COP (indiqués précédemment), pour la production thermique par PAC, a été faite en considérant les valeurs de température à la source (i.e. à l'évaporateur) en hiver soit :

- Pour les STEP/rejets thermiques : 10°C
- Pour les nappes phréatiques : 14°C
- Pour le lac : 3°C (profondeur >50m)
- Pour les aquifères : 30°C

La température moyenne produite par les PAC (i.e. au niveau du condenseur) est prise à 70°C.

4.2 Valorisation combinée des ressources situationnelles

4.2.1 Ressources futures

Dans la pratique, les potentiels des ressources situationnelles, évalués dans le futur (STEP/rejets thermiques, lacs, nappes phréatiques et aquifères), ne seront pas valorisés individuellement dans les réseaux mais plutôt mutualisés. Ces ressources pourront donc entrer en concurrence dans certains cas. Afin de gérer et de limiter au mieux l'impact de ces compétitions d'usage, dans le cadre de notre analyse à l'échelle hectométrique, les potentiels de valorisation combinée des ressources ont été attribués aux zones propices en définissant un ordre de priorité. Celui-ci utilise quatre critères :

- Le caractère plus ou moins localisé de la ressource : ce critère indique que plus la ressource dispose d'un accès sur un périmètre limité, plus il convient de prioriser son utilisation afin d'éviter de manquer une opportunité d'usage.
- La fiabilité de la ressource et la maîtrise technico-économique de son exploitation : ce critère indique le degré de fiabilité pour accéder au potentiel calculé de la ressource et le niveau de maîtrise des paramètres technico-économique d'exploitation qui en découlent ; plus la fiabilité est élevée, plus il convient de prioriser l'utilisation de la ressource car la certitude de l'aboutissement de projets de valorisation est plus grande.
- L'importance du potentiel calculé de la ressource : ce critère reflète directement la valeur du potentiel cantonal calculé pour la ressource à partir des connaissances que nous en avons à ce jour (indépendamment du niveau de fiabilité de cette connaissance, qui est traitée par le critère précédent) ; plus le potentiel d'utilisation de la ressource est important, plus il faudrait prioriser son utilisation afin d'en bénéficier au maximum.
- L'adéquation du niveau de température de la ressource pour la distribution de chaleur. Plus la ressource délivre une température proche des niveaux requis pour le chauffage, plus celle-ci devrait être privilégiée car elle permet la meilleure efficacité énergétique dans les transformations. Aucun critère relatif à l'adéquation au niveau de température pour le refroidissement n'est envisagé (celui-ci serait d'ailleurs l'exact inverse du précédent) car ce sont les besoins en chaleur qui restent largement majoritaires dans le déploiement des réseaux thermiques.

Ces quatre critères, appliqués aux différentes ressources ne vont pas dans le même sens : par exemple, les ressources les plus localisées ne présentent pas le potentiel calculé le plus important ou bien les ressources disposant d'un potentiel calculé important ne sont pas forcément les plus fiables. Pour chaque ressource, une note (de 1 à 4) et un poids a donc été attribué aux différents critères afin d'obtenir une note globale. Un poids équivalent a été donné aux 4 critères (voir Tableau 6).

Critère	STEP et rejets thermiques	Lacs	Aquifères	Nappes	Poids
Caractère plus ou moins localisé de la ressource	4	3	2	1	25%
Fiabilité de la ressource et maîtrise technico-économique de son exploitation	4	3	1	2	25%
Importance du potentiel calculé de la ressource	1	3	4	2	25%
Adéquation du niveau de température pour le chauffage	2	1	4	3	25%
Note globale	2.75	2.5	2.75	2	

Tableau 6 : Valorisation combinée des ressources situationnelles – note globale pour la priorisation

Il en ressort donc l'ordre de priorité suivant attribuée aux ressources futures (les STEP et rejets thermiques obtiennent la même note que les aquifères mais il est choisi de les placer prioritaires).

- STEP et rejets thermiques
- Aquifères
- Lacs
- Nappes phréatiques

Cet ordre n'est toutefois pas absolu car il dépend notamment du poids que l'on choisit de donner aux différents critères de classification (cf Tableau 6). Dans la pratique de chaque projet, cet ordre sera adapté selon les spécificités locales.

4.2.2 Intégration des ressources situationnelles déjà valorisées dans les CAD

Il faut aussi prendre en compte les ressources utilisées actuellement dans les CAD (selon le recensement de l'enquête 2017). Celles-ci sont logiquement prioritaires par rapport aux ressources futures et elles sont classés selon le même principes (i.e. rejets de chaleur en tête, suivi par déchets et lacs).

Au final, l'intégration de toutes les ressources actuelles et futures est faite selon la hiérarchie suivante :

1. Rejets de chaleur (CAD actuels)

2. Déchets (CAD actuels)
3. Boues incinérables (CAD actuels)
4. Lacs (CAD actuels)
5. **STEP et rejets thermiques (futur)**
6. **Aquifères (futur)**
7. **Lacs (futur)**
8. **Nappes phréatiques (futur)**

Le bois actuellement valorisé dans les CAD n'est pas considéré, il sera réattribué plus tard en tant que ressource non situationnelle.

4.2.3 Répartition des ressources et analyse

Le calcul des contributions de chacune de ces ressources, en tenant compte des concurrences d'usage, est fait, par district, en les empilant, selon l'ordre de priorité défini précédemment, sur une monotone correspondant à la performance moyenne d'un réseau de chaleur. Cette monotone définissant la demande potentielle des différentes zones propices aux réseaux, d'un district (voir illustration Figure 15). Dans le calcul, le potentiel maximal de chaque ressource reste limité par la valeur qui a été déterminée individuellement à l'aide de la monotone de la Figure 12 qui, comme expliqué plus haut, ne correspond pas à la performance moyenne d'un réseau de chaleur afin d'éviter de surestimer les potentiels.

La contribution finale de chaque ressource est donc nécessairement moins importante que le potentiel maximal de valorisation qui a été estimé précédemment pour chaque ressource prise individuellement.

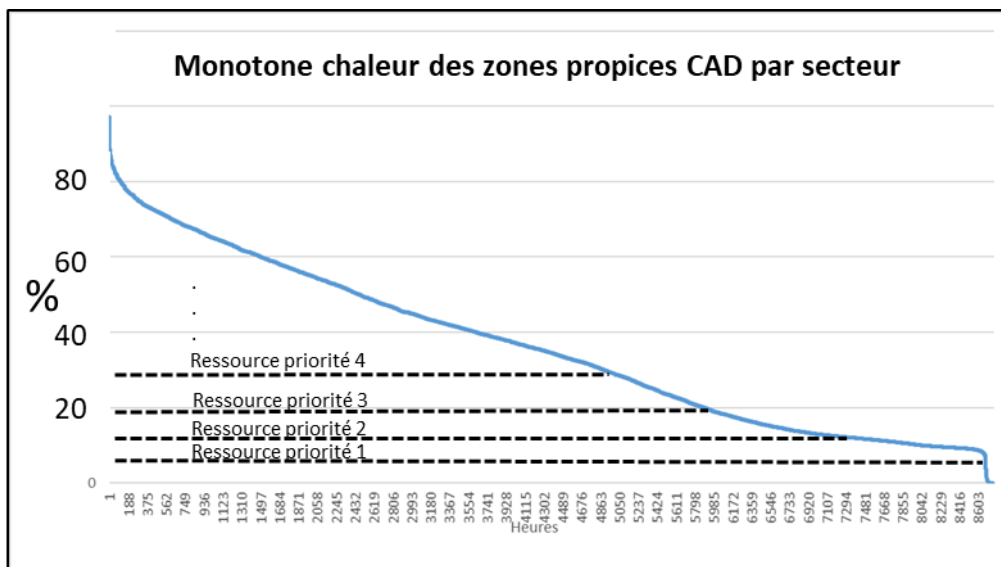


Figure 15 : Illustration du calcul des contributions combinées des ressources situationnelles dans les zones propices aux réseaux

La répartition des ressources situationnelles (actuelles et futures), obtenue par district, est présentée sous forme d'histogramme, dans la Figure 16. La couleur grise indique la part d'énergie manquante pour satisfaire toute la demande en chaleur des zones propices aux réseaux ; ce complément reste à définir et pourra être constitué par du bois, des ressources importées renouvelables ou fossiles, mais aussi par des systèmes individuels décentralisés utilisant la chaleur de l'environnement (pompes à chaleur). En effet, l'objectif n'est pas nécessairement de développer les réseaux dans l'intégralité des zones propices (50% de la demande cantonale selon la section 3.3) mais plutôt de valoriser au mieux le socle de ressources situationnelles renouvelables qui a été calculé

La répartition indiquée sur la Figure 16 montre donc, par district, les perspectives optimales d'utilisation à envisager pour les ressources situationnelles en réseaux. La particularité de ces ressources est de ne pas être accessible uniformément sur le territoire et d'être disponible en quantités très variables selon les lieux. Cela se traduit par de grandes variabilités de mix et de taux de couverture selon les districts.

Les ressources déjà valorisées dans les CAD actuels présentent les contributions les plus significatives dans les districts déjà bien équipés en réseaux (Lausanne-Ouest lausannois et Morges pour la quasi-totalité avec des taux autour de 10%).

En ce qui concerne la valorisation des ressources futures, les éléments suivants sont à noter :

- La contribution importante des **aquifères** dans les districts de **Lausanne-Ouest lausannois, Lavaux-Oron** et **Riviera-Pays d'Enhaut** qui est notamment et théoriquement due au fait que leur niveau de température est plus élevé à l'est qu'à l'ouest du canton. Toutefois, les aquifères apportent une contribution significative (de 10 à 25%) dans tous les autres districts. Ceci sous réserve des incertitudes liées à la connaissance actuelle du sous-sol.
- La **ressource lacustre** apporte sa contribution uniquement pour les districts bordant le Léman (**Lausanne-Ouest lausannois, Morges, Nyon** et **Riviera-Pays d'Enhaut**) avec des taux allant de 12% à près de 30%, sauf pour Lausanne-Ouest lausannois dans lequel la contribution est faible en valeur relative mais important en valeur absolue.
- La ressource des **nappes phréatique** est répartie sur tous les districts, mais apporte plus particulièrement une contribution significative (de 10% à plus de 20%) pour **Aigle, Broye-Vully, Jura-Nord vaudois, Morges** et **Nyon**.
- Les **STEP** (i.e. les 16 pôles micro-polluants retenus) apportent également une contribution importante de 10% à plus de 20% dans **tous les districts** où elles sont présentes (sauf pour Lavaux-Oron avec une faible contribution et Riviera-Pays d'Enhaut qui n'abrite pas de STEP).
- La contribution des **rejets thermiques industriels**, là où il y en a, reste **confidentielle** sauf le cas particulier du **district d'Aigle** dans lequel a été pris en compte le projet de valorisation des rejets thermiques de la SATOM dans un réseau de chaleur pour les communes d'Aigle et d'Ollon.

À l'échelle cantonale, la contribution des ressources situationnelles dans l'alimentation en chaleur des zones propices aux réseaux dépasse les 50%.

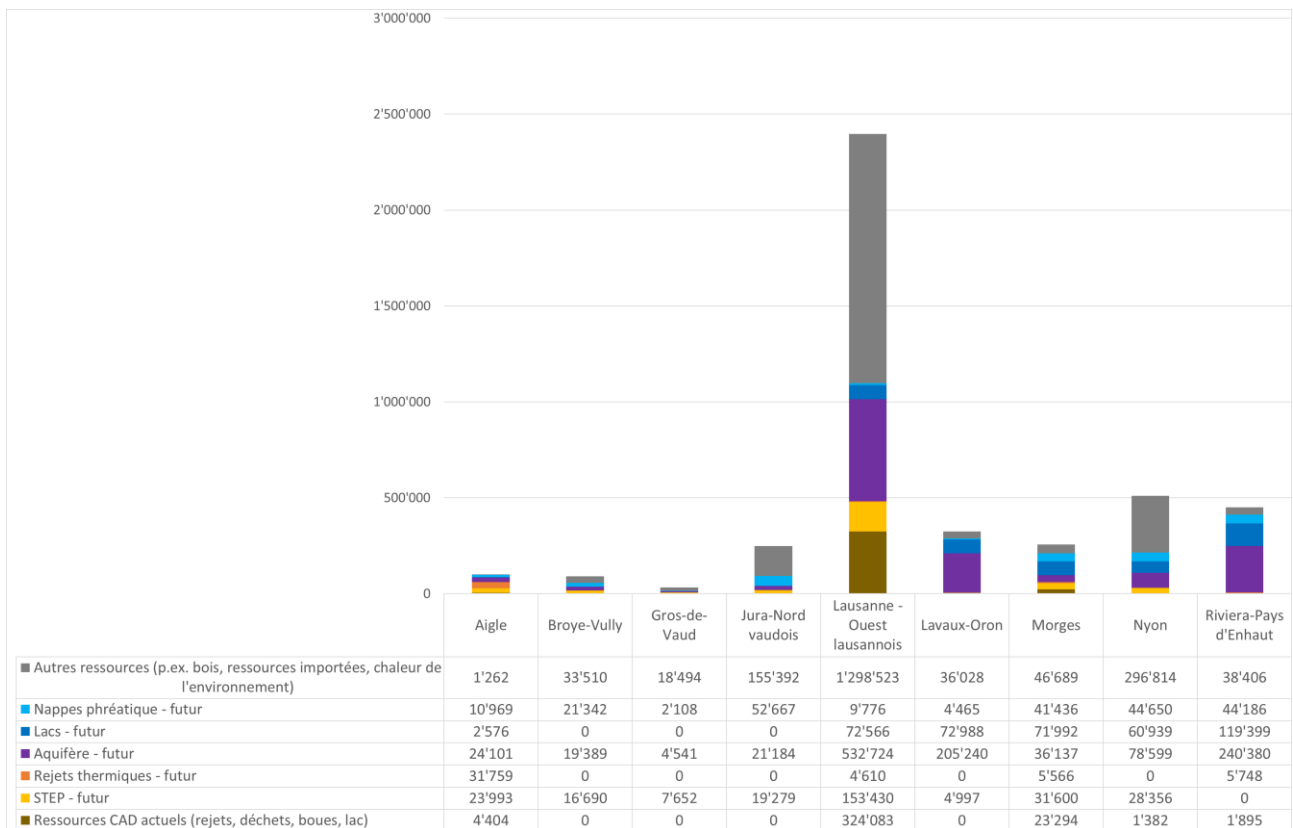
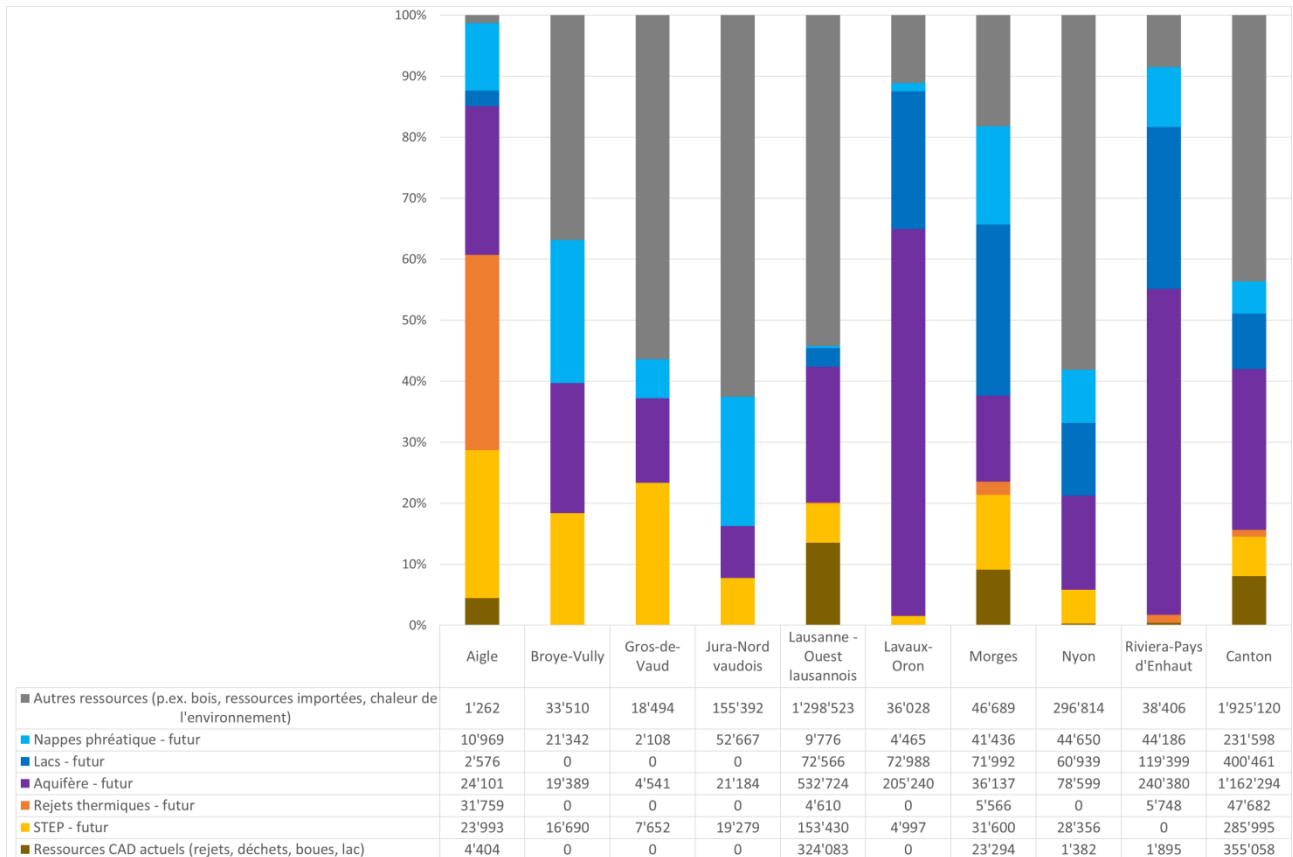


Figure 16 : Répartition des ressources situationnelles futures et celles déjà utilisées dans les zones propices aux réseaux – Valeurs données en MWh -- haut : histogrammes en % - bas : histogrammes en valeurs

5 Utilisation des ressources situationnelles dans les zones propices aux systèmes décentralisés

Ces zones sont constituées des mailles hectométriques bâties et non affectées à une zone propice aux réseaux. Il s'agit donc de zones où la densité de besoins thermiques n'est pas suffisante pour réaliser un réseau économiquement viable.

L'affectation des ressources situationnelles dans ces zones est faite, maille par maille, selon les priorités suivantes :

1. Nappes phréatiques
2. Sondes géothermiques
3. Aérothermie

Il est supposé que ces zones sont alimentées exclusivement par des systèmes décentralisés fortement monovalents (i.e. la bivalence n'existe qu'entre la ressource situationnelle considérée et l'appoint d'une source fossile : il n'est pas considéré de mix énergétiques entre plusieurs ressources indigènes comme dans le cas des réseaux thermiques).

Les méthodes de calcul des potentiels de ces trois ressources sont décrites ci-dessous.

5.1 Nappes phréatiques

Chaque maille hectométrique qui se trouve en totalité ou partiellement au-dessus du périmètre d'une nappe peut être alimentée par celle-ci. Le potentiel de valorisation de la nappe phréatique dans la maille est alors estimé de la façon suivante :

- Puissance fournie par la nappe « en sortie PAC » avec un COP de 4 : $P_{nappe} = Surface\ maille\ (ou\ surface\ partiellement\ recouverte\ par\ la\ nappe) * P_{surfacique_nappe} / (1-1/COP)$
- Puissance de la demande en chaleur de la maille : $P_{maille} = E_{maille}/2000\ h$. Il n'est pris dans E_{maille} que la part alimentée avec des ressources fossiles, de l'électricité directe et du bois énergie, les autres énergies (déjà indigènes et renouvelables) sont conservées comme apport futur. La part du bois énergie est incluse dans la demande des mailles dans le but de pouvoir réaffecter cette ressource régionale et non situationnelle de manière plus cohérente par rapport aux autres ressources sur le territoire vaudois. L'électricité directe, au même titre que le fossile (gaz et mazout) est considérée comme devant être substituée.
- Calcul de l'énergie valorisable : $E_{valo} = f(P_{nappe}/P_{maille}) * E_{maille}$ Où la fonction f donne le ratio classique d'énergie fournie par une puissance P_{nappe} dans un bâtiment dont la puissance spécifique est P_{maille} (pratiquement dans notre approche ce ratio est considéré identique à celui utilisé pour le calcul des ressources dans les réseaux)
- La nappe phréatique est affectée à la maille uniquement si le ratio atteint au moins 80%

La quantité d'énergie valorisable est ainsi de **14 GWh**. Cette valeur plutôt faible tient aux hypothèses de calculs qui prennent en compte, pour la capacité d'une nappe, uniquement la partie de sa surface située sous une maille, ainsi que d'une part de fourniture en chaleur devant être supérieure ou égale à 80%.

5.2 Sondes géothermiques

Chaque maille hectométrique, non affectée à une nappe phréatique, peut être alimentée par des sondes géothermiques, à condition de se situer dans les zones suivantes :

- zones *admissible* et zones *limitation* selon le cadastre géothermique (pour la région du jura un cadastre non officiel de ces zones a été utilisé). Les zones *limitation* sont considérées comme admissibles sous condition d'un suivi hydrogéologique.

- Pour la région du Chablais et des Préalpes, qui n'est pas cadastrée, les hypothèses suivantes ont été prises (en accord avec la DGE-EAU) : sondes admissibles pour Château-d'Oex, Rougemont, Bex, Ollon (sans Villars), la moitié d'Aigle et la moitié des Diablerêts.

