

14 mars 2014

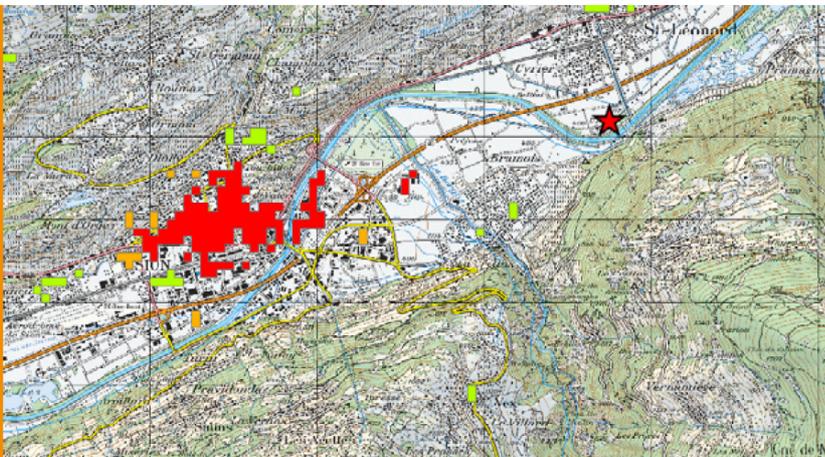
# **Livre blanc**

## **le chauffage à distance en Suisse – Stratégie ASCAD**

*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*

*Certifié selon la norme ISO 9001: 2008*





### **Mentions légales**

Projet: 12.3156.1

Auteur: Anton Sres

Téléfon: 031 370 14 35

E-Mail: [anton.sres@eicher-pauli.ch](mailto:anton.sres@eicher-pauli.ch)

Validation: Hanspeter Eicher, VR

Co-auteurs: Beat Nussbaumer, SPL

Etat: 3e version du 12 mars 2014

### **Donneur d'ordre**

Association suisse du chauffage à distance  
(ASCAD)

Walter Böhlen

Römerweg 2

5443 Niederrohrdorf

Cofinancé par l'Office fédéral de l'énergie

# Inhalt

<b>1. Résumé</b>	<b>4</b>	<b>5. Approvisionnement futur des chauffages à distance et de proximité</b>	<b>47</b>
1.1 Aperçu et objectif	4	5.1 Méthodologie	47
1.2 Situation initiale et hypothèses	4	5.1.1 Aperçu	47
1.3 Procédure	5	5.1.2 Priorités	47
1.4 Limites	6	5.1.3 Densité de raccordement radiale	48
1.5 Résultats	6	5.2 Attribution des sources d'énergie localisées	52
1.5.1 Régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance (clusters)	6	5.2.1 Attribution des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)	52
1.5.2 Energies renouvelables potentielles	7	5.2.2 Attribution des eaux souterraines	53
<b>2. Introduction</b>	<b>10</b>	5.2.3 Attribution des stations d'épuration des eaux usées (STEP)	55
2.1 Situation initiale	10	5.2.4 Attributions de lacs	55
2.2 Objectif	10	5.2.5 Attribution de cours d'eau	56
2.3 Procédure	11	5.3 Attribution de sources d'énergie non localisées	58
<b>3. Régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance</b>	<b>12</b>	5.4 Résultat	60
3.1 Méthodologie	12	<b>6. Perspectives</b>	<b>63</b>
3.1.1 Besoins en chaleur	13	<b>A. Annexe</b>	<b>64</b>
3.1.2 Parc immobilier	14	A.1 Bibliographie	64
3.2 Analyse des clusters	14	A.2 Remerciements	66
3.2.1 Densité thermique	15		
3.2.2 Rentabilité	16		
3.2.3 Constitution de clusters	16		
3.3.1 Répartition de la taille des clusters	18		
3.3.2 Potentiel du chauffage de proximité et à distance en Suisse	19		
<b>4. Chauffages à distance alimentés par des énergies renouvelables</b>	<b>21</b>		
4.1 Méthodologie	21		
4.2 Sources d'énergie renouvelable liées à une zone géographique	22		
4.2.1 Usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)	22		
4.2.2 Rejets thermiques issus de l'industrie	24		
4.2.3 Stations d'épuration des eaux usées (STEP)	28		
4.2.4 Eaux souterraines	31		
4.2.5 Lacs	34		
4.2.6 Cours d'eau	37		
4.3 Sources d'énergie renouvelable non liées à une zone géographique	41		
4.3.1 Bois-énergie	41		
4.3.2 Géothermie profonde	42		
4.4 Potentiel thermique des sources d'énergie renouvelable	45		