Le potentiel de valorisation des sondes verticales dans la maille est ensuite estimé de la façon suivante :

- Calcul du nombre de sondes géothermiques à installer, espacées de 10 m et de 250 m de profondeur, pour satisfaire la puissance P_{maille} (calculée de la même manière que pour les nappes phréatiques). Un ratio de 30 W/m de puissance linéique et un COP de 4 sont considérés.
- La profondeur des sondes est toutefois limitée à 100 m dans les régions suivantes : Jura (en raison de la géologie particulière de type karstique) et Aigle-Ollon-Bex (en raison de la présence de cônes d'alluvions)
- Le nombre de sondes est plafonné de façon à ne pas couvrir plus de 30% de la surface de la maille.
- Calcul de l'énergie valorisable en fonction de la puissance du nombre de sondes installable, selon la même méthode que pour les nappes phréatiques
- Les sondes géothermiques sont affectées à la maille uniquement si le ratio atteint au moins 80 %

La quantité d'énergie valorisable est ainsi de **2'180 GWh**

Il est à noter que sans recharge thermique du terrain, la ressource n'est pas durable sur le très long terme (>50 ans). La recharge des sols en faisant du froid par geocooling est une piste pour augmenter la durabilité de la ressource.

5.3 Aérothermie

Réserve pour le bois énergie : pour toutes les autres mailles, qui ne peuvent pas être chauffées par des PAC sur nappes ou sur sondes, et qui sont situées à une altitude supérieure à 1000 m le bois énergie est attribué d'office car la ressource y est très adéquate (climat plus froid avec la nécessité d'un chauffage à haute température plus longtemps qu'en plaine) et peut être utilisée de façon monovalente, sans l'appoint du fossile, dans le cadre de petites installations décentralisées. La réserve à prévoir calculée est de **229 GWh**.

L'aérothermie est donc attribuée à toutes les autres mailles (altitude inférieure à 1000 m et ne pouvant pas être chauffées par des PAC sur nappes ou sur sondes). Cette ressource utilise des systèmes de PAC sur l'air l'extérieur pour lesquels il est souvent difficile d'atteindre une couverture totale des besoins en chaleur pour les raisons suivantes :

- les bâtiments doivent être chauffés en pointe hivernale à des niveaux élevés de température de distribution que les PAC ne peuvent pas atteindre lorsque les températures extérieures sont très basses.
- la puissance de chauffage spécifique requise pour les bâtiments est telle que l'installation de PAC air/air monovalente requiert des machines trop volumineuses

Il existe certes beaucoup de bâtiments, bien isolés et de taille limitée, pour lesquels un système de PAC air/eau peut être 100% monovalent, mais ceux-ci ne représentent pas la majorité des besoins. Dans le cadre de notre analyse à l'échelle hectométrique, il n'est pas possible de faire une analyse par bâtiment.

Pour ces raisons, un taux de couverture moyen de la ressource à 60% a été retenu. Le COP des pompes à chaleur étant considéré à 2,5.

La quantité d'énergie valorisable, selon ces hypothèses, est ainsi de **620 GWh**

5.4 Bilan

La contribution des ressources situationnelles (actuelles et futures) est montrée sous forme d'histogramme dans la Figure 17.

Parmi les ressources futures, on constate que les sondes géothermiques (en rouge) dominent largement, suivies par l'aérothermie (en marron), tandis que la contribution des nappes phréatiques (bleu foncé à peine visible) est négligeable.

La part des ressources renouvelables actuellement utilisées (en vert) est à un taux moyen de 5 à 10% dans tous les districts. Il s'agit principalement d'utilisation de PAC sur sondes géothermique ou sur l'air (à 98%), le reste concerne le solaire thermique.

La **contribution future des ressources situationnelles** varie de 62 à plus de 90% selon les districts et atteint **83%** sur l'ensemble du canton.

La couleur grise indique la part **d'énergie manquante** pour satisfaire toute la demande en chaleur des zones décentralisées. Ce complément sera constitué en partie par du bois (229 GWh déjà réservé pour les altitudes >1000 m) ainsi que par des ressources importées renouvelables ou fossiles. Cette part d'énergie manquante est de **642 GWh** pour tout le canton.



Figure 17 : Répartition des ressources situationnelles ainsi que des ressources renouvelables déjà utilisées dans les zones décentralisées – Valeurs données en MWh. – haut : histogrammes en % - bas : histogrammes en valeurs

6 Utilisation de la ressource bois-énergie (et autres ressources non situationnelles)

6.1 Méthodologie d'attribution du potentiel bois-énergie à l'échelle cantonale

La ressource bois-énergie est qualifiée de *non-situationnelle* en ce sens qu'elle peut être répartie à l'échelle du canton, sans contrainte de lieu particulière, là où son utilisation est la plus pertinente.

La stratégie bois-énergie du canton a recensé un potentiel thermique brut global de 1'200 GWh pour un volume total de 285'000 tonnes (Tableau 7).

Type de bois	tonnes	GWh th
Bois usagé et industriel	80'000	337
Bois naturel	145'000	611
Bois de sciage	60'000	253
totaux	285'000	1'200

Tableau 7 : Potentiel de bois-énergie du canton pour la production de chaleur

Etant donné qu'il est prévu, selon la CoCEn et la stratégie bois, de produire 200 GWh d'électricité par cogénération, le potentiel de chaleur effectivement valorisable à considérer est de **1000 GWh**.

Aujourd'hui, ce potentiel est partiellement valorisé dans les réseaux thermiques actuels (environ 114 GWh) et dans des installations décentralisées (environ 440 GWh). L'attribution des ressources situationnelles, dans les zones propices aux réseaux ou aux systèmes décentralisées, a été faite de manière prioritaire par rapport à l'utilisation actuelle du bois. Ainsi, le potentiel bois aujourd'hui valorisé a été en quelque sorte remis dans le « pot commun » du potentiel de 1'000 GWh, afin d'être réaffecter au mieux dans les différents districts selon les besoins (part d'énergie en gris dans les histogrammes des Figure 16 et Figure 17).

Par ailleurs, les besoins en chaleur de procédés (cf section 3.4) n'ont pas été traités jusqu'ici car leur niveau de température est incompatible avec les ressources situationnelles que nous avons évaluées. Le bois-énergie est un bon candidat pour satisfaire ces besoins.

La priorité définie pour l'attribution du bois énergie est donc la suivante :

1. Couverture de 50% des besoins en chaleur de procédés (soit 522 GWh/an)
2. Couverture des besoins en chaleur des mailles, en zones décentralisées, situées au-delà de 1000 m d'altitude (cf explication section 5.3 – 229 GWh)
3. Utilisation du reste du potentiel bois-énergie (soit 249 GWh) pour couvrir l'énergie manquante dans les zones propices aux réseaux (voir Figure 16).

La filière du bois énergie permettant de produire de l'électricité est de plus en plus utilisée et il convient d'encourager son développement. C'est la raison pour laquelle les 200 GWh d'électricité ont été soustrait au potentiel global. D'autres ressources renouvelables indigènes, comme la géothermie ou le biogaz, permettent aussi de produire de l'électricité mais dans une moindre mesure. En effet, le biogaz recèle un potentiel beaucoup plus faible et l'usage de la géothermie pour la génération électrique en est encore au stade expérimental et demeure à ce jour compliqué à mettre en œuvre de manière viable.

6.2 Bilan

Le Tableau 8 présente un bilan de l'apport du bois énergie dans le mix de ressources renouvelables, selon les trois priorités définies en 6.1.

Priorité considérée	part ressources situationnelles actuelles et futures	Potentiel du bois affecté	part totale renouvelable (ressources situationnelles + affectation bois)
		GWh	
Zones propices aux réseaux	56%	249	62%
Zones propices aux systèmes décentralisés	83%	229	89%
Procédés industriels	0%	522	50%

Tableau 8 : Bilan de l'apport du bois énergie dans le taux de couverture en ressources renouvelables

Les contributions du bois dans les zones propices aux systèmes décentralisés et propices aux réseaux sont assez proches. Elles permettent d'augmenter significativement le taux de ressources renouvelables d'environ 6%

Dans les zones propices aux réseaux, la répartition de la ressource devrait être faite selon les principes suivants, d'une part, exploiter d'abord les ressources forestières locales, mais sans dépasser un volume qui viendrait prendre la place des ressources situationnelles, et, d'autre part, de répartir le bois au niveau cantonal pour l'affecter là où il est nécessaire. Par ailleurs, le potentiel bois-énergie ne devra pas être nécessairement utilisé de manière centralisée mais, au cas par cas, en mettant en œuvre le principe le plus optimal.

Dans les zones propices aux systèmes décentralisés, la répartition par district est détaillée dans la section suivante.

En ce qui concerne les procédés industriels, l'attribution du potentiel est uniquement considérée à l'échelle cantonale.

6.3 Attribution particulière du potentiel bois dans les zones propices aux systèmes décentralisés

La Figure 18 complète la Figure 17 en présentant la répartition du potentiel du bois énergie, par district, pour les zones propices aux systèmes décentralisés. Il s'agit de la réserve par district qui a été calculée (cf 5.3) pour les mailles situées à plus de 1000m d'altitude et ne pouvant pas utiliser des PAC sur nappes ou sur sondes. Les parties grises représentent ici le reliquat de ressources importées.

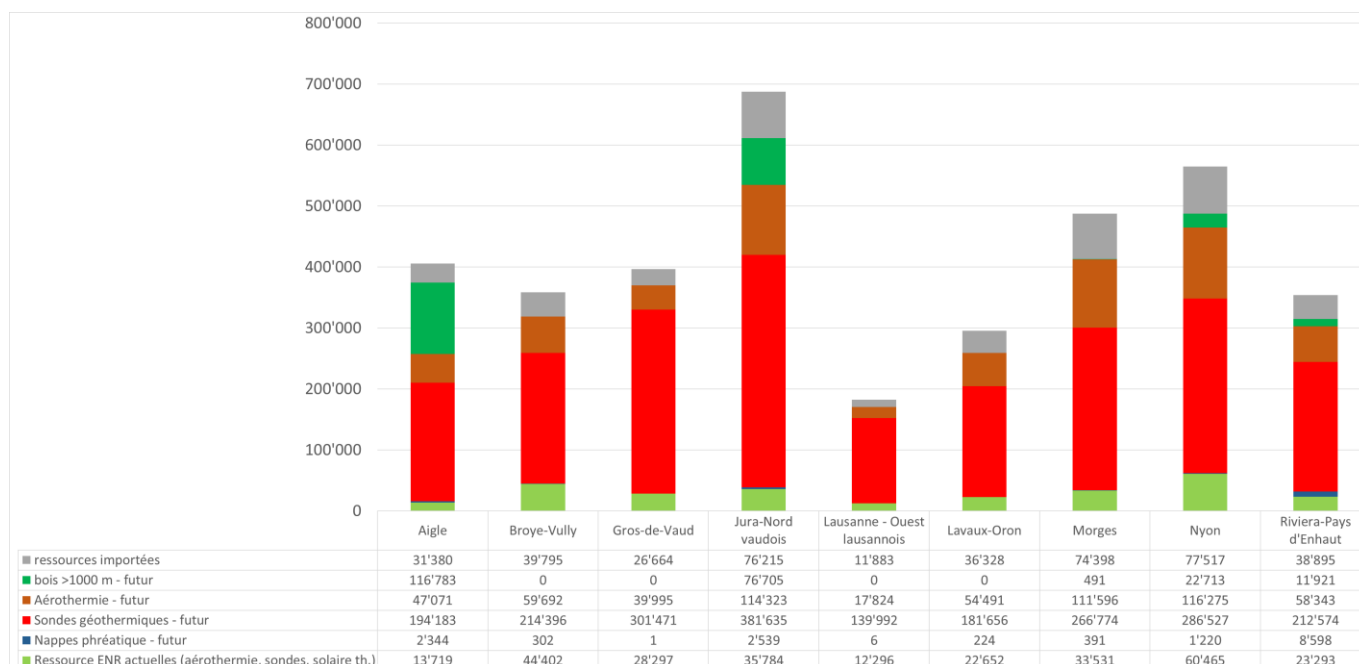


Figure 18 : Répartition du potentiel de valorisation du bois-énergie (>1000 m) selon les districts (zones propices aux systèmes décentralisés uniquement), rajouté aux autres ressources déjà analysées, pour les besoins en chaleur (hors procédés industriels) – valeurs en MWh

7 Autres ressources

7.1 Biogaz et solaire thermique

Au vu de l'analyse effectuée précédemment, les quantités d'énergie non couvertes par les ressources situationnelles et le bois sont :

- pour les zones propices aux réseaux : 1'680 GWh soit 38%
- pour les zones propices aux systèmes décentralisés : 413 GWh soit 11%
- pour les procédés industriels : 522 GWh soit 50%

soit un total de 2'093 GWh pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire et 522 GWh pour la chaleur de procédés à haute température.

D'autres ressources, non considérées jusqu'à présent, sont donc à envisager. Ces ressources font partie de l'éventail développé par la CoCEn (conception cantonale de l'énergie), à savoir : **le biogaz** et **le solaire thermique**. Il reste aussi les déchets qui sont déjà largement exploités aujourd'hui dans des réseaux mais dont le potentiel supplémentaire reste marginal, ils ne sont donc pas pris en compte. Ce potentiel inclue la valorisation en chaleur des déchets méthanisés par l'utilisation de CCF. Le biogaz dont il est question ici est celui qui peut être injecté dans le réseau de gaz.

Le Tableau 9 présente, au niveau cantonal, l'utilisation actuelle du biogaz (selon la CoCEn) et du solaire thermique (selon l'analyse que nous avons faite des données cadastrales disponibles) et le potentiel futur déterminé par la CoCEn. Les chiffres indiquent que les deux ressources sont quasiment inexploitées aujourd'hui par rapport aux potentiels disponibles. Toutefois, la valeur actuelle de 7 GWh pour le solaire thermique est sous-estimée par le cadastre car il n'identifie pas de manière spécifique les agents énergétiques secondaires. Selon la CoCEn, le niveau de valorisation actuel du solaire thermiques est plutôt estimé à 50 GWh.

Ressources	Utilisation actuelle	Potentiel futur (selon CoCEn)
	GWh/an	GWh/an
biogaz	21	72
solaire thermique	7	600

Tableau 9 : Utilisation actuelle et potentiel futur au niveau cantonal du biogaz et du solaire thermique

L'attribution de ces ressources est proposée uniquement au niveau cantonal. En effet, pour le solaire thermique, une approche par bâtiment serait nécessaire pour définir des localisations, ce qui n'est pas possible avec une approche à l'échelle hectométrique. Le biogaz peut être considéré comme une ressource non situationnelle (à l'instar du bois), mais il n'y a pas tellement de sens à vouloir le répartir par district, étant donné son potentiel assez marginal. Par ailleurs, les besoins en chaleur de procédés ne sont connus qu'à l'échelle cantonale.

L'attribution des potentiels est donc faite ainsi :

- 72 GWh du biogaz pour la chaleur de procédés
- 593 GWh (600 -7) du solaire thermique pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire

Ainsi, au vu de l'analyse effectuée jusqu'à présent, le reste à couvrir des besoins en chaleur du canton par des ressources importées, renouvelables ou fossile, serait de :

- $2'093 - 593 = 1'500$ GWh pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (sur une demande totale de 8'154 GWh)³
- $522 - 72 = 450$ GWh pour la chaleur de procédés (sur une demande totale de 1'044 GWh)

7.2 Électricité

Le déploiement des nombreuses ressources situationnelles s'accompagnera de l'utilisation massive de pompes à chaleur qui consommeront de l'électricité. Les quantités sont évaluées à 879 GWh/an dans les zones propices aux systèmes décentralisés et à 526 GWh/an dans les zones propices aux réseaux (voir Figure 19).

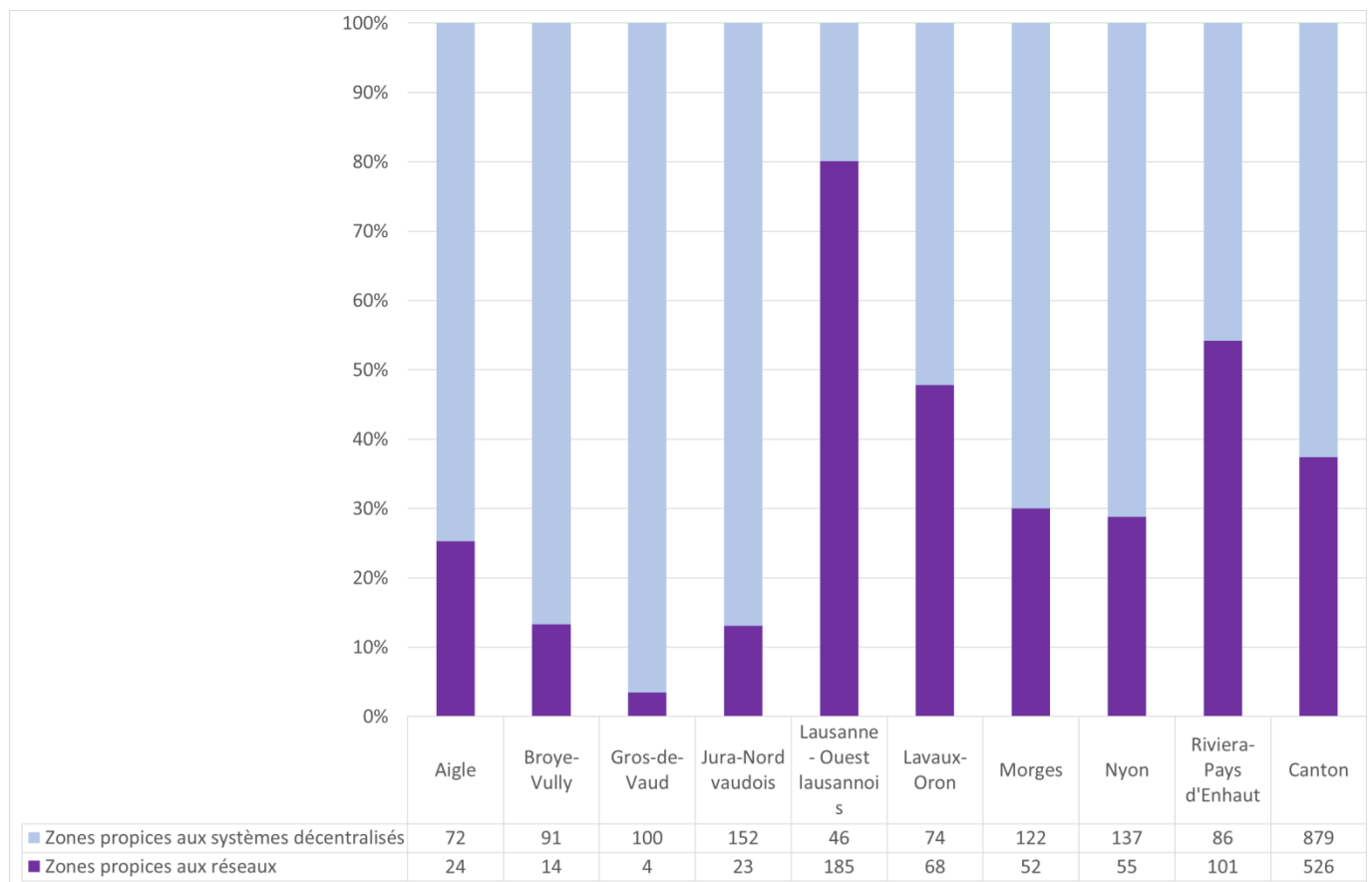


Figure 19 : Consommation future d'électricité pour l'alimentation des PAC – par district – données en GWh

³ La soustraction de la contribution du potentiel solaire thermique (593 GWh) est faite ici en valeur annuelle car on considère que ce potentiel futur a déjà été déterminé dans la CoCEn en tenant compte de ses fluctuations saisonnières. Toutefois, il s'agit d'une approximation car on ne tient pas compte ici du fait que la valorisation du potentiel solaire calculé pourrait être limitée pendant les périodes estivales par la concurrence avec les ressources renouvelables situationnelles.

8 Bilan de l'analyse et objectifs au niveau cantonal

8.1 Zones propices aux réseaux

La Figure 20 présente une comparaison entre l'utilisation actuelle des ressources (2020) et les perspectives futures d'utilisation si on considère une valorisation optimale du potentiel (selon les calculs et les analyses expliqués jusqu'ici).

Le fait marquant est bien sûr le déploiement massif des ressources situationnelles en réseau (lacs, nappes, nappes et aquifères) dont le potentiel exploité passerait ainsi de 22 GWh/an à 2150 GWh/an, soit une multiplication par 100.

Un renforcement de la valorisation du potentiel bois-énergie, de 180 GWh/an à 249 GWh/an est aussi à considérer. Il est important de noter que l'utilisation du bois, dans les zones propices aux réseaux, pourra être faite dans des installations de toutes tailles, plus ou moins centralisées (grands réseaux structurant, petits réseaux de quartier, voire réseaux techniques entre quelques bâtiments).

Pour le déploiement du solaire thermique, il est considéré la moitié du potentiel maximal futur déterminé par la CoCEn (le reste étant pour les zones propices aux systèmes décentralisés), ce qui permettrait de réduire très significativement la part de fossile restante. L'intérêt du déploiement du solaire thermique dans les zones propices aux réseaux est d'envisager aussi le développement d'installations mutualisant cette énergie de façon centralisée. L'utilisation de panneaux solaires sous vide ou vitrés à haute performance serait alors à privilégier.

Enfin, le renforcement de l'aérothermie et de la géothermie sur sondes, utilisés de façon décentralisée et en priorité pour les bâtiments ne requérant pas un niveau de températures élevé, pourra aider à tendre vers un approvisionnement 100% renouvelable. Le fossile résiduel pourra être peu à peu éliminé par la baisse des besoins qui va se poursuivre après 2035. Ainsi, l'entièreté des zones propices n'a pas forcément vocation à être alimentée par des réseaux : les systèmes seront mis en œuvre au cas par cas et selon l'évolution du marché et du contexte afin d'atteindre la substitution totale du fossile.

Comme expliqué au début de la section 4.1, le potentiel de la géothermie sur sondes n'a pas été calculé, dans les zones propices aux systèmes centralisés, car il aurait fallu faire une approche à l'échelle du bâtiment. Cette remarque reste valable pour ces zones mêmes si elles accueillent finalement des systèmes décentralisés (sans que l'on puisse aujourd'hui savoir à quels endroits : cela dépendra de nombreux facteurs de terrain). Il en est de même de l'aérothermie dont l'utilisation sera complémentaire. Ainsi, l'estimation du potentiel futur de la géothermie sur sondes et de l'aérothermie (sur la Figure 20) est faite à partir de l'hypothèse que ces ressources pourraient satisfaire jusqu'à 80% des besoins non couverts par les ressources situationnelles, le bois et le solaire thermique (i.e. $0.8 * (1'680 - 593/2) = 1'104$ GWh), selon la projection des besoins effectuée à l'horizon 2035.

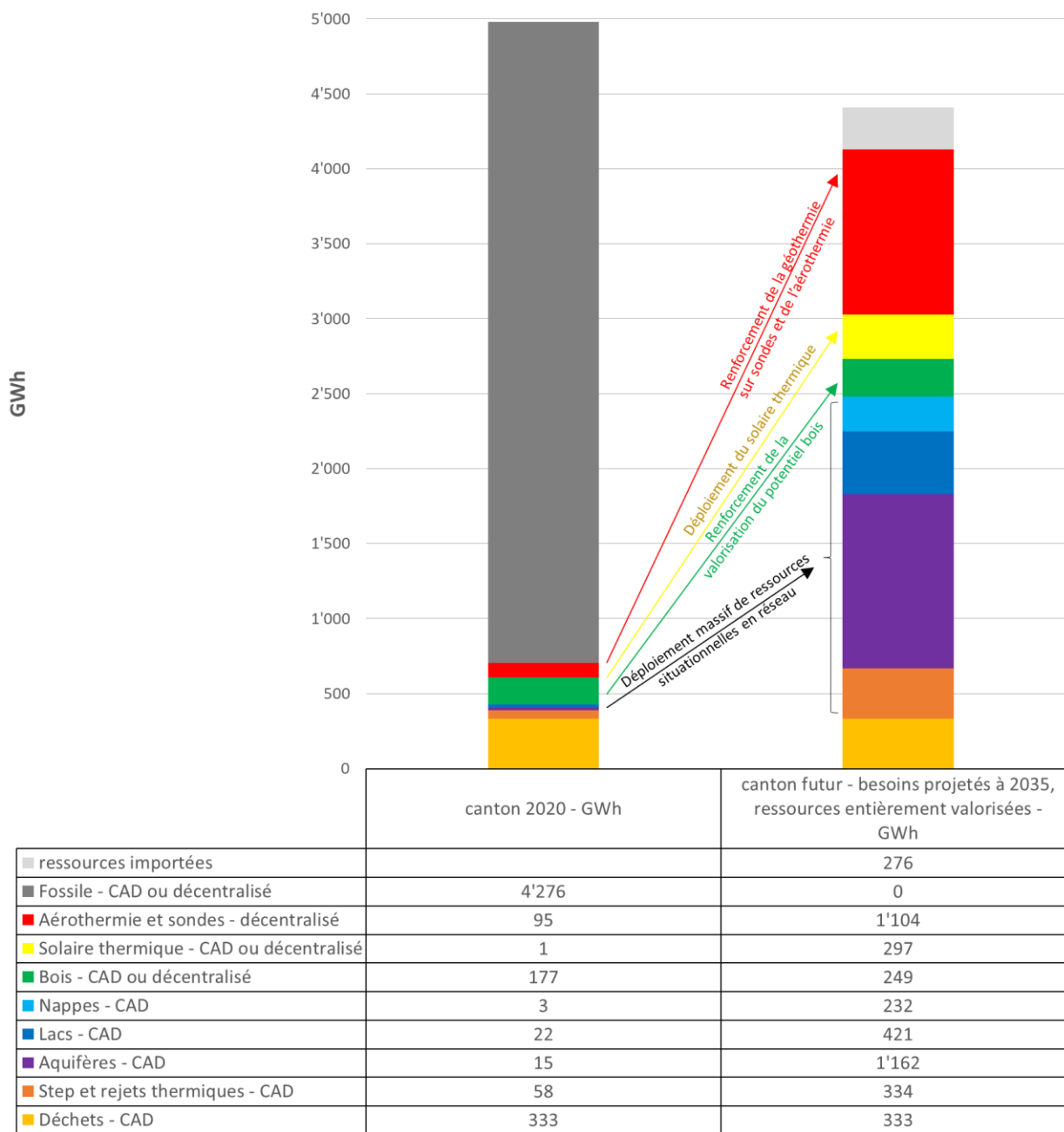


Figure 20 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux réseaux au niveau cantonal – situation 2020 et future

8.2 Zones propices aux systèmes décentralisés

La Figure 21 présente une comparaison entre l'utilisation actuelle des ressources (2020) et les perspectives futures d'utilisation si on considère une valorisation optimale du potentiel (selon les calculs et les analyses expliqués jusqu'ici).

L'augmentation considérable de l'utilisation des sondes géothermiques verticales (jusqu'à une profondeur maximale de 250 m, selon les hypothèses de calcul) permettrait à elle seule de couvrir plus de 60% des besoins. En termes d'emprises des forages, cela ne représente pas, en moyenne, plus de 3% de la surface des mailles hectométriques de l'analyse. Toutefois, il est supposé que la profondeur de sondes est toujours atteignable.

La contribution de l'aérothermie permet de porter à 82% le taux de couverture en ressources renouvelables.

Il est important de noter que les sondes géothermiques ne se développeront peut-être pas autant que prévu en raison des conditions géologiques qui seront rencontrées dans les projets. Dans ce cas, l'aérothermie pourrait se répandre plus massivement afin de pallier le déficit d'installations sur sondes effectivement réalisables.

Les nappes phréatiques, ne représentent qu'un faible potentiel, leur utilisation pour des systèmes individuels étant plus contrainte.

Le bois actuellement utilisé devra être redéployé (mais en plus faible quantité) en particulier à des altitudes supérieures à 1000 m.

Quant au solaire thermique (équivalent à la moitié du potentiel estimé par la CoCEn), il permet de porter le taux de renouvelable au-delà de 95%.

Le fossile résiduel sera peu à peu éliminé par la baisse des besoins qui va se poursuivre après 2035.

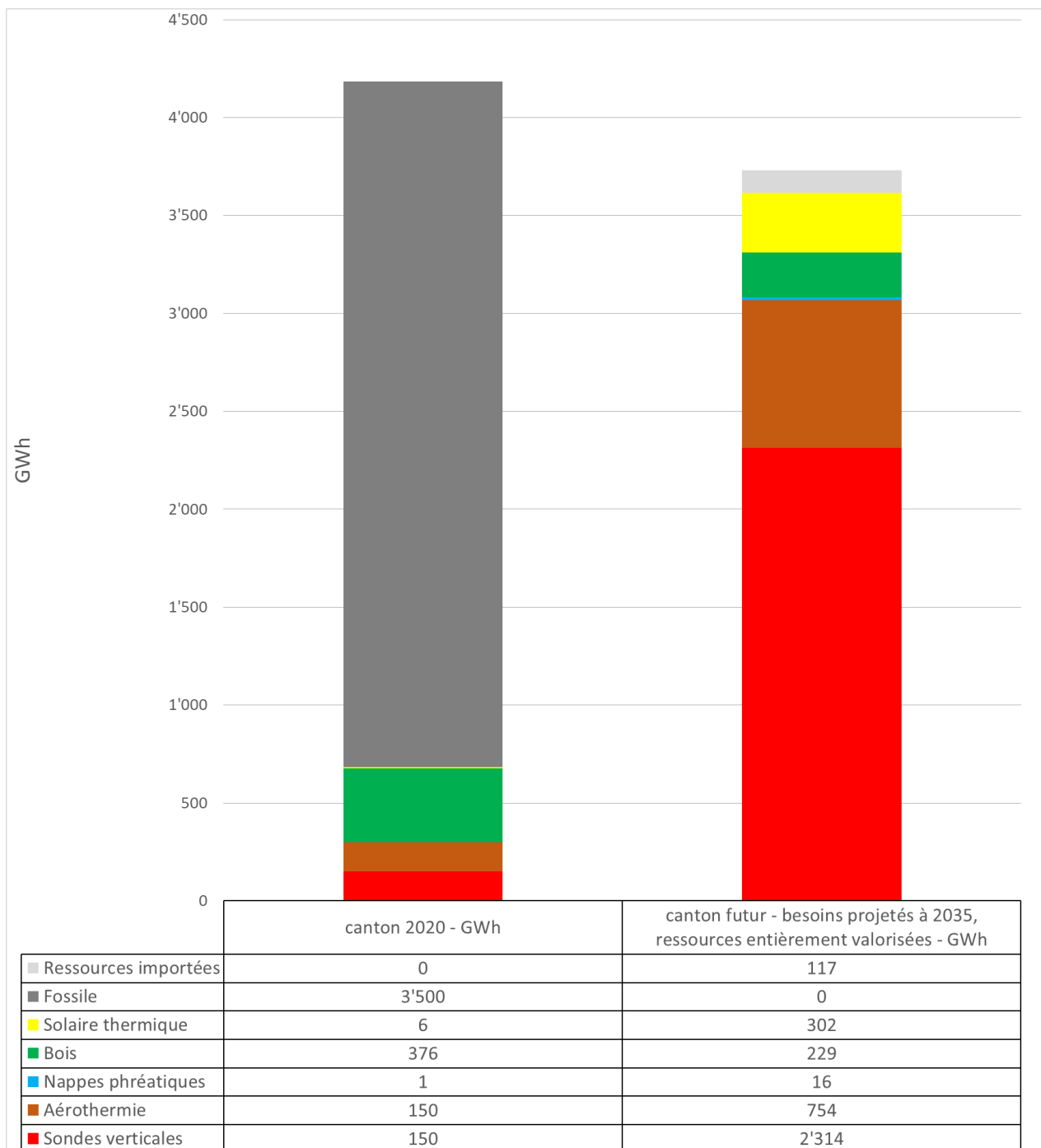


Figure 21 : Utilisation des ressources dans les zones propices aux systèmes décentralisés au niveau cantonal – situation 2020 et future

8.3 Chaleur de procédés industriels

La Figure 22 présente une comparaison entre l'utilisation actuelle des ressources (2020) et les perspectives futures d'utilisation pour les procédés industriels, selon les estimations à l'échelle cantonale qui ont été faites.

La demande totale en chaleur de procédés devrait baisser dans le futur de 2'068 GWh à 1'374 GWh, grâce aux mesures d'amélioration des performances énergétiques.

La proportion d'électricité (évaluée à 24%) utilisée pour produire cette chaleur devrait rester stable dans le futur. Le reste, devrait être couvert à 50% par du bois et à 5% par du biogaz.

La part de fossile restante pourra être substituée par d'autres procédés au cas par cas (récupération sur rejets hautes température si des opportunités se présentent, utilisation de pompes à chaleur à haute température).

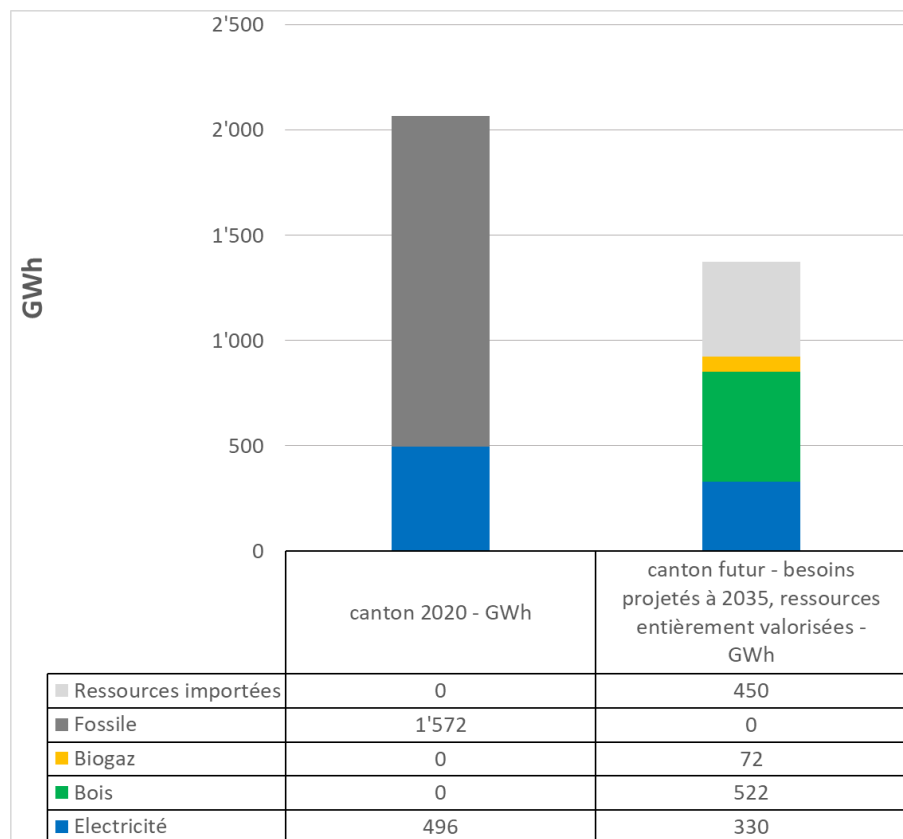


Figure 22 : Utilisation des ressources pour les procédés industriels au niveau cantonal – situation 2020 et future

8.4 Électricité pour l'alimentation des pompes à chaleur

La Figure 23 montre l'augmentation considérable de la consommation d'électricité à prévoir pour l'alimentation des pompes à chaleur, soit une multiplication de la consommation par 12.

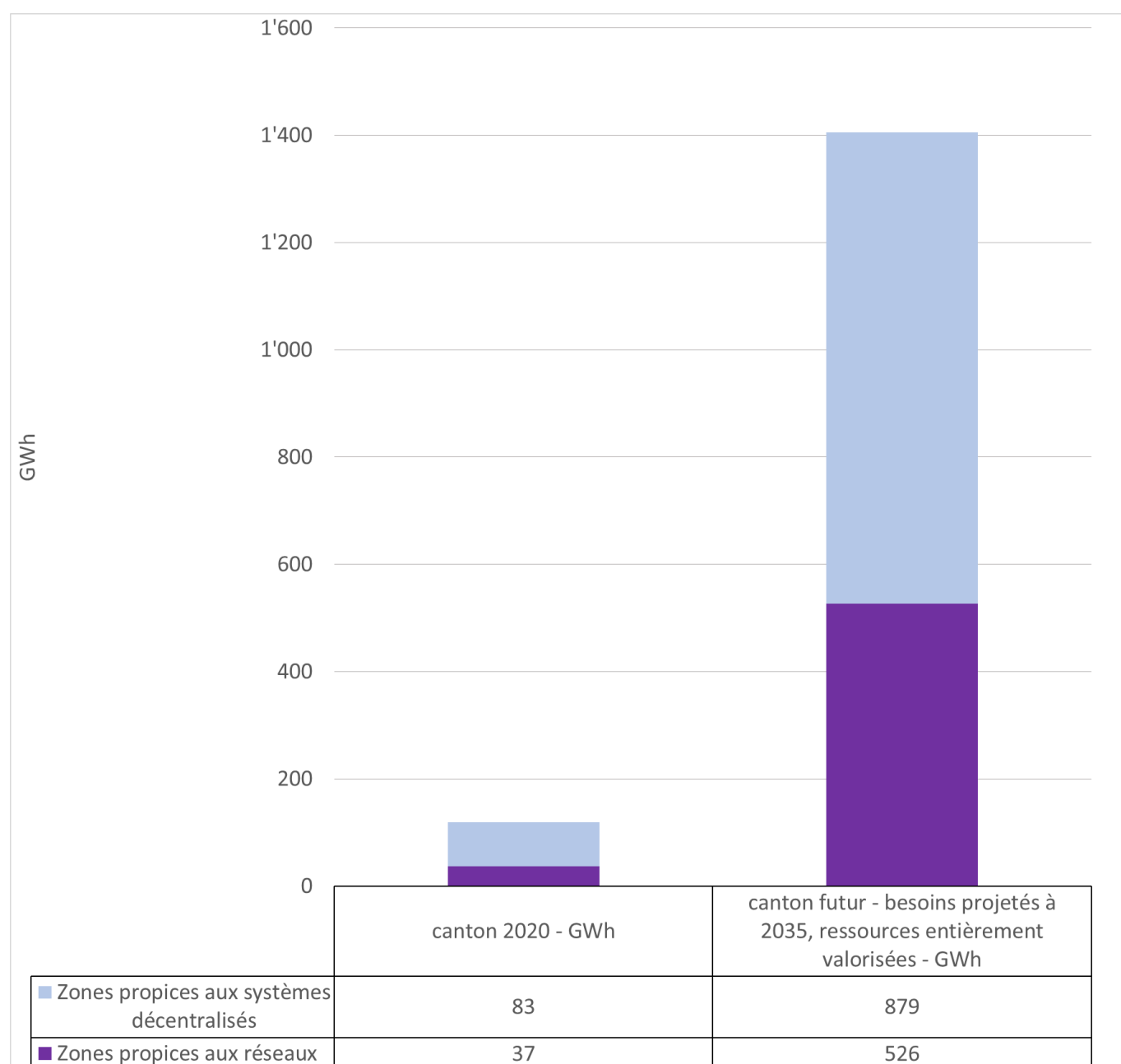


Figure 23 : Consommation d'électricité au niveau cantonal pour les PAC – situation 2020 et future

8.5 Synthèse globale

La Figure 24 présente une synthèse de l'utilisation actuelle des ressources et les perspectives pour l'ensemble du canton (toutes zones confondues y compris les procédés industriels).

La part **d'énergie renouvelable** dans la fourniture de chaleur du canton, située **actuellement à 17%** peut ainsi potentiellement **être portée à 96%**.

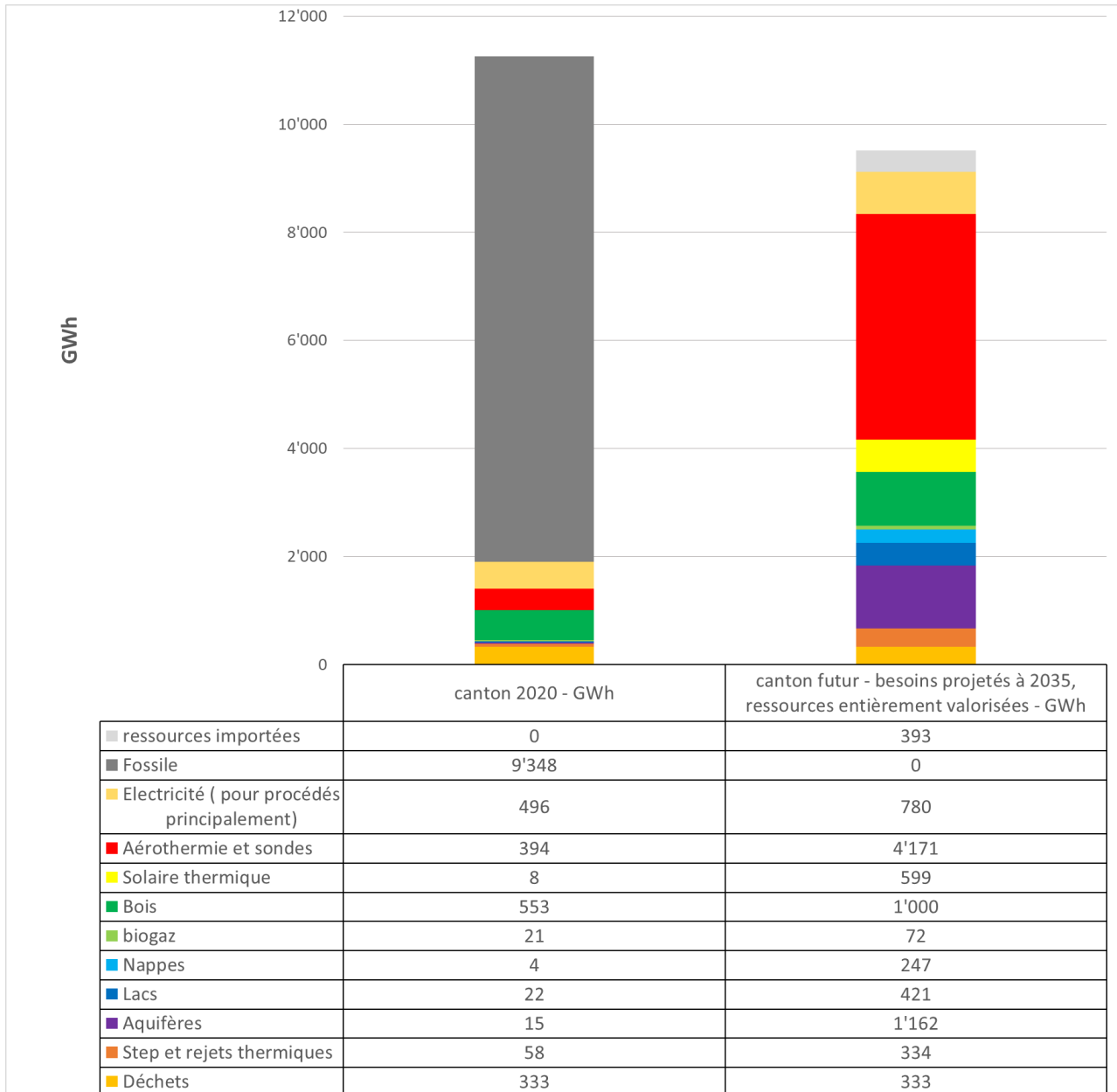


Figure 24 : Synthèse au niveau cantonal de l'utilisation des ressources dans les zones propices aux réseaux et aux systèmes décentralisés, ainsi que pour les procédés industriels– situation 2020 et future

9 Lignes directrices

Un ensemble de lignes directrices sont proposés au vu des analyses et des estimations quantitatives et qualitatives qui ont été présentées précédemment.