# 1. Résumé

## 1.1 Aperçu et objectif

**Première liaison établie entre les potentiels des énergies renouvelables et les besoins de chaleur des réseaux potentiels de chauffage de proximité et à distance.**

Le projet «Analyse SIG et étude des potentiels - phase 2» consiste à confronter pour la première fois en Suisse les sources d'énergies et les rejets thermiques renouvelables avec les besoins de chaleur des réseaux potentiels de chauffage de proximité et à distance, en tenant compte du po-tentiel et de la situation géographique. Les données ont été actualisées par rapport aux précédentes analyses de potentiels. Par ailleurs, les re-jets thermiques industriels et la chaleur ambiante issue des lacs et des cours d'eau ont été pris en compte, ce qui constitue une nouveauté.

L'analyse a été réalisée sur la base de données statistiques géoréférencées et de critères économiques et techniques connus.

**Détermination du potentiel de sources d'énergie renouvelable éprouvées.**

Le premier objectif était de définir la part à long terme des besoins de la Suisse en chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude dans des régions devant être principalement approvisionnées au moyen de réseaux de chauffage de proximité et à distance en raison de la densité élevée de consommation de chaleur et où un approvisionnement avec des énergies renouvelables via des chauffages individuels n'est pas possible ou difficilement réalisable. L'horizon temporel de cette analyse est établi à 2050.

**Identification de régions potentielles de réseaux de chauffage de proximité et à distance.**

Le deuxième objectif consistait à déterminer dans quelle mesure ces régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance peuvent être approvisionnées avec différentes sources d'énergie renouvelable éprouvées. Pour ce faire, le potentiel des différentes sources d'énergie doit être déterminé et la situation géographique des zones en demande de chaleur a également été prise en compte.

Enfin, cette étude vise à définir l'importance que revêtent les réseaux de chauffage de proximité et à distance pour la transition énergétique.

## 1.2 Situation initiale et hypothèses

La présente analyse se base sur le parc immobilier de 2010.

**Les besoins en énergie finale pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude devraient être réduits de 50% d'ici 2050.**

Afin d'évaluer les futurs besoins en chaleur, nous sommes partis du principe que, pour atteindre les objectifs de la politique énergétique suisse, une réduction à long terme de 50% des besoins en énergie finale pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude est nécessaire par rapport à 2010. L'industrie constitue une exception. Pour ce secteur, nous avons tablé sur une réduction de 20%. Cette réduction comprend la consommation additionnelle engendrée par la construction de nouveaux bâtiments imposée par l'augmentation des besoins.

Aucune densification n'a été prise en compte. Nous avons donc délibérément réalisé une analyse conservatrice.

Les réseaux de chauffage de proximité et à distance existants n'ont pas été pris en compte, car ils ne sont pas recensés à l'échelle de la Suisse. Il en va de même pour les réseaux de gaz et les planifications énergétiques locales.

### 1.3 Procédure

Dans la mesure où la répartition géographique de la demande et de l'offre de chaleur joue un rôle central, un système d'information géographique (SIG) a été utilisé pour l'analyse. Ce faisant, nous avons également eu recours à des outils analytiques existants ainsi qu'à de nouveaux algorithmes.

Les données de consommation pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sont disponibles dans les catégories «habitation», «services» et «industrie» (sans chaleur industrielle) avec une résolution de 100 x 100 mètres (hectare) pour toute la Suisse. Dans un premier temps, ces données de consommation ont été réduites pour 2050, conformément aux hypothèses admises.

À partir de ces données hectométriques, des zones de chauffage de proximité et à distance (clusters) où les coûts de distribution de la chaleur ne dépassent pas 4,5 cts/kWh ont pu être identifiées à l'aide d'une analyse SIG et d'un modèle de coûts de distribution de chaleur existant légèrement remanié. À la lumière des expériences recueillies dans la pratique, nous avons obtenu des prix à la calorie pour les clients finaux qui seront rentables dans de nombreux cas compte tenu des prix actuels de l'énergie fossile et de l'internalisation des coûts externes des sources d'énergie fossiles.