9.1 Favoriser une utilisation optimale des ressources situationnelles dans les réseaux thermiques

Les niveaux de priorité attribués aux ressources situationnelles, pour optimiser leur utilisation combinée dans les réseaux, devront dans la pratique être réévalués selon les projets. Par exemple, l'estimation des potentiels qui a été faite donne une priorité élevée aux aquifères, ce qui entraîne une diminution de près de moitié des potentiels maximaux de valorisation des lacs (de 643 à 400 GWh) ou des nappes phréatiques (de 450 à 230 GWh). La réalité pourrait être différente dans la mesure où le potentiel exploitable des aquifères étant encore incertain, la ressource des lacs ou des nappes phréatiques serait à mettre en avant. En ce qui concerne les STEP et les rejets thermiques, toutefois, il est logique de leur attribuer en règle générale une priorité élevée de valorisation car il s'agit de sources ponctuelles dont il faut profiter dès que cela est possible, sans quoi leur potentiel serait perdu en étant remplacé par d'autres ressources plus largement présentes sur le territoire.

De plus, en ce qui concerne les lacs, les nappes phréatiques et les aquifères, qui sont des ressources situationnelles plus largement réparties, les compétitions d'usage, comme nous l'avons vu plus haut, entraînent des pertes substantielles des potentiels de valorisation. Pour limiter ces effets, Il conviendra donc de valoriser ces ressources en les mutualisant au mieux dans des réseaux les plus larges possibles.

De façon générale, compte tenu de l'ampleur du niveau des besoins thermiques dans les zones propices, les ressources situationnelles, déjà valorisées dans des CAD, ne subissent quasiment aucune concurrence de la part des nouvelles ressources qui seront valorisées dans le futur.

Ces orientations doivent permettre de tendre vers un objectif de déploiement des chauffages à distance dans les zones réseaux avec environ **55% de ressource situationnelles (2550 GWh sur une demande de 4'400 GWh)**.

À l'échelle de l'analyse, il est possible qualitativement de repérer des périmètres dans lesquels le développement de réseaux de froid à distance est à envisager si les conditions s'y prêtent. Il s'agit des zones où le pourcentage de mailles avec des besoins en froid approche 80 % (cf représentation de la Figure 9).

Des périmètres à considérer sur le canton pour ce genre de réseau sont cartographiés en exemple dans l'Annexe F.

9.2 Répartir l'utilisation du bois énergie à l'échelle cantonale de façon coordonnée

Cette étude propose une répartition du bois-énergie à l'échelle du canton en tenant compte de l'utilisation des ressources situationnelles, ainsi qu'en tirant parti de la chaleur à haute température qu'il peut produire. Ainsi, les priorités suivantes sont recommandées :

- Utilisation pour couvrir les besoins en chaleur de procédés (haute température) à hauteur de 50 %(soit 522 GWh/an). Toutefois, la faisabilité technico-économique de la substitution du gaz par le bois dans la production de chaleur industrielle haute température n'est pas vérifiée de manière systématique bien qu'il existe quelques installations. Une étude complémentaire devrait donc être réalisée.

- Utilisation de façon décentralisée dans des zones à faible densité situées à plus de 1000 m d'altitude, là où d'autres ressources ne sont pas disponibles (géothermie basse profondeur, aérothermie peu efficace en raison du climat). Ces zones se trouvent dans les districts d'Aigle, Morges, Nyon, Riviera-Pays d'Enhaut et du Jura Nord-vaudois (demande de 229 GWh/an)
- Utilisation dans les zones propices aux réseaux thermiques à hauteur de 250 GWh environ. **La valorisation du bois est à y mettre en œuvre dans des installations plus ou moins centralisées (du grand réseau thermique structurant au petit réseau entre quelques bâtiments) à déterminer au cas par cas.** Les zones propices aux réseaux correspondent souvent à des zones urbaines sujettes aux problèmes de qualité de l'air. Dans ces endroits, les systèmes avec des traitements de fumées avancés sont à privilégier.

Par ailleurs, la valorisation du bois-énergie dans des réseaux devrait être faite si possible en mettant en œuvre la cogénération qui permet une meilleure efficacité exergétique et donnerait la possibilité de couvrir une partie des besoins importants d'électricité hivernale qui seront générés par le développement des PAC.

9.3 Favoriser l'utilisation de la géothermie sur sondes verticales et de l'aérothermie dans les zones propices aux systèmes décentralisés

L'utilisation des sondes géothermiques doit être favorisée dans les zones peu denses, propices aux systèmes décentralisés.

Concernant **les sondes**, il est possible de tendre vers une valorisation de chaleur maximale (via des pompes à chaleur) de **2'180 GWh/an**. Ce chiffre est toutefois tributaire de la situation géologique qui sera rencontrée au cas par cas sur le terrain par rapport aux données connues à ce jour.

L'aérothermie (via des pompes à chaleur air/eau) doit jouer un rôle complémentaire (là où les sondes ne sont pas praticables) avec une contribution minimale de **620 GWh/an** et être utilisée seulement pour les bâtiments ne requérant pas un niveau de température élevé.

La contribution de ces deux ressources est aussi à envisager dans les zones plus denses, répertoriées propices aux réseaux, mais dans des lieux où le déploiement de réseaux thermiques ne s'avère pas réalisable dans la pratique. Le niveau à atteindre est d'environ **1'100 GWh**.

9.4 Encourager le développement du solaire thermique

L'énergie solaire thermique est une ressource disponible et accessible quasiment partout. À ce titre, elle est susceptible d'entrer en concurrence avec toutes les autres, notamment lorsqu'il s'agit de faire des choix d'investissement. De plus, son caractère saisonnier, en fait une énergie exclusivement d'appoint. La mise en œuvre de stockage thermique avec déphasage saisonnier permet évidemment d'augmenter son potentiel, mais cela représente des investissements lourds et ne peut se faire que si le contexte y est favorable (notamment l'espace et le volume disponible)

Le potentiel de valorisation futur du solaire thermique est estimé par la CoCEn à 600 GWh/an. Afin d'atteindre ce chiffre, il est proposé d'encourager aussi le développement de cette énergie dans des installations situées sur de grands bâtiments, et dans des zones denses, propices aux réseaux. Cela donnerait l'opportunité de mutualiser cette énergie et d'amplifier la quantité produite à taille d'installation égale.

Mais tout projet d'installation solaire thermique, également hors des zones denses, est à encourager.

9.5 Utiliser le potentiel supplémentaire de gaz synthétique pour les procédés industriels

Le biogaz est un gaz synthétique issu de la méthanisation de déchets agricoles ou ménagers. La part valorisée directement sur site dans des systèmes de CCF, notamment pour les CAD actuels n'est donc pas prise en compte comme source de chaleur supplémentaire.

Il reste donc la part de biogaz qui pourrait être injectée dans le réseau de gaz et dont le potentiel futur est évalué par la CoCEn à 72 GWh. Ce potentiel pourrait toutefois encore être accru à moyen ou long terme avec le développement de nouveaux moyens technologiques pour la production de gaz synthétique, notamment en utilisant le vecteur de l'hydrogène. Celui-ci peut en effet soit être injecté directement dans le réseau de gaz, ou bien recombinaison avec le CO₂ afin de former du méthane de synthèse⁴. Le CO₂ utilisé dans la réaction devant provenir si possible de sources renouvelables (par exemple celui contenu dans le biogaz ou bien dans les fumées de combustion du bois). Dans tous les cas, Il serait judicieux d'affecter prioritairement ce potentiel de gaz synthétique pour les procédés industriels à haute température dont il reste encore plus de 500 GWh à couvrir. Les modalités de redéploiement du réseau de gaz pourraient donc se faire de manière à approvisionner au mieux les sites industriels en gaz synthétique.

La production de gaz synthétique à travers le vecteur de l'hydrogène fournit également des moyens de stockage des surplus d'électricité produits à certaines périodes par les énergies renouvelables telles que le solaire ou l'éolien : l'hydrogène produit par électrolyse peut être stocké (ou bien converti en méthane de synthèse puis stocké) et réutilisé ultérieurement pour approvisionner des besoins en chaleur. Il s'agit là d'un concept général désigné par le terme « power-to-gas », qui permettrait en quelque sorte une convergence entre différents types de réseaux (électricité, gaz, chaleur).

Cette utilisation du gaz synthétique doit se faire de façon coordonnée avec la stratégie gaz cantonal.

9.6 Conséquences possibles liées à la non mise en œuvre de ces lignes directrices

La mise en œuvre des lignes directrices décrites précédemment doit permettre d'orienter l'utilisation des ressources vers une valorisation optimale. Plusieurs conséquences peuvent être envisagées si ces lignes directrices ne sont pas suivies.

Si les réseaux thermiques se développent insuffisamment dans certains périmètres, cela entraînera une valorisation insuffisante de certaines ressources situationnelles. Cela est particulièrement vrai pour les ressources à gros potentiel (lacs et aquifères) dont on sait que l'exploitation viable est plutôt réservée à des unités de tailles critiques alimentant un large périmètre. Si ces unités ne sont pas planifiées ou construites à temps, il y a un risque que l'utilisation de la ressource soit perdue pour plusieurs décennies, le temps que les systèmes décentralisés et moins durables qui auraient été installés à la place arrivent en fin de vie. Les lacs et les aquifères représentent à eux deux un potentiel de 1'600 GWh (à confirmer en fonction de l'incertitude pour les aquifères). Une valorisation insuffisante de ce potentiel peut entraîner des pertes significatives dans le mix renouvelable à atteindre. Le raisonnement tenu ci-dessus est aussi valable pour les nappes phréatiques ou les rejets de chaleur des STEP.

Les systèmes décentralisés qui viendraient s'installer dans des lieux où un réseau thermique aurait dû se déployer seront fortement orientés par les exigences légales sur les bâtiments. Ainsi, de nombreuses PAC individuelles (principalement sur l'air) seraient utilisées, entraînant également un surplus de consommation électrique, mais également un recours au fossile qui resterait fréquent pour assurer les pointes hivernales. La loi sur le CO₂ en préparation, renforçant encore les exigences, inciterait à l'emploi du bois-énergie là où cela est possible, entraînant une mauvaise répartition géographique de cette ressource, un stress sur le marché du bois, et de possibles importations.

Cet effet de recours trop important à des PAC air/eau (qui consomment le plus d'électricité) et d'utilisation inappropriée du bois pourrait aussi se rencontrer si les systèmes décentralisés sol-eau (sur sondes géothermiques principalement) ne se développent pas suffisamment. Toujours en raison des exigences

⁴ Par la réaction de Sabatier ou dite de méthanation

légales, les alternatives seraient la PAC air/eau ou le chauffage au bois permettant de mieux satisfaire la loi sur le CO2.

De façon générale, une répartition géographique inappropriée de l'utilisation du bois-énergie pourrait aussi entraîner des pertes de valorisation dans la mesure où celui-ci viendrait prendre la place de ressources situationnelles et serait perdu pour les usages où il est indispensable. On pense notamment aux besoins des procédés industriels ou ceux à des altitudes > 1000 m, dont plus de 700 GWh/an devrait être approvisionné par le bois. Cette perte de valorisation entraînerait mécaniquement une persistance du fossile ou le recours au biogaz importé.

Il s'agit donc d'aboutir au bon état d'équilibre dans la valorisation des ressources si l'on souhaite atteindre, à l'horizon 2050, l'objectif de neutralité carbone. Une mauvaise mise en œuvre des lignes directrices peut aboutir à un état d'équilibre trop éloigné de celui souhaité qui, pour être rétabli, demandera encore plusieurs décennies, retardant d'autant l'objectif à atteindre face à l'urgence climatique.

10 Concept de mesures

10.1 Freins à la valorisation optimale des ressources

Comme nous l'avons vu, une mise en œuvre insuffisante des lignes directrices peut entraîner un déficit de valorisation des ressources. Il est possible de lister un certain nombre de freins qui peuvent péjorer cette bonne mise en œuvre :

- Le coût économique pour les acteurs impliqués
- L'acceptabilité sociale de certains projets à fort impact
- Le manque de connaissances sur certaines ressources (notamment la géothermie) qui retarde le développement des projets
- La concurrence entre ressources à la place d'une planification harmonisée multi-ressources

Le concept de mesure est donc destiné principalement à lever ces freins pour faciliter la mise en œuvre des lignes directrices.

10.2 Temporalité

Le taux global de couverture des besoins en chaleur du canton (confort + procédés) par des ressources renouvelables est aujourd'hui de 16%. L'ensemble des lignes directrices définies précédemment doit permettre d'atteindre un taux de couverture de 96% (le reliquat provenant de ressources importées). Cela correspond à un accroissement de la production d'énergie thermique d'origine renouvelable de 7'000 GWh/an par rapport à 2020.

Pour atteindre ce taux à un horizon temporel acceptable, il est crucial d'entreprendre, dès maintenant, les actions qui mettent le canton sur la bonne voie.

Les objectifs qui ont été posés se fondent sur des données plus ou moins fiables concernant la disponibilité des ressources, par exemple :

- L'utilisation de la géothermie, et plus particulièrement la possibilité d'exploiter des aquifères de moyenne profondeur, au niveau de production thermique qui a été estimé dans l'analyse n'est pas certaine aujourd'hui. Cela dépendra des connaissances sur la ressource qui seront accumulées dans les prochaines années.
- L'estimation du potentiel thermique effectivement exploitable de l'eau du lac est aussi soumis à quelques incertitudes, non pas relatives à la connaissance de la ressource, mais aux contraintes et conflits d'usages qui pourrait limiter le nombre et la faisabilité des captages. Toutefois, ces incertitudes peuvent être rapidement levées par des études dédiées.
- L'estimation du potentiel de valorisation des rejets thermiques des STEP, du bois énergie ou du biogaz repose sur des bases fiables avec peu d'incertitudes.

Pour atteindre les objectifs de l'échéance la plus proche (2035), il conviendra naturellement de puiser d'abord dans le réservoir des ressources qui sont parfaitement connues ou pour lesquelles les incertitudes d'usage peuvent être levées le plus rapidement. Cela devra être fait toutefois en conservant la possibilité future d'exploiter les ressources qui requièrent plus de temps pour accumuler des connaissances car c'est elles qui permettront par la suite de poursuivre le chemin vers l'autonomie énergétique. Il s'agira également de développer les réseaux thermiques dans les zones propices.

Le concept de mise en œuvre devra veiller aux aspects suivants :

- Organiser les priorités temporelles sans perturber les usages ou affectations spatiales futures qui sont définis par les objectifs (les ressources les plus facilement utilisables ne doivent pas s'implanter dans des lieux ou pour des usages réservés à d'autres qui viendront plus tard).
- Aider à surmonter les obstacles et incertitudes de type technico-économiques, légaux, organisationnels et sociaux qui apparaîtront, même pour valoriser des ressources dont le potentiel est aujourd'hui le plus fiable.
- Prévoir la valorisation des ressources futures (notamment la géothermie) en valorisant les données des programmes de prospections dans le cadre des planifications énergétiques communales ou régionales

Il conviendra également de veiller à une mise en œuvre cohérente des différentes lois relatives à l'énergie et à l'environnement qui pourraient entrer en conflit. Par exemple, certaines dispositions de la loi sur le CO2 peuvent aller à l'encontre de la spatialisation des ressources qui est proposée dans ce rapport. Il s'agit notamment de l'obligation pour les bâtiments de ne pas dépasser le taux d'émission de 20 kgCO₂/m² qui peut inciter les propriétaires à utiliser ou gaspiller inutilement les ressources les plus facilement utilisables dans des lieux ou pour des usages non prévus (par exemple le bois énergie là où l'on ne souhaite pas le développer, l'aérothermie là où un réseau sur l'eau du lac aurait pu se développer).

10.3 Liste d'idées de mesures

Les mesures sont hiérarchisées selon les 3 niveaux suivants :

- Niveau 1 : Mesures volontaires (communication informations) qui se caractérisent par une acceptabilité élevée et des effets faibles
- Niveau 2 : Aides financières (subventions, déductions fiscales) dont l'acceptabilité est moyenne comme les effets
- Niveau 3 : Obligations et interdits, avec une acceptabilité basse et des effets élevés.

Les mesures proposées n'ont pas de caractère engageant.

10.3.1 Mesures de niveau 1

- ✓ Diffusion et communication auprès des communes et des fournisseurs d'énergie pour transcrire les lignes directrices de cette étude dans la planification énergétique territoriale.
- ✓ Concertation avec les acteurs industriels, les acteurs du bois et les communes pour favoriser le développement de projets avec le bois-énergie.
- ✓ Publication d'un cadastre des ressources énergétiques adéquates qui vienne à l'appui des planifications énergétiques communales.

10.3.2 Mesures de niveau 2

- ✓ Attribuer des aides financières pour le développement des réseaux thermiques selon les priorités de valorisation des ressources. Ces aides devront soutenir plus particulièrement l'emploi des ressources situationnelles et inciter l'emploi du bois-énergie dans les zones géographiques adéquates (telles que proposées dans cette étude).
- ✓ Définir des aides financières pour les projets d'installation au bois-énergie pour les procédés industriels
- ✓ Accélérer le développement de la filière de géothermie profonde par des aides financières
- ✓ Définir un programme d'attribution des aides financières pour le développement des ressources dans des systèmes décentralisés, selon la spatialisation qui est proposée dans ce rapport (bois aux altitudes > 1000 m, PAC sur sondes, nappes ou air extérieur). Cette mesure est à coordonner avec la stratégie sectorielle du programme bâtiment qui soutient notamment la substitution des énergies fossiles par des productions renouvelables.

- ✓ Les aides financières du programme bâtiment, liés à l'isolation, devraient également être coordonnées avec ce qui précède en définissant une véritable stratégie qui indique clairement les bâtiments prioritaires à isoler des autres, pour lesquels il faudrait plutôt aller d'emblée vers une substitution des énergies fossiles.

10.3.3 Mesures de niveau 3

- ✓ Inscrire dans les lois ou règlements des zones de raccordement à des réseaux thermiques (à inscrire dans les plans d'affectation communaux).
- ✓ Inscrire dans les lois ou règlements des zones d'affectations prioritaires de ressources (à inscrire dans les plans d'affectation communaux).
- ✓ Afin de favoriser le développement des sondes géothermiques dans de bonnes conditions il serait intéressant de légiférer au niveau cantonal en incitant le développement systématique de systèmes de rafraîchissement direct par geocooling, notamment pour le résidentiel. Cela favoriserait un dimensionnement pérenne des champs de sondes et contribuerait à prévenir, sur le long terme, les effets du réchauffement climatique sur le confort des logements. L'application de cette mesure, qui pourrait entraîner un effet rebond (surconsommation inutile de moyens de rafraîchissement dans les bâtiments) devrait toutefois faire l'objet d'une analyse préalable.
- ✓ Mettre à jour la stratégie cantonale pour l'utilisation du bois énergie, en insistant notamment sur la répartition géographique (une concertation approfondie avec les acteurs du secteur devrait d'abord avoir lieu).

11 Compléments d'études à mener

Plusieurs études complémentaires devraient être entreprises (au niveau cantonal ou fédéral), afin d'affiner et de mieux détailler ces perspectives de valorisation du potentiel de chaleur renouvelable ainsi que le concept de mesure à mettre en œuvre :

- Perspectives du couplage ou de la convergence des réseaux (thermique, électricité, gaz, transports) grâce au système de stockage ou power-to-gas.
- Analyse détaillée de la typologie des besoins industriels en chaleur de procédés dans le canton de Vaud, et évaluation de la faisabilité technico-économique de la substitution du gaz par le bois pour produire de la chaleur à haute température.
- Analyse globale du coût financier pour la mise en œuvre des moyens de valorisation des ressources indigènes : réseaux thermiques à déployer, nouveaux systèmes de production de chaleur à substituer massivement au fossile.
- Analyse des freins (technologiques, économiques, sociaux et organisationnels) au développement de la chaleur renouvelable.
- Etude spécifique sur le niveau de maturité des technologies nécessaires et leur influence sur la temporalité de mise en œuvre des moyens de valorisation des ressources renouvelables.
- Analyse détaillée des besoins en froid, de leur évolution probable liée au réchauffement climatique, et des moyens de fourniture.
- Une estimation approfondie et chiffrée des conséquences liées à la non mise en œuvre des lignes directrices (abordée à la section 9.6).

12 Bibliographie

Référence 1 : *Evaluation du potentiel géothermique exploitable des nappes superficielles et des aquifères de moyenne et grande profondeur dans le canton de Vaud* – Mandant DGE/DIREN - Rapport CSD Ingénieurs – mars 2018

Référence 2 : *Conception cantonale de l'énergie* – DGE/DIREN – Adoptée par le conseil d'état le 19 juin 2019

Référence 3 : *Stratégie bois-énergie du canton de Vaud* – DGE/DIREN – septembre 2017

Référence 4 : *Perspectives à long terme de l'efficacité énergétique renouvelable dans le chauffage de proximité et à distance en Suisse – Rapport final, phase 2 : analyse SIG et étude des potentiels* – Mandant ASCAD – Rapport Eicher+ Pauli – mars 2014

13 Impressum

Lausanne, le 13.06.2021

CSD INGÉNIEURS SA



Daniel Gasser
Expert énergie



Vincent Vuilleumier
Chef de projet senior

14 Prémisses

CSD confirme par la présente avoir exécuté son mandat avec la diligence requise. Les résultats et conclusions sont basés sur l'état actuel des connaissances tel qu'exposé dans le rapport et ont été obtenus conformément aux règles reconnues de la branche.

CSD se fonde sur les prémisses que :

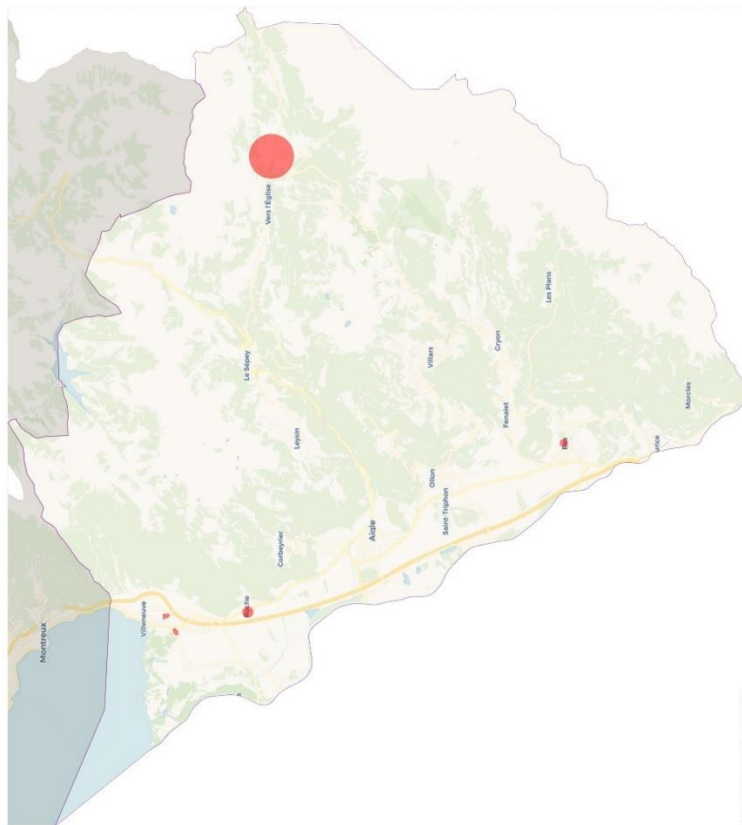
- ◆ le mandant ou les tiers désignés par lui ont fourni des informations et des documents exacts et complets en vue de l'exécution du mandat,
- ◆ les résultats de son travail ne seront pas utilisés de manière partielle,
- ◆ sans avoir été réexaminés, les résultats de son travail ne seront pas utilisés pour un but autre que celui convenu ou pour un autre objet ni transposés à des circonstances modifiées.

Dans la mesure où ces conditions ne seraient pas remplies, CSD déclinera toute responsabilité envers le mandant pour les dommages qui pourraient en résulter.

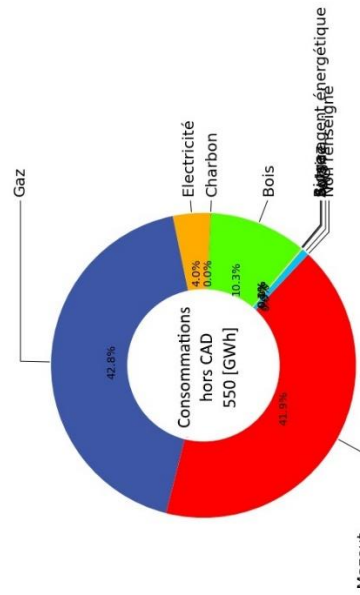
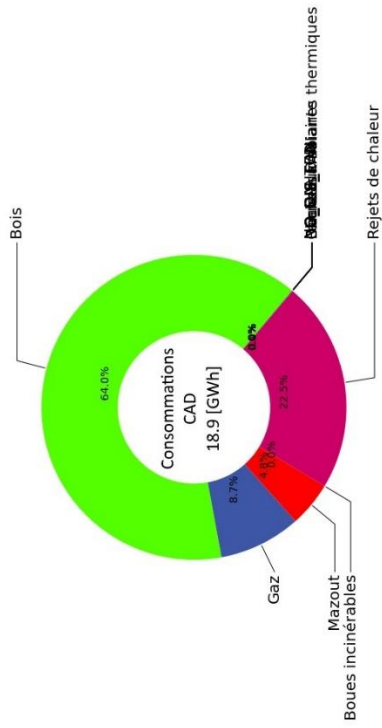
Si un tiers utilise les résultats du travail ou s'il fonde des décisions sur ceux-ci, CSD décline toute responsabilité pour les dommages directs et indirects qui pourraient en résulter.

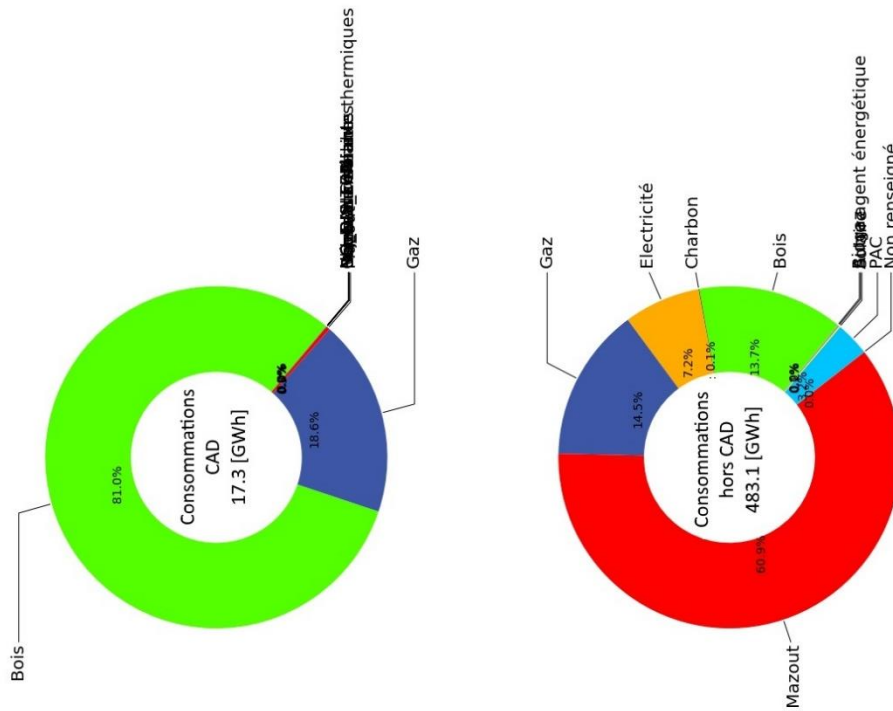
**Annexe A Contribution actuelle des ressources dans
l’approvisionnement en chaleur et zone de dessertes des CAD
actuels.**

Aigle

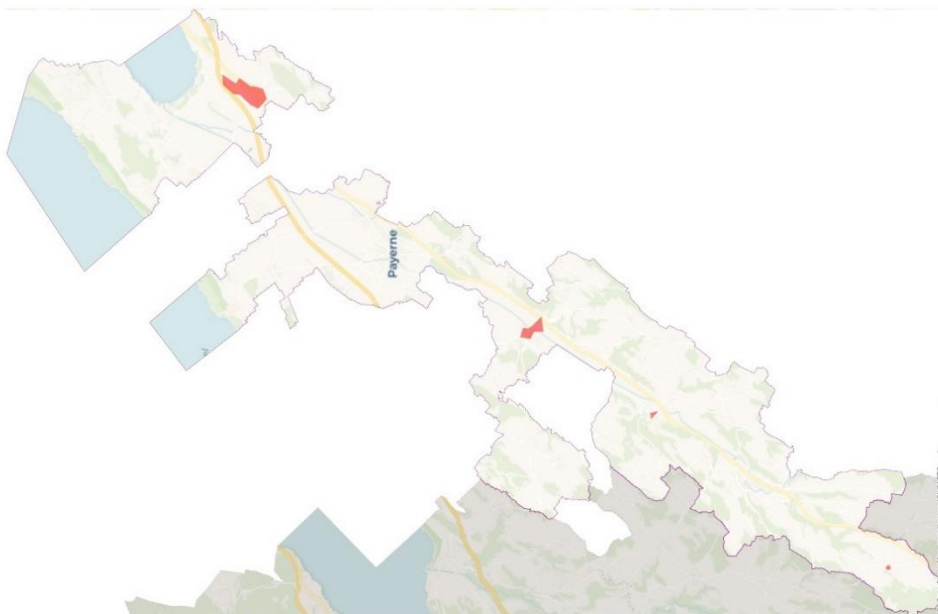


ICI: OpenStreetMap contributors, ICI: CAMEO

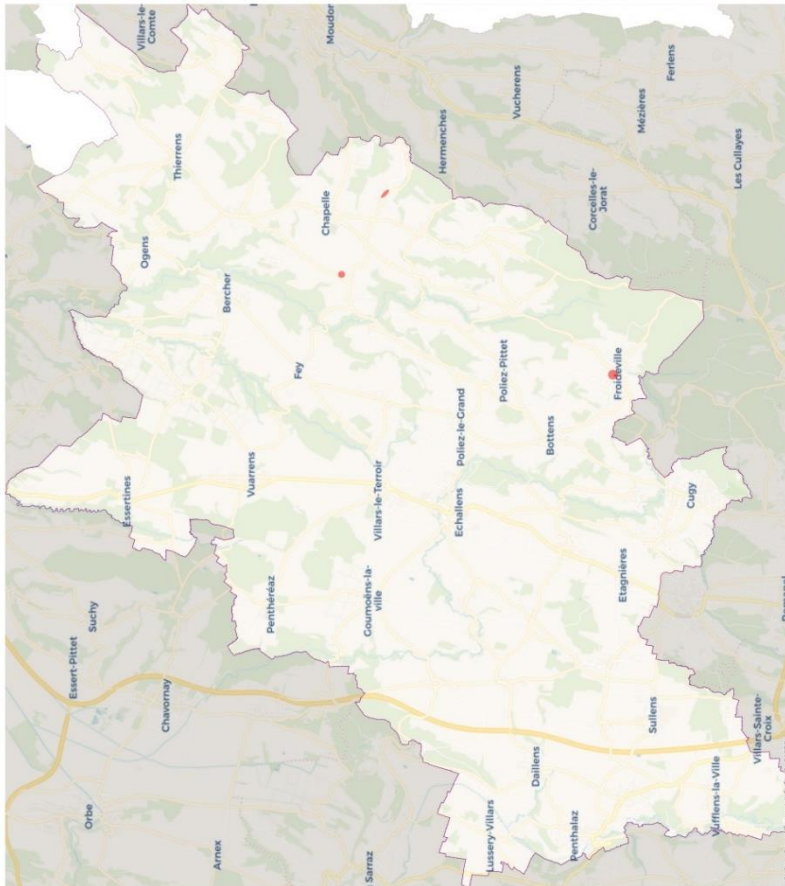
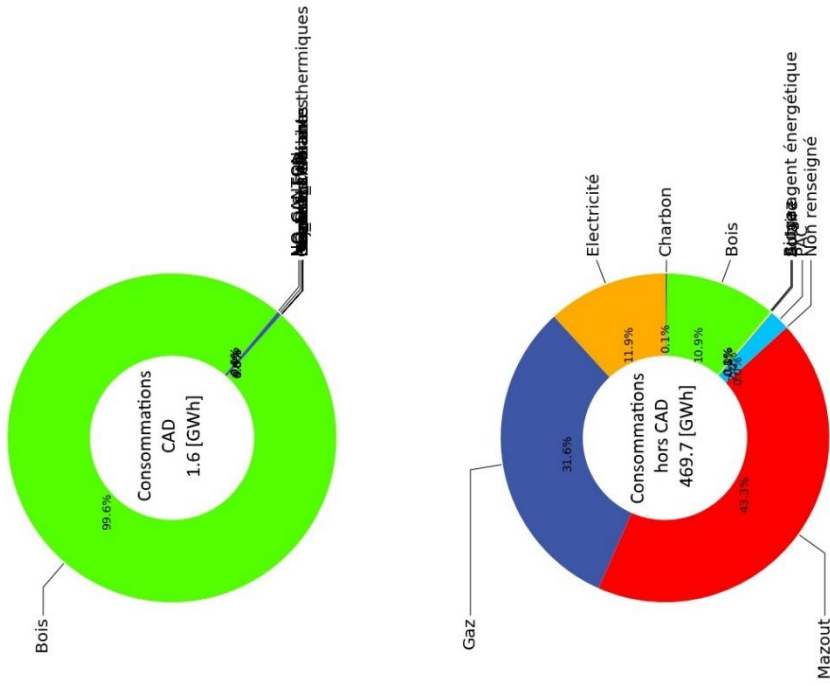




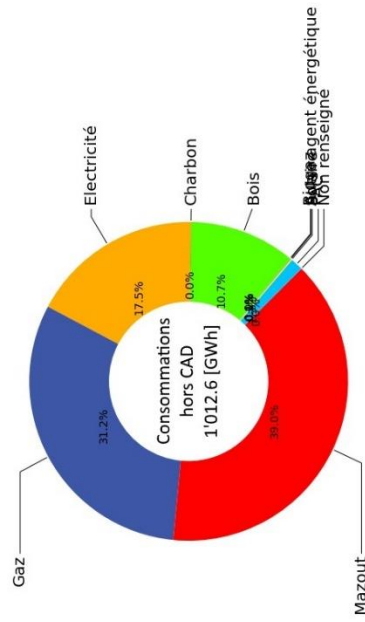
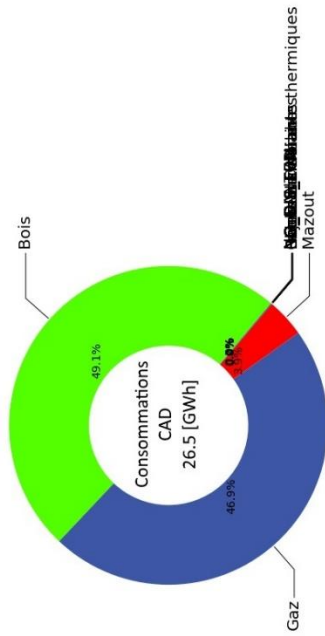
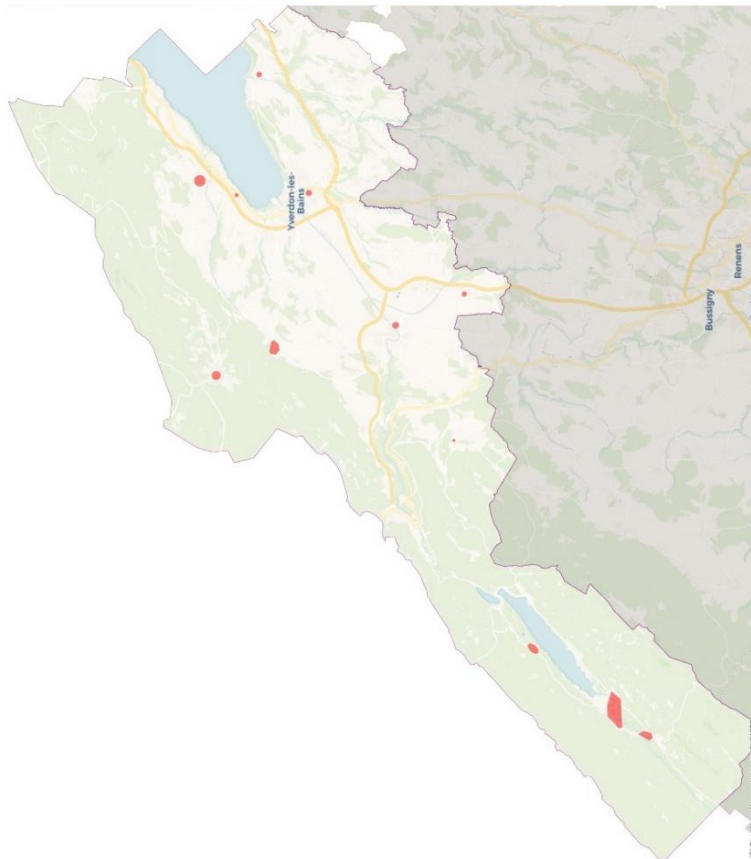
Broye-Vully



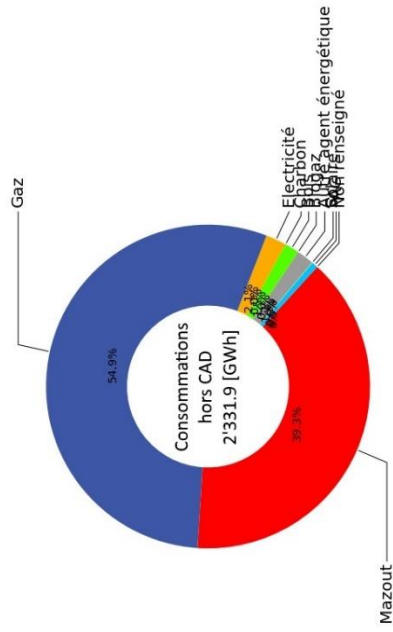
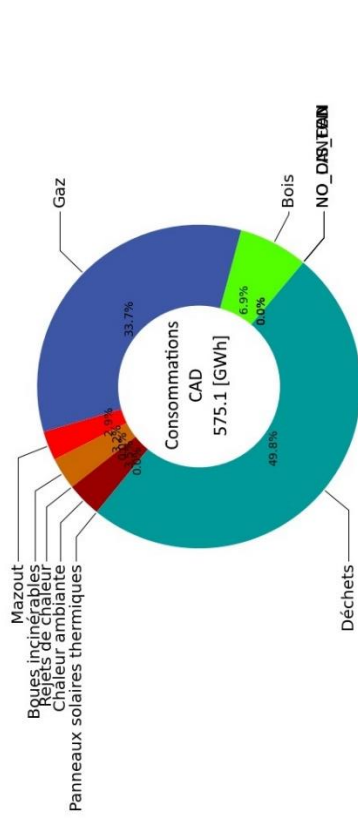
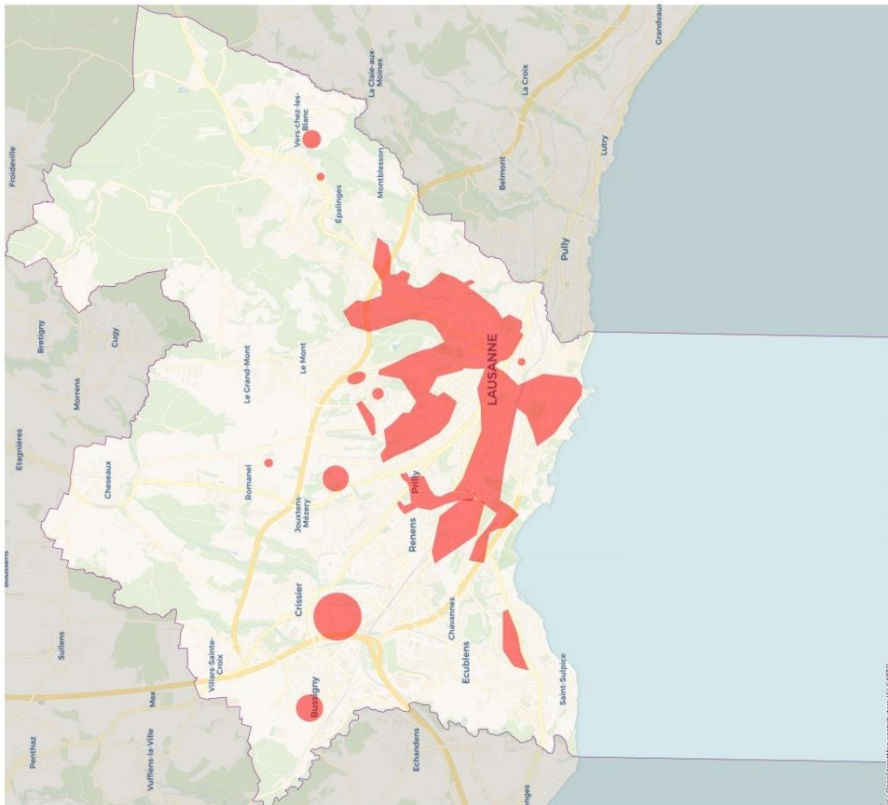
Gros-de-Vaud



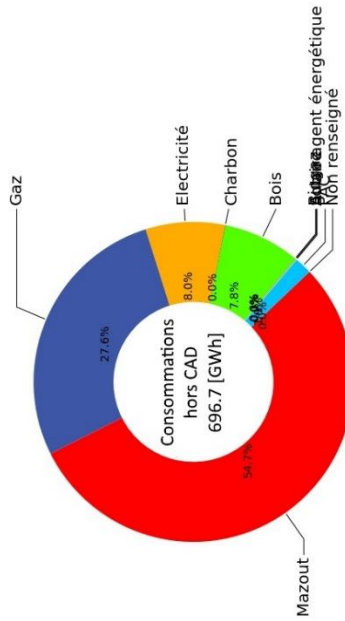
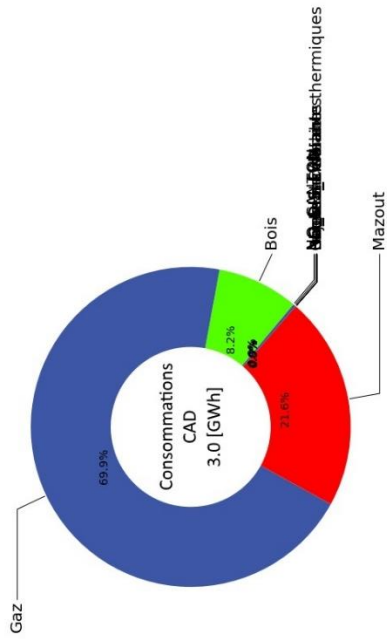
Jura-Nord vaudois