Avant d'attribuer les sources de chaleur aux zones de chauffage de proximité et à distance identifiées, il a fallu déterminer leur potentiel et leur emplacement. Ce faisant, les sources thermiques suivantes ont été prises en compte:

1. Usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)
2. Rejets thermiques émis par les procédés industriels (RT)
3. Eaux souterraines (ES)
4. Stations d'épuration des eaux usées (STEP)
5. Lacs
6. Cours d'eau
7. Bois
8. Géothermie profonde

Tandis que l'utilisation des sources de chaleur 1 à 6 est liée au site, le bois et la géothermie profonde ne sont pas liés à un emplacement géographique précis et peuvent donc être utilisés partout.

Au cours de la dernière étape, des sources de chaleur renouvelable ont été attribuées aux zones de chauffage de proximité et à distance identifiées à l'aide du modèle SIG conçu à cet effet.

**Identification de régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance avec des coûts de distribution de chaleur inférieurs à 4,5 cts/kWh.**

**Une distinction est faite entre les sources d'énergie renouvelable liées à un lieu et celles qui ne le sont pas.**

## 1.4 Limites

**Le travail effectué a ses limites et ne peut pas être comparé à un plan régional en matière d'énergie**

*La procédure choisie a clairement des limites et ne peut pas être comparée à un plan directeur régional en matière d'énergie. Ainsi, les stratégies d'approvisionnement locales ou les réseaux déjà existants n'ont pas pu être traités.*

*Les résultats obtenus fournissent néanmoins une vue d'ensemble nationale intéressante, qui doit être encore affinée et adaptée localement aux meilleures conditions économiques, notamment lorsque plusieurs sources de chaleur rentrent en concurrence sur un même lieu, telles que la chaleur ambiante issue des lacs et les rejets thermiques émis par les stations d'épuration. Autre exemple caractéristique: la chaleur ambiante issue des eaux souterraines et les rejets thermiques émis par les usines d'incinération des ordures ménagères.*

*Des décalages pourront apparaître entre les différentes sources d'énergie lorsque le besoin en froid sera pris en compte, car les sources de chaleur ne sont pas toutes des «sources de refroidissement».*

*Les zones de chauffage de proximité et à distance identifiées ne doivent pas toutes être mises en œuvre en tant que telles. Il peut arriver que des solutions de chauffages individuels basées sur des sources de chaleur renouvelable soient plus intéressantes économiquement. Les décisions doivent être prises sur la base de réflexions locales dans le cadre des plans directeurs en matière d'énergie.*

## 1.5 Résultats

### 1.5.1 Régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance (clusters)

**Près de 5'500 réseaux de chauffage à distance ont été identifiés.**

*Le regroupement d'hectares présentant des densités thermiques suffisantes a permis d'identifier environ 5'500 «clusters» appropriés, dont environ 10 «mégaclusters» présentant des besoins allant de 100 à 1'400 GWh.*

*D'après nos hypothèses, les besoins en chaleur confort, qui sont aujourd'hui de 85 TWh/a, passeront à 45 TWh/a d'ici 2050.*

**38% des besoins en chaleur confort peuvent être approvisionnés de manière rentable via des réseaux de chauffage à distance alimentés par des énergies renouvelables.**

*17 TWh/a de chaleur peuvent être distribués via les clusters susmentionnés. Il sera donc possible dans l'avenir, pour autant que les conditions cadres s'y prêtent, de couvrir jusqu'à 38% des besoins de la Suisse en chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude au moyen de réseaux de chauffage de proximité et à distance.*

### 1.5.2 Energies renouvelables potentielles

Au total, le potentiel des énergies renouvelables considérées est de 238 TWh/a, ce qui représente plus de cinq fois les besoins de 2050.

L'immense potentiel de chaleur offert par les lacs est étonnant. Le fait que l'eau lacustre puisse également être utilisée pour le refroidissement rend l'exploitation de cette énergie encore plus intéressante. Cet atout supplémentaire n'a pas été pris en compte, car les données relatives au besoin en refroidissement ne sont pas disponibles dans les données de consommation mises à disposition.

**Les lacs recèlent un grand potentiel d'approvisionnement en chaleur.**

Le potentiel des rejets thermiques émis par les procédés industriels n'a pu être évalué qu'approximativement, car aucun relevé exact n'est disponible, sauf dans le Canton du Valais. Le potentiel retenu (3,6 TWh/a) est considérable et à peu près comparable aux rejets thermiques émis par les usines d'incinération des ordures ménagères.