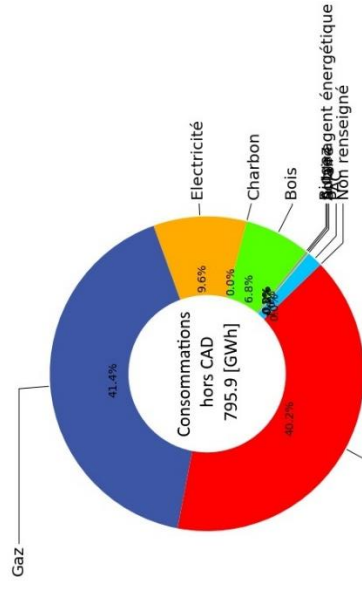
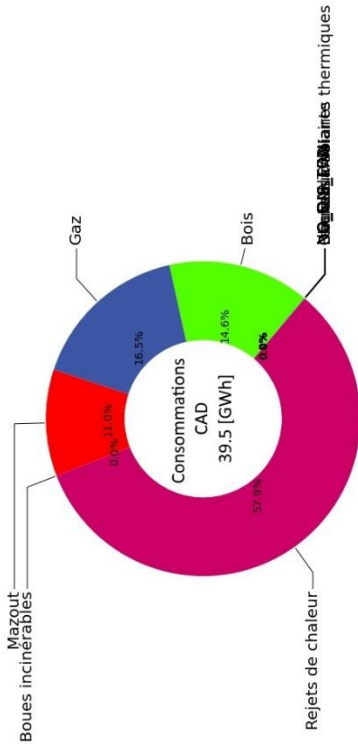
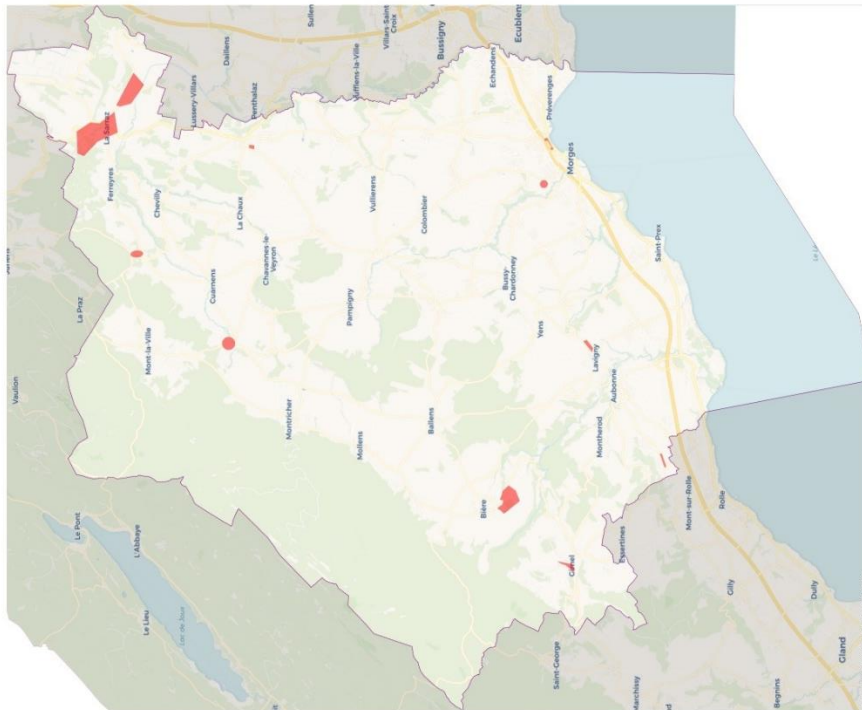
Lausanne - Ouest lausannois



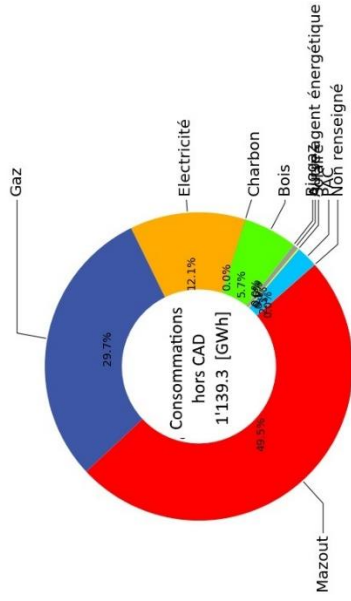
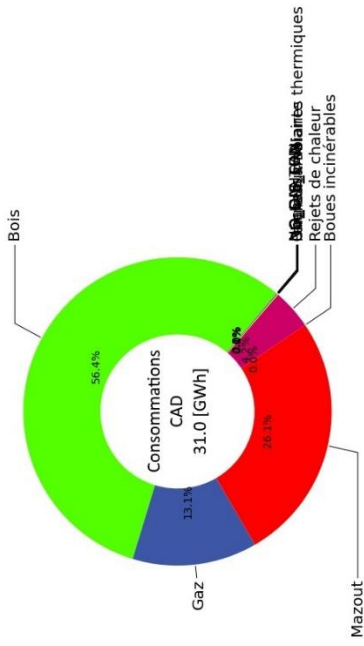
Lavaux-Oron



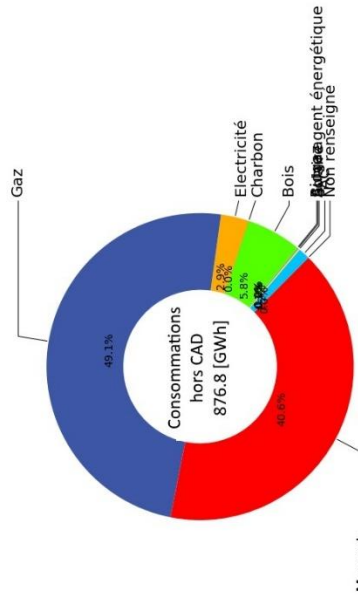
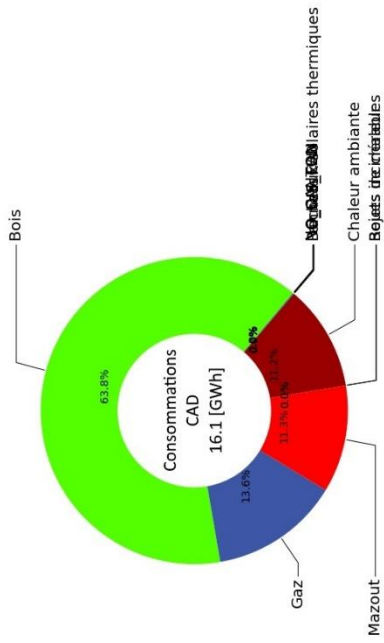
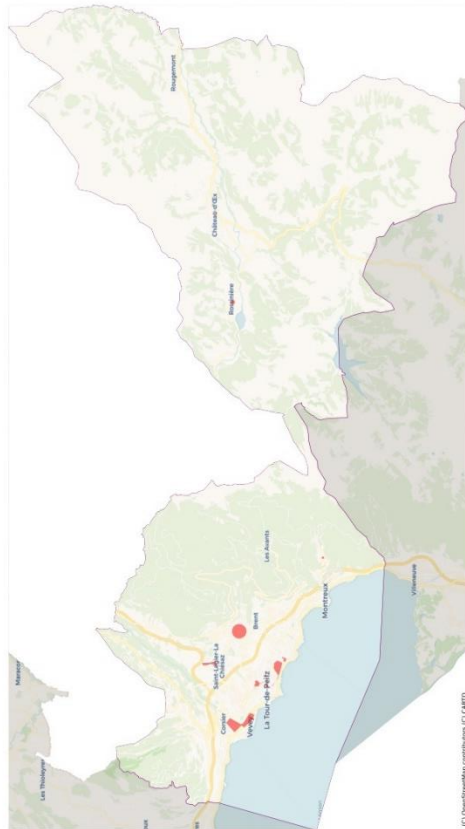
Morges



Nyon

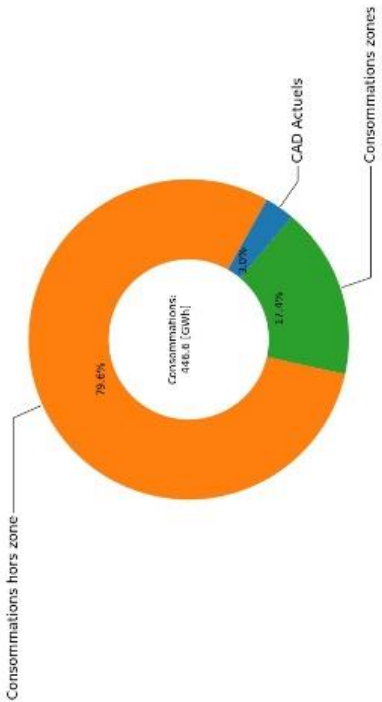


Riviera-Pays d'Enhaut

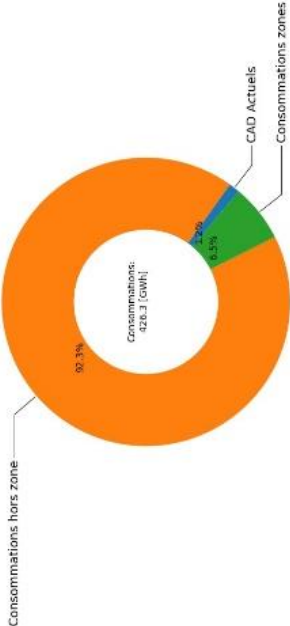
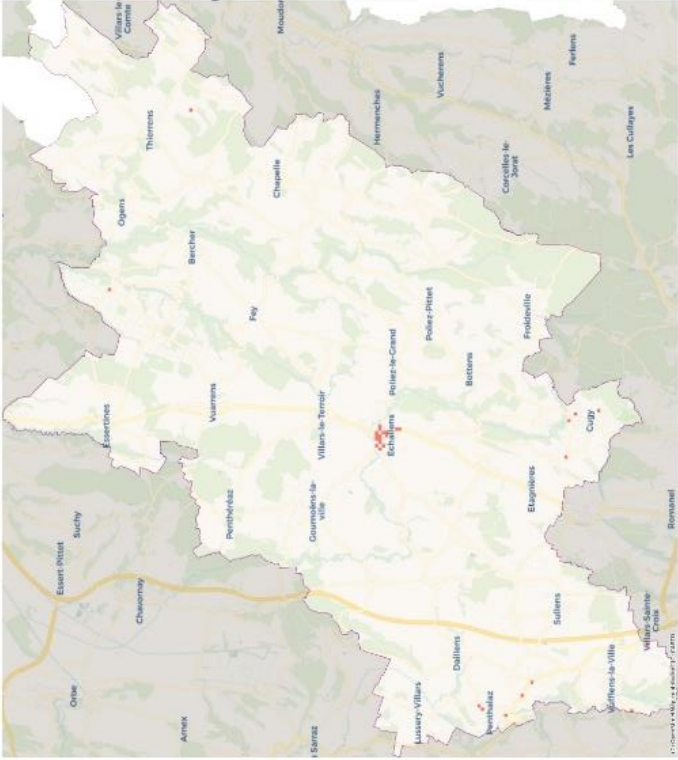


Annexe B Cartographie par district des zones propices aux réseaux et hors réseaux en 2035

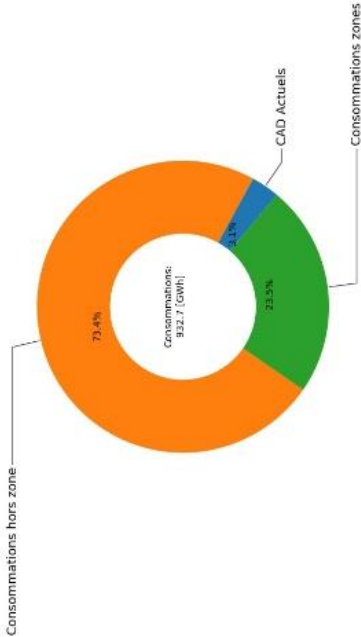
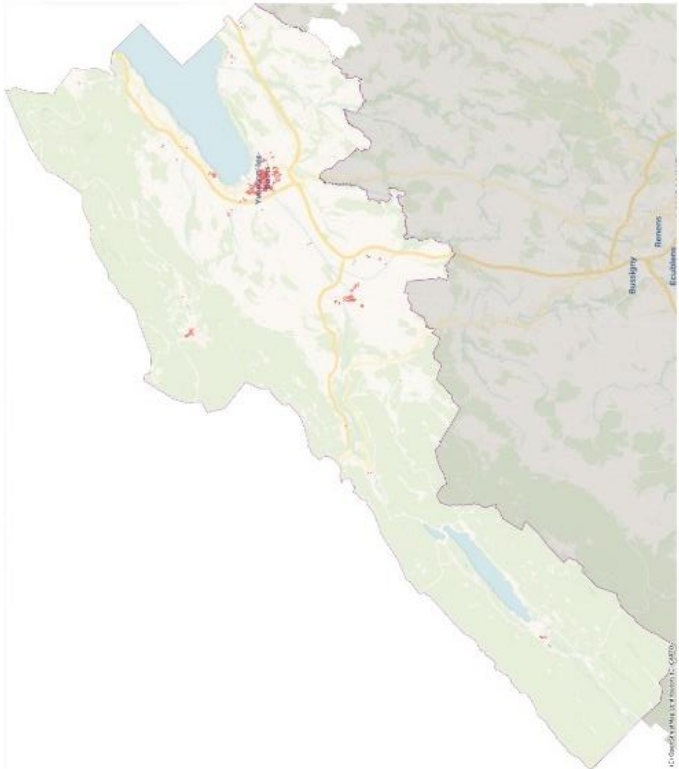
Broye-Vully



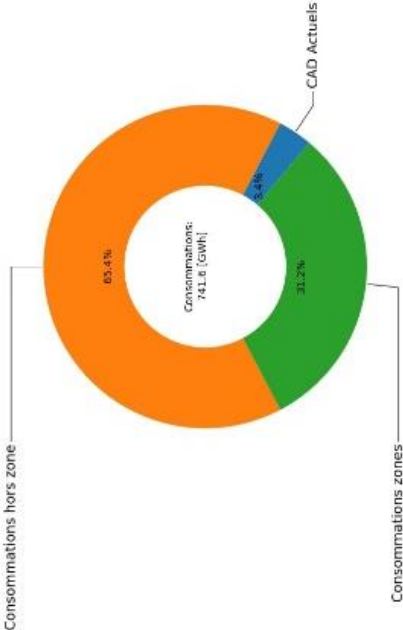
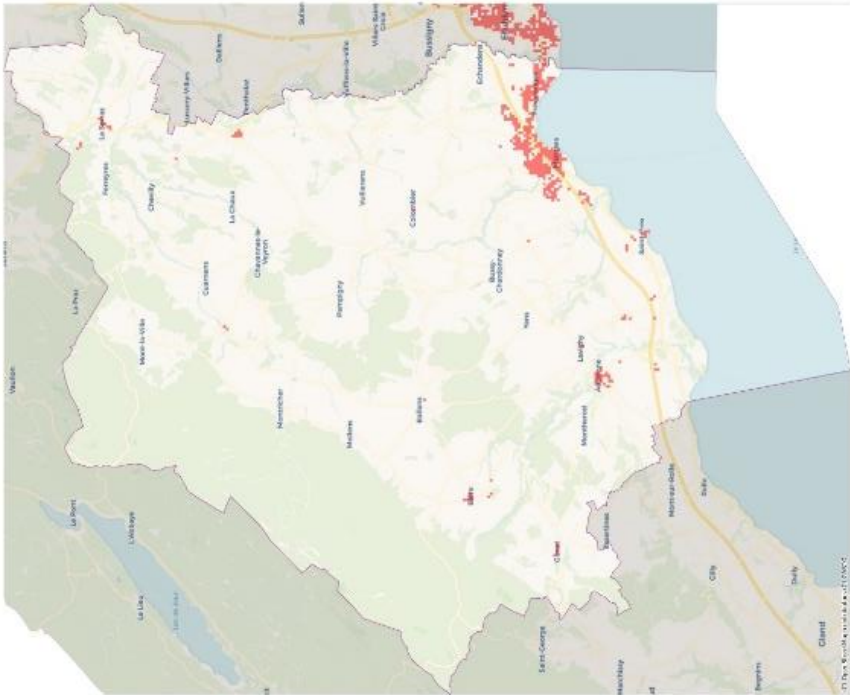
Gros-de-Vaud



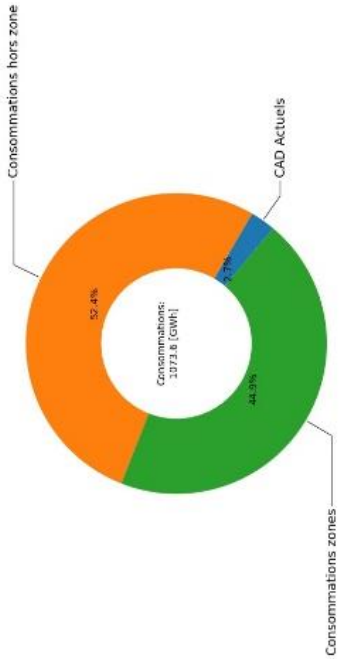
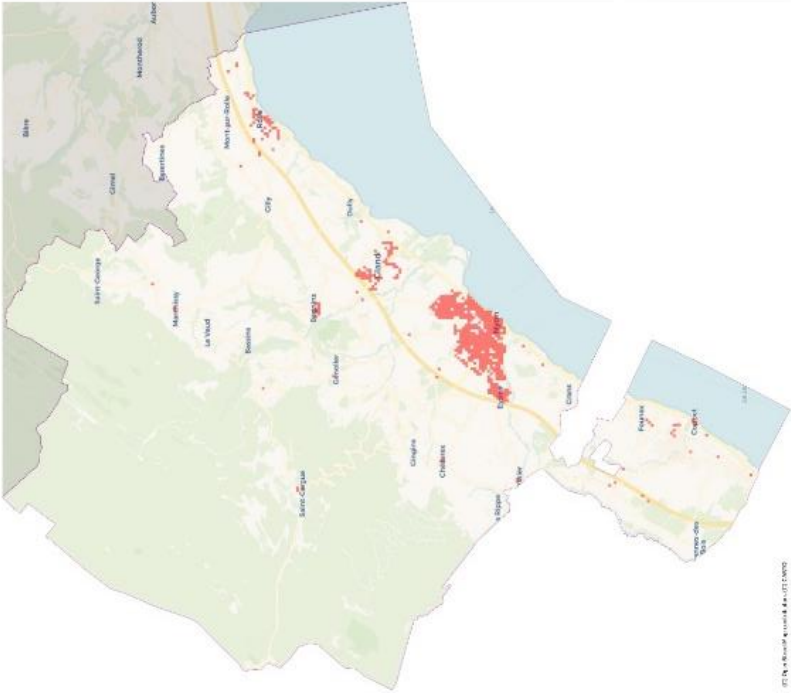
Jura-Nord vaudois



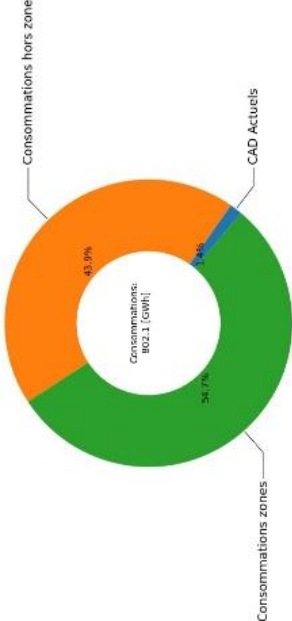
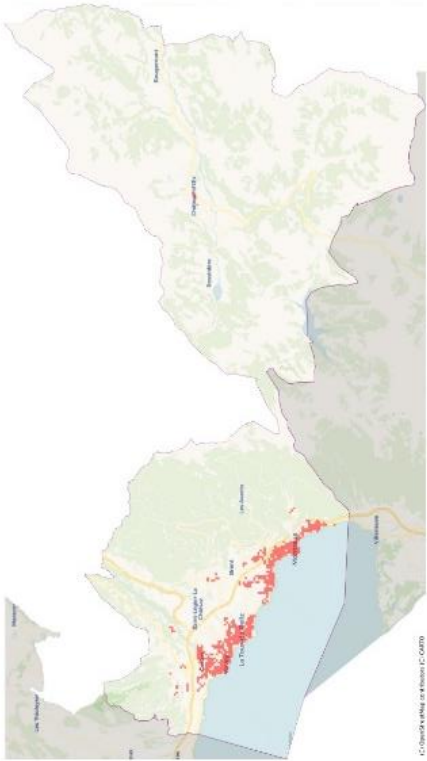
Morges



Nyon

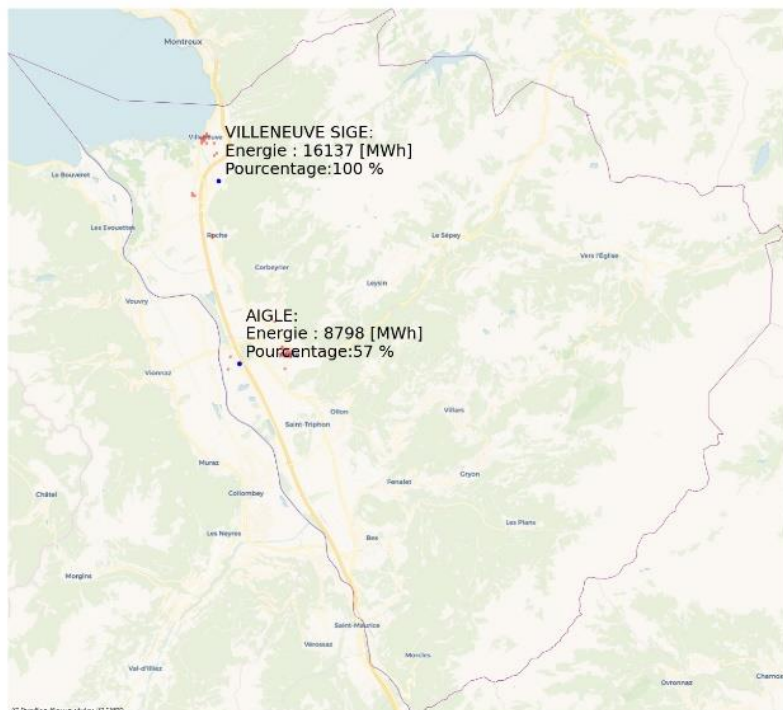


Riviera-Pays d'Enhaut

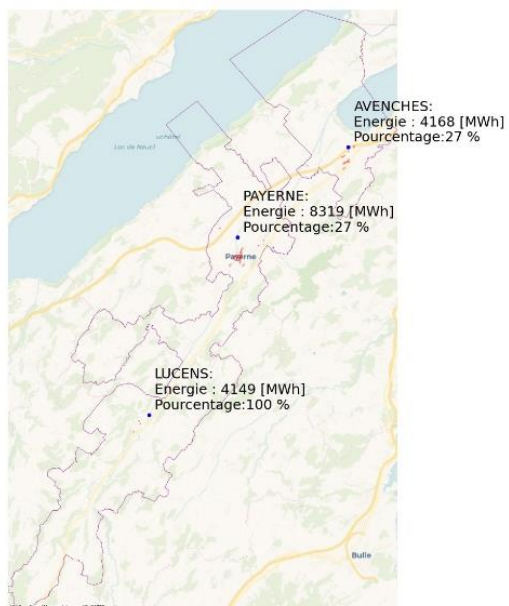


**Annexe C : cartographies de valorisation des STEP et des rejets
thermiques industriels dans les zones propices aux réseaux en 2035.**

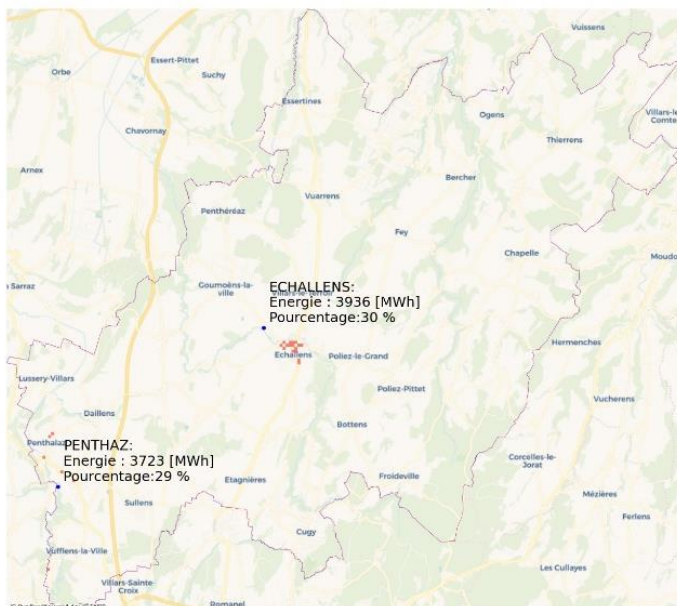
Aigle



Broye-Vully



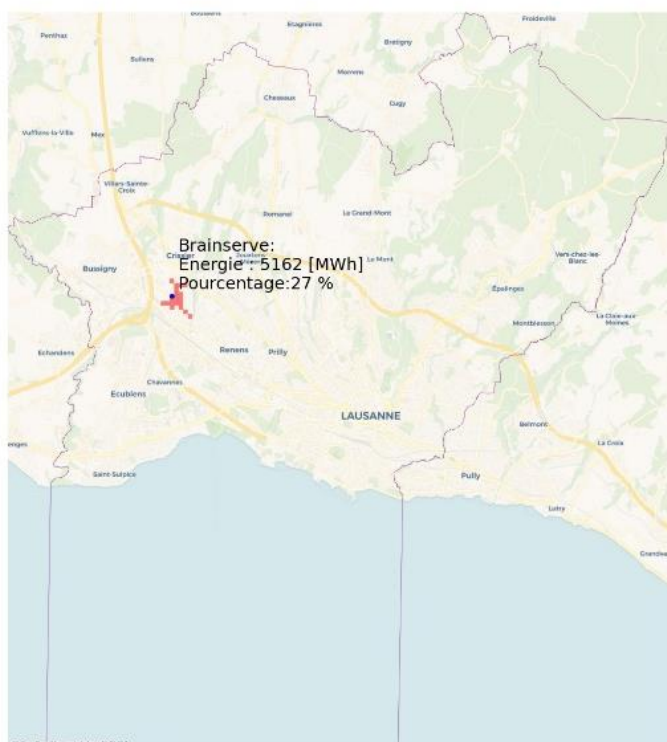
Gros-de-Vaud



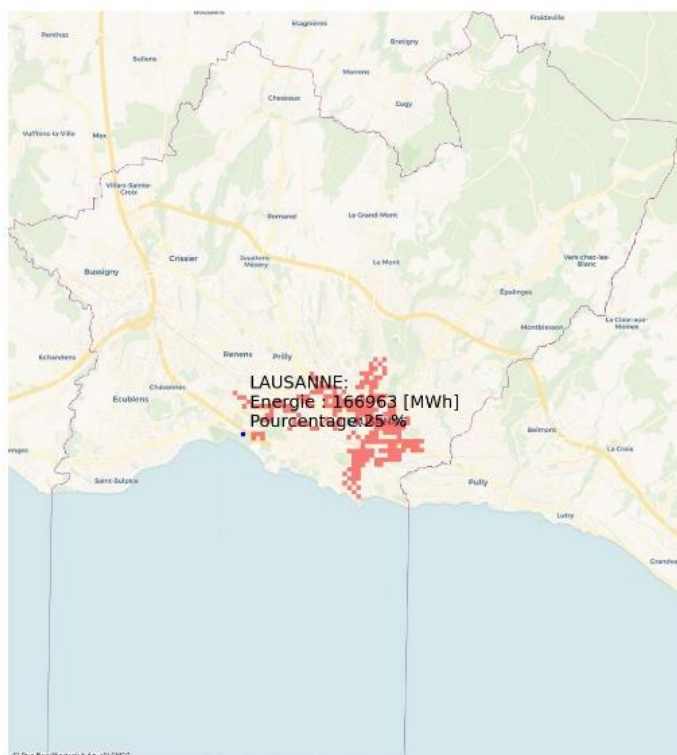
Jura-Nord vaudois



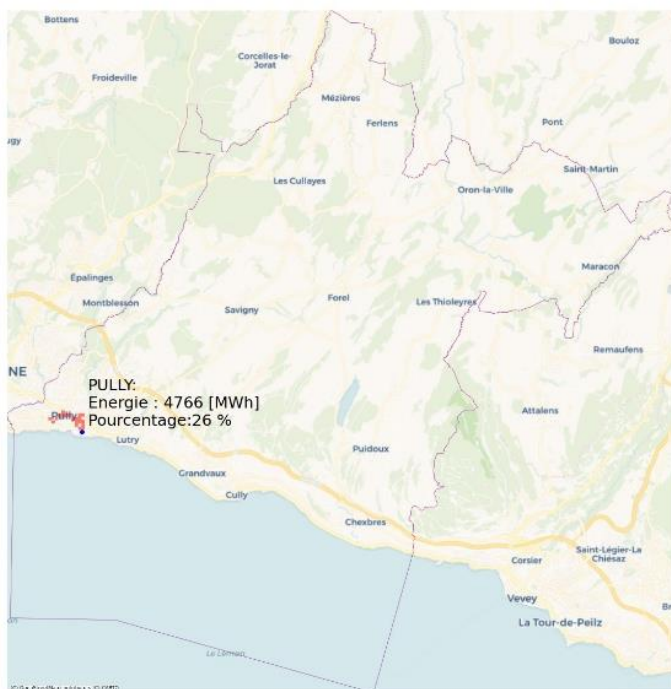
Lausanne - Ouest lausannois



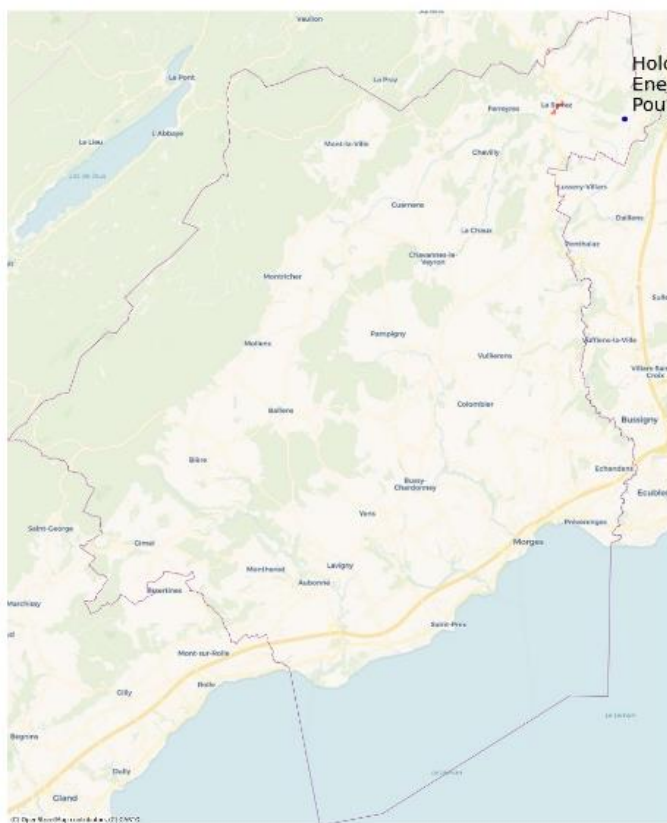
Lausanne - Ouest lausannois



Lavaux-Oron



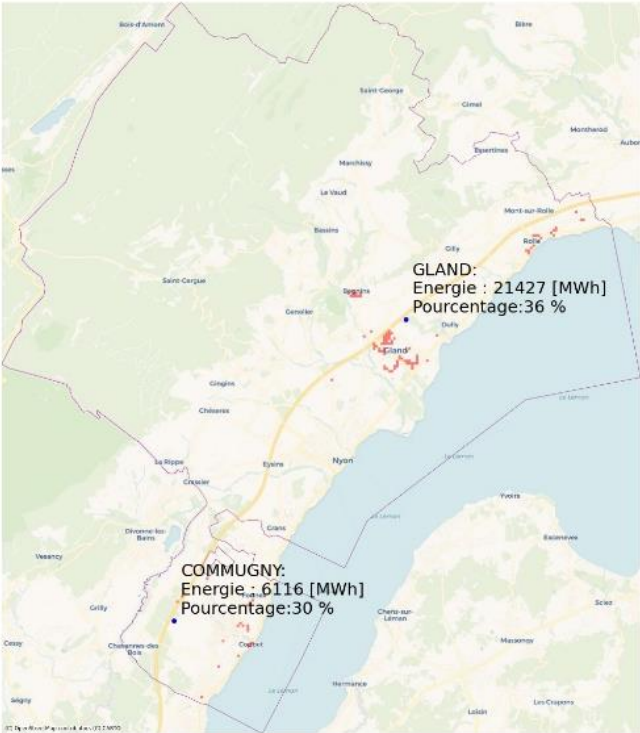
Morges



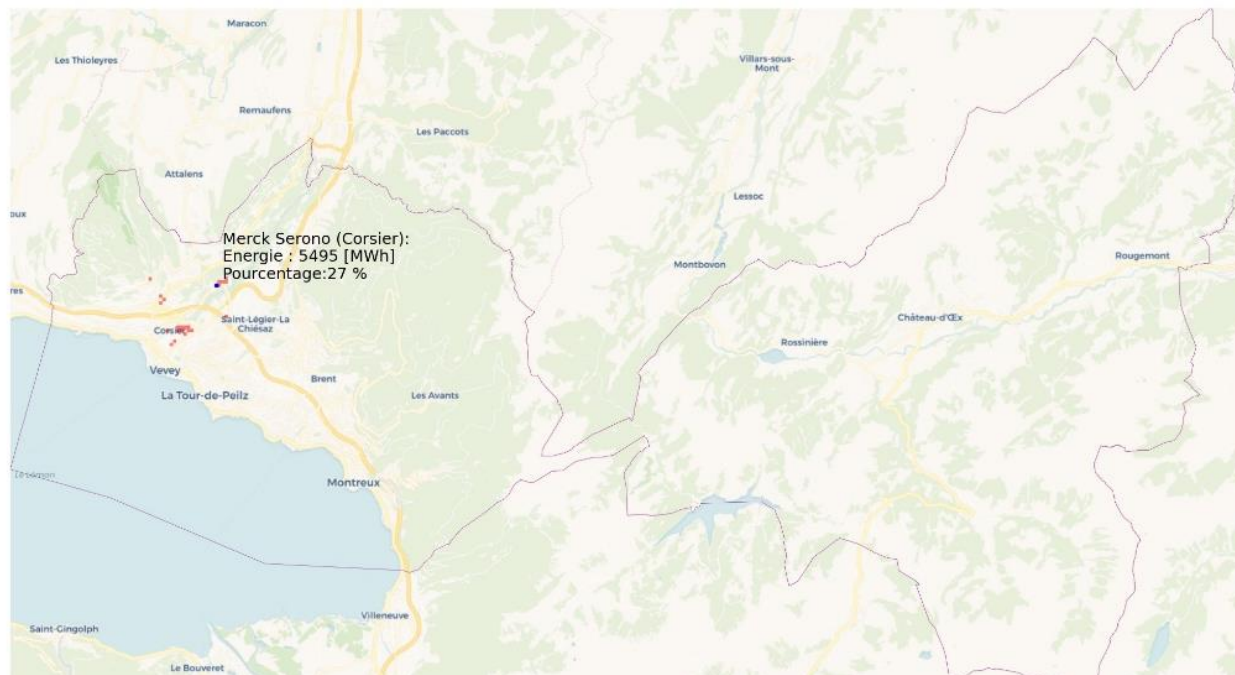
Morges



Nyon

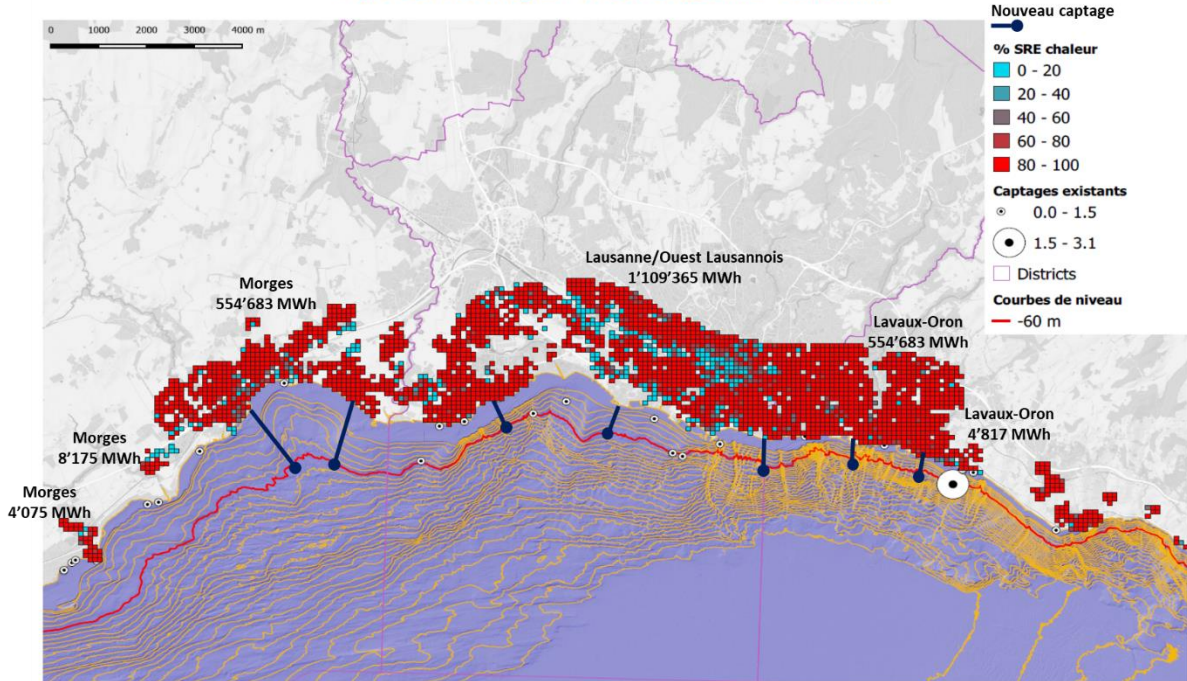


Riviera-Pays d'Enhaut

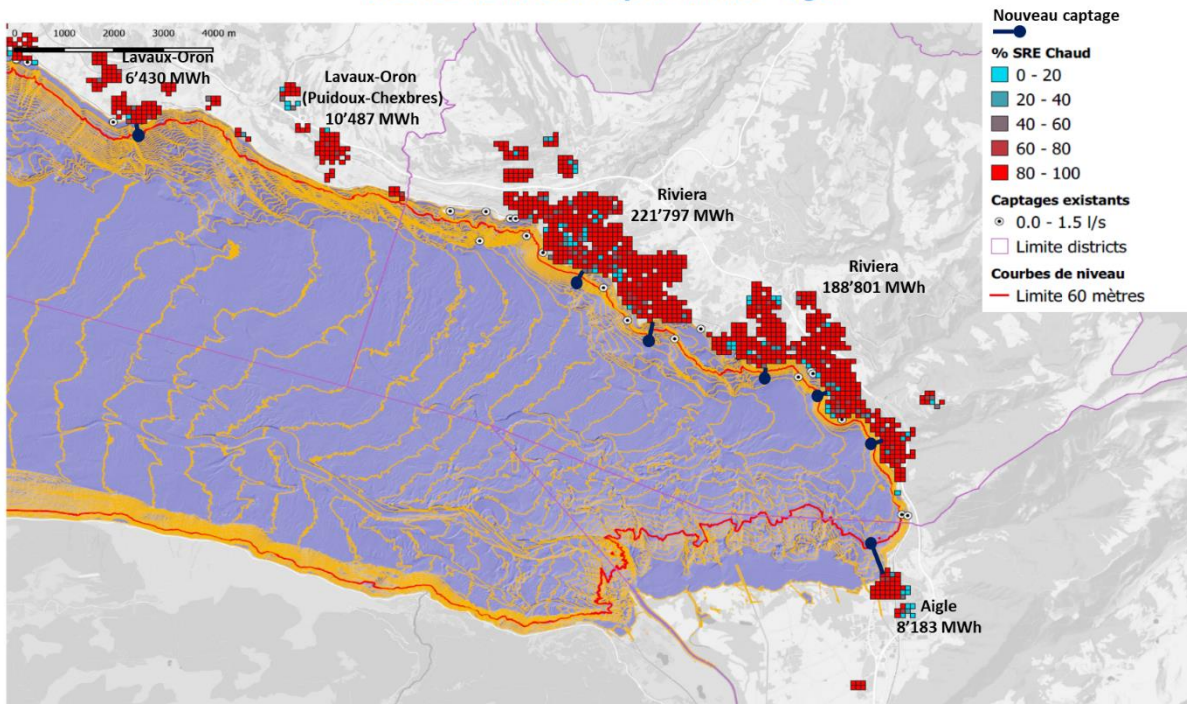


Annexe D Cartographies des zones propices aux réseaux aux abords des lacs, en 2035, bathymétrie, ouvrages existants et nouveaux captages praticables

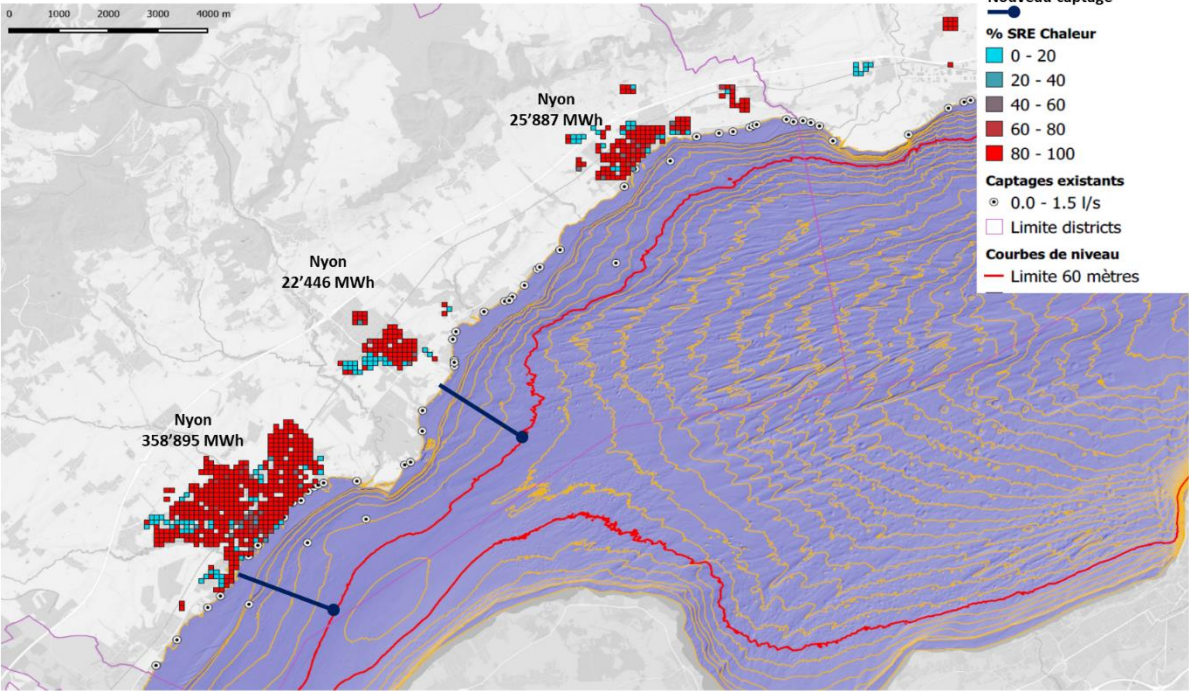
Districts de Morges - Ouest Lausannois - Lausanne