**Le potentiel des rejets thermique est considérable.**

### 1.5.3 Attribution des potentiels aux zones de chauffage de proximité et à distance

L'attribution des potentiels offerts par les énergies renouvelables aux zones de chauffage de proximité et à distance est exposée ci-après. Elle a été effectuée selon la priorisation et différents algorithmes présentés dans le rapport principal.

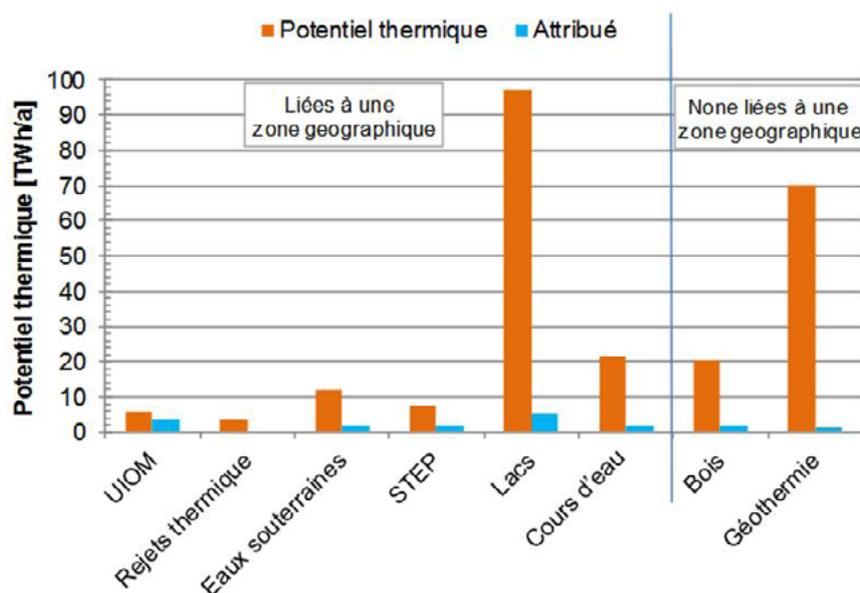


Figure 1: Potentiel thermique des énergies renouvelables (orange) et volume attribué aux zones de chauffage de proximité et à distance (bleu clair)

Compte tenu des hypothèses retenues, les 17 TWh/a des zones de chauffage de proximité et à distance potentielles peuvent être approvisionnés avec les sources d'énergie renouvelable présentées ici. La répartition est représentée dans l'illustration suivante.

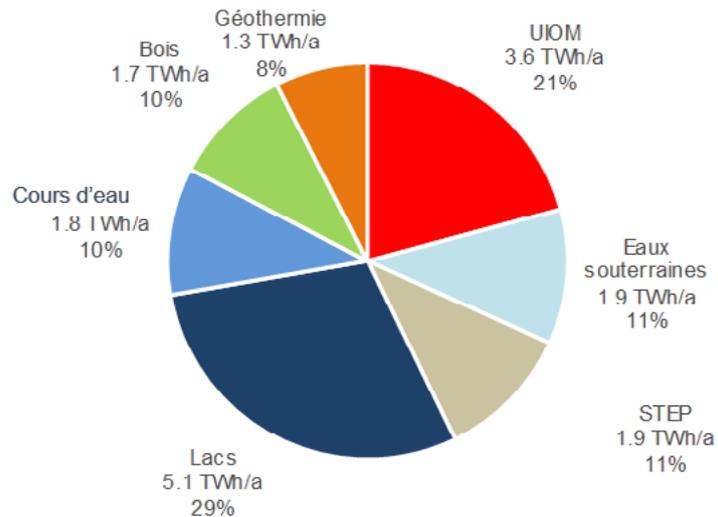


Figure 2: Répartition des sources de chaleur attribuées au potentiel de chauffage de proximité et à distance

**À l'avenir, les déchets seront brûlés là où une utilisation intensive des rejets thermiques sera possible.**

Le potentiel des rejets thermiques offert par les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) actuel peut être partiellement exploité de manière rentable par le biais de réseaux de chauffage à distance. Une partie des sites étudiés sont trop éloignés des clusters pour y être raccordés. Les rejets thermiques sont donc perdus, sans être exploités. Cette perte pourrait être réduite, si les déchets étaient incinérés là où les rejets thermiques pourraient être exploités de manière plus intensive.