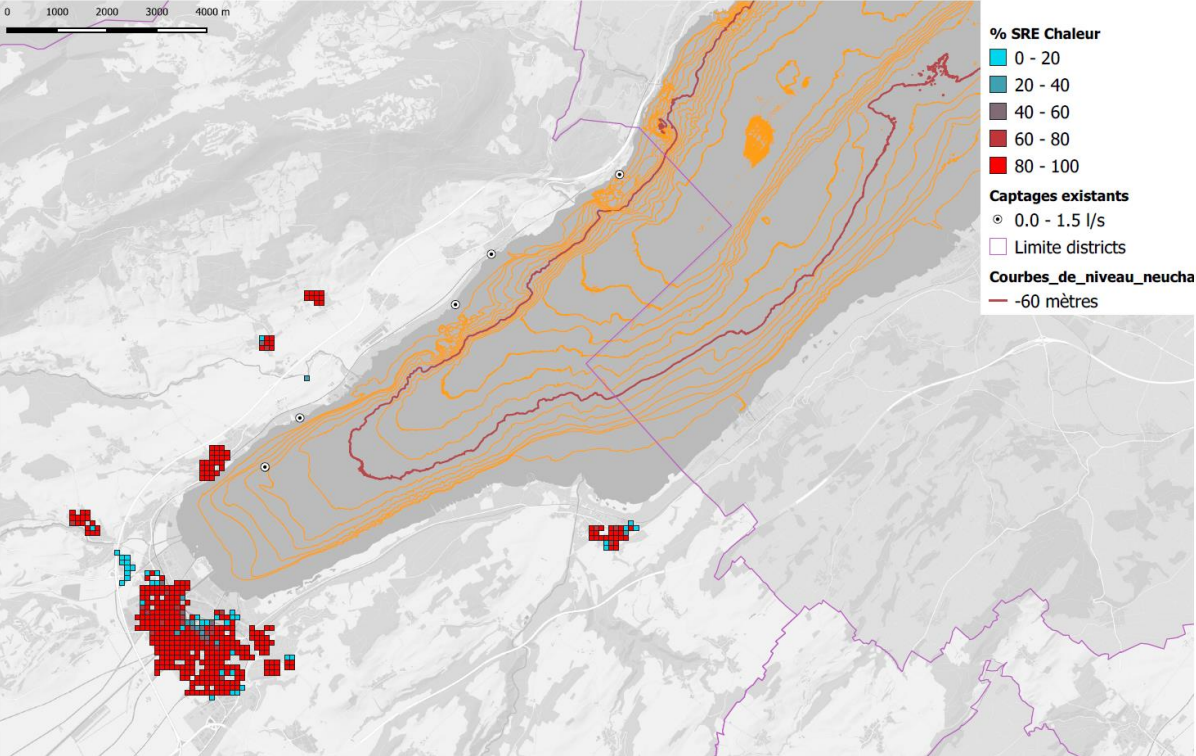
Districts de Riviera-Pays d'Enhaut - Aigle



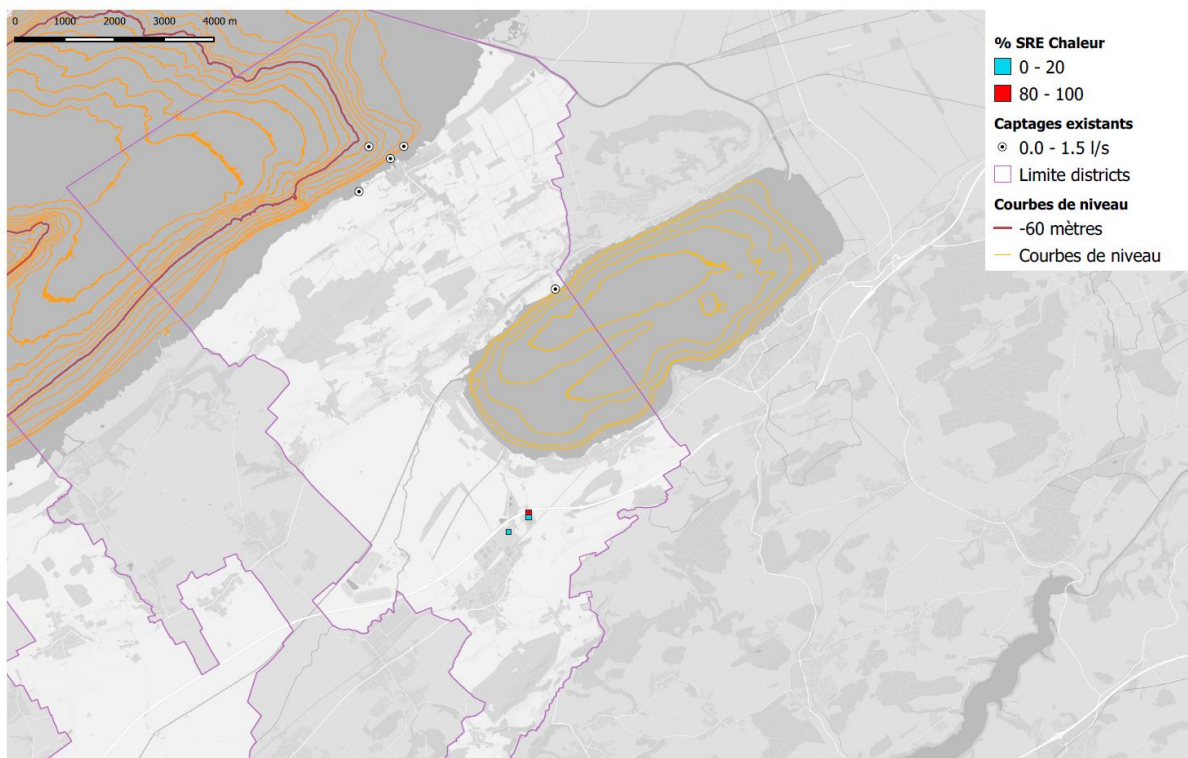
District de Nyon



Districts du Jura - Nord vaudois

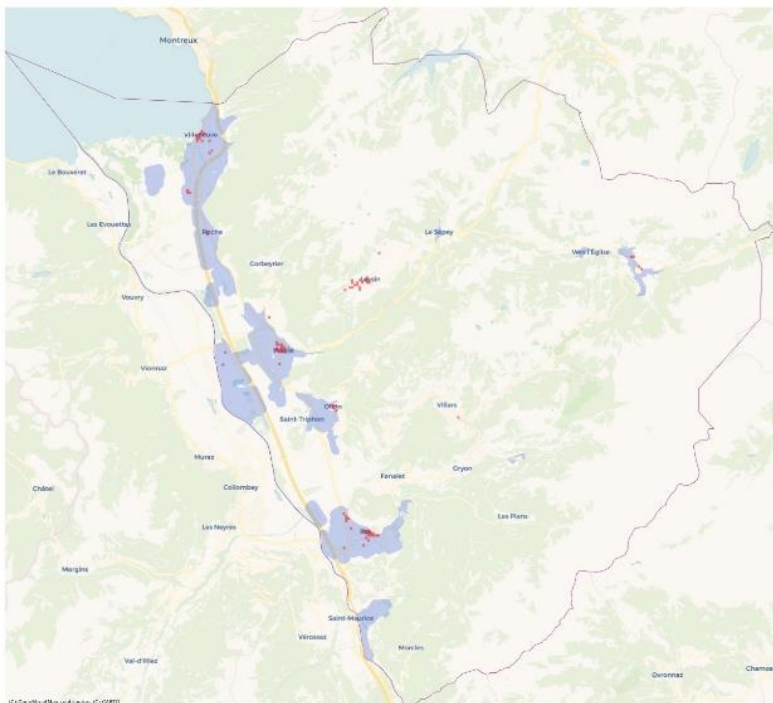


Districts du Jura - Nord vaudois



Annexe E : Cartographies de valorisation des nappes phréatiques dans les zones propices aux réseaux en 2035

Aigle



Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 19.7
Energie disponible [MWh]: 172515
Consommations totales [MWh]: 81404
Energie valorisée [MWh]: 50045

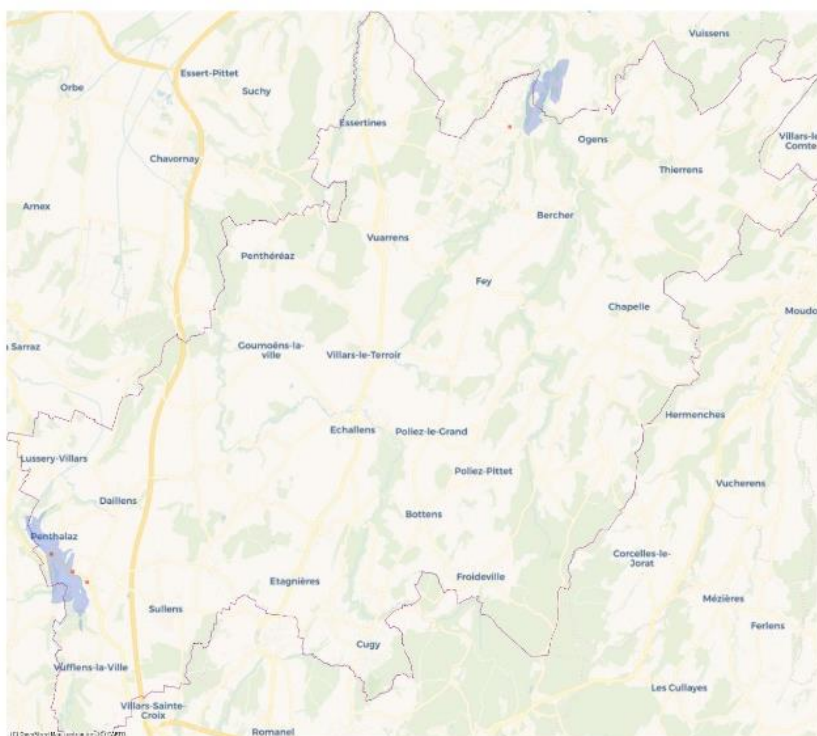
Broye-Vully



Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 8.8
Energie disponible [MWh]: 77231
Consommations totales [MWh]: 63587
Energie valorisée [MWh]: 30072

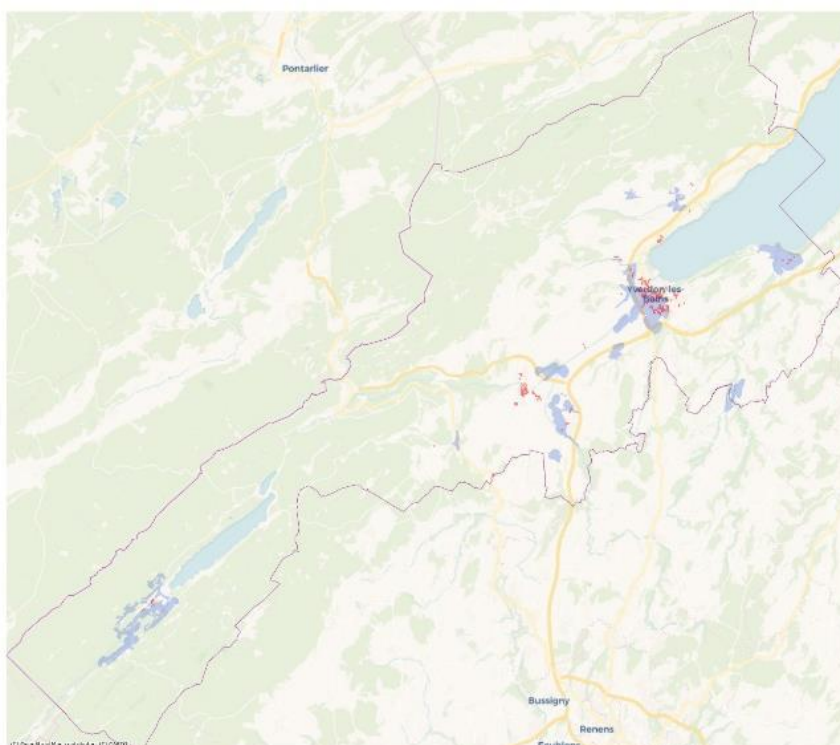
Gros-de-Vaud



Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 0.8
Energie disponible [MWh] : 7115
Consommations totales [MWh] : 6628
Energie valorisée [MWh] : 2876

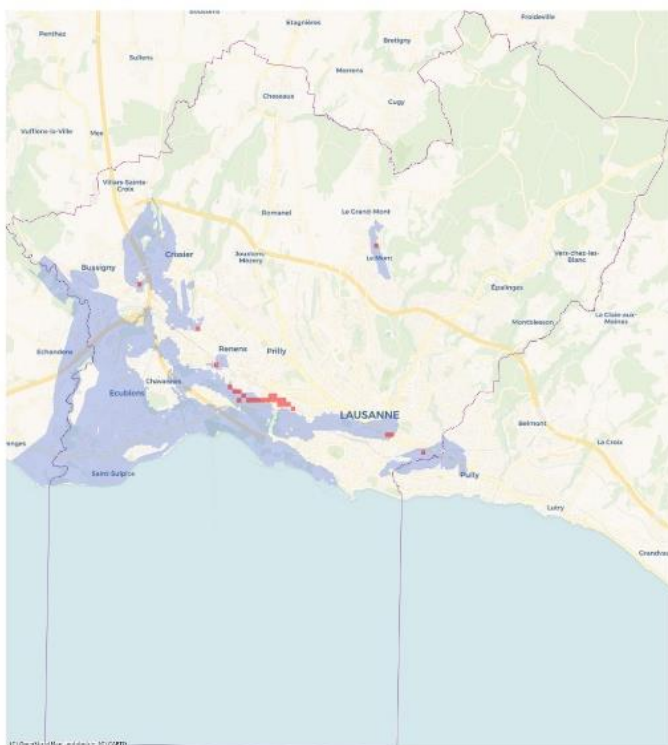
Jura-Nord vaudois



Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 17.4
Energie disponible [MWh] : 152477
Consommations totales [MWh] : 183316
Energie valorisée [MWh] : 60190

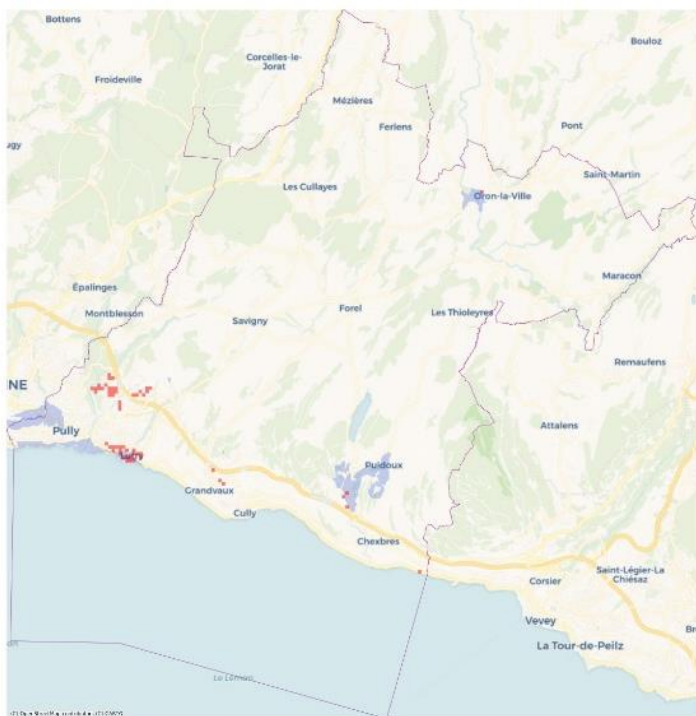
Lausanne - Ouest lausannois



Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 3.7
Energie disponible [MWh]: 32627
Consommations totales [MWh]: 47136
Energie valorisée [MWh]: 14118

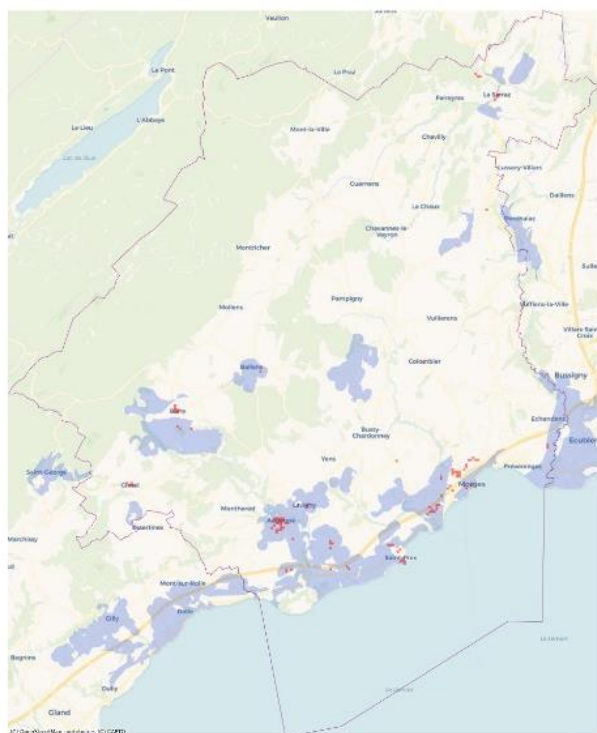
Lavaux-Oron



Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 4.0
Energie disponible [MWh]: 35284
Consommations totales [MWh]: 53702
Energie valorisée [MWh]: 15370

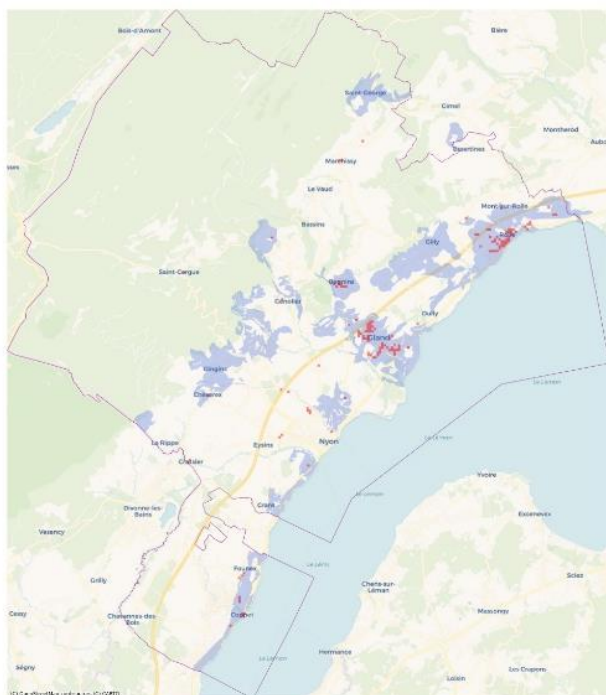
Morges



Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 24.9
Energie disponible [MWh]: 217968
Consommations totales [MWh]: 219566
Energie valorisée [MWh]: 83784

Nyon



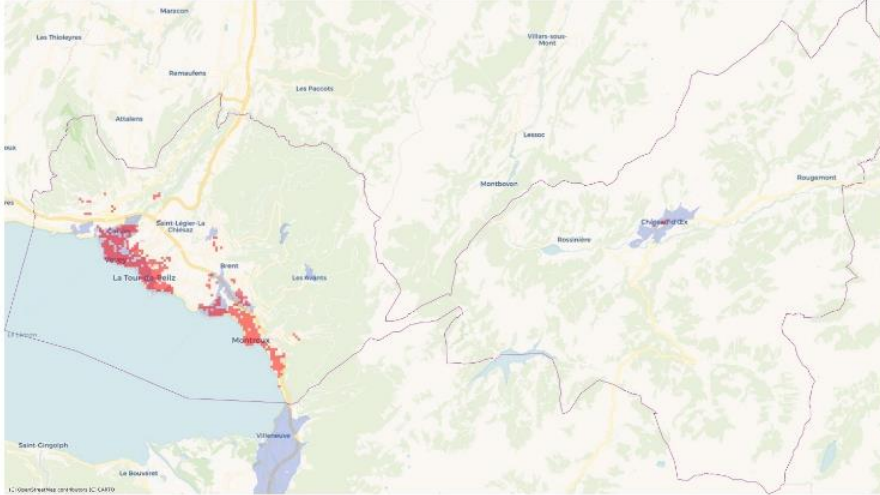
Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 20.3
Energie disponible [MWh]: 177678
Consommations totales [MWh]: 123664
Energie valorisée [MWh]: 59125

Riviera-Pays d'Enhaut

Donnees énergétiques :

Puissance disponible [MW] : 35.5
Energie disponible [MWh]: 311189
Consommations totales [MWh]: 446431
Energie valorisée [MWh]: 133589



Annexe F : Exemple de périmètres dans lesquels le développement de réseaux de froid à distance est à envisager (qualitatif).