**Des clarifications supplémentaires concernant le potentiel des rejets thermiques industriels sont nécessaires.**

Si le potentiel des rejets thermiques industriels a pu être évalué de manière générale par le biais de modélisations, il a dû être exclu la répartition des clusters à défaut de localisation précise. Des clarifications supplémentaires sont donc nécessaires pour pouvoir mieux évaluer l'importance du potentiel de l'exploitation des rejets thermiques industriels sur le plan commercial.

**Les eaux de surface et les grandes nappes phréatiques jouent un rôle central.**

L'exploitation de la chaleur offerte par les lacs et les grands cours d'eau n'a guère attiré l'attention jusqu'à présent. Ils pourraient livrer 6,9 TWh/a de chaleur ambiante, ce qui représente 39% de l'ensemble du chauffage renouvelable à distance et de proximité. Avec les eaux souterraines, qui font partie de la même catégorie de sources de chaleur renouvelable, ils pourraient fournir 8,8 TWh/a de chaleur ambiante, soit la moitié de la demande globale. Si l'on considère que ces trois sources de chaleur renouvelable sont aussi des sources de refroidissement renouvelable, cela montre l'importance cruciale de ces sources d'énergie jusqu'ici négligées.

*L'exploitation des rejets thermiques issus des stations d'épuration peut offrir près de 2 TWh/a de chaleur ambiante, soit 11% des besoins. Néanmoins, il manque encore 3 TWh/a pour pouvoir couvrir l'ensemble de la demande dans les régions potentielles de chauffage de proximité et à distance. Différentes options existent pour couvrir cet écart:*

**Plusieurs options sont possibles pour couvrir les 3 TWh/a manquants.**

- *L'exploitation des rejets thermiques issus de procédés industriels peut contribuer à combler cet écart dans une proportion encore inconnue. Avant qu'une évaluation correspondante ne soit possible, une clarification des potentiels doit être réalisée avec une localisation géographique précise.*
- *À long terme, la géothermie pourrait également fournir une part de chaleur, à condition toutefois que les coûts baissent à un niveau raisonnable. Il serait alors envisageable que la géothermie remplace la part des autres sources d'énergie renouvelable ou l'exploitation des rejets thermiques dans les réseaux de chauffage de proximité et à distance déjà construits.*
- *Le bois peut être utilisé partout. Mais dans la mesure où le bois est trop précieux pour simplement servir à chauffer des locaux et préparer de l'eau chaude, il ne devrait pas être utilisé, ou uniquement en cas de production simultanée d'électricité.*
- *Une partie de la couverture manquante est induite dans les clusters présentant un besoin en puissance calorifique inférieur à 500 kW. Ces clusters pourraient également être couverts par de petits réseaux de distribution de chaleur dotés d'installations bivalentes fonctionnant avec des sondes géothermiques ou même l'air extérieur comme source de chaleur.*

## 2. Introduction

### 2.1 Situation initiale

**Le tournant énergétique en cours requiert une extension massive de l'utilisation des énergies renouvelables.**

Le Conseil fédéral et le Parlement ont pris en 2011 des décisions de grande portée dans les domaines de l'énergie et de l'environnement. D'une part, la loi sur le CO<sub>2</sub> impose une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 20% d'ici 2020 par rapport à 1990. D'autre part, il a été décidé de sortir de l'énergie nucléaire à moyen terme. Outre la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique ambitieuses, l'approvisionnement énergétique suisse doit subir une profonde mutation, notamment axée sur l'extension massive de l'utilisation des énergies renouvelables.

**L'utilisation renforcée des énergies renouvelables présuppose des réseaux de distribution de chaleur efficaces et économiques.**

Dans le secteur du chauffage, l'utilisation renforcée d'énergies renouvelables implique de recourir à des réseaux de distribution de chauffage, surtout dans les zones à forte urbanisation, où il est impossible ou très difficile de réaliser des solutions de chauffages individuels alimentées par des énergies renouvelables en raison des densités de consommation élevées. C'est notamment le cas de l'utilisation de sources liées géographiquement (rejets thermiques issus des usines d'incinération des ordures ménagères (UJOM), des stations d'épuration des eaux usées (STEP) ou de l'industrie), ainsi que de l'utilisation de la chaleur issue des eaux souterraines ou des eaux de surface. Les installations nécessitant une production élevée de chaleur en raison de leur taille, telles que la géothermie ou les grandes installations de biomasse, en font également partie.

### 2.2 Objectif

**Élaboration des bases nécessaires, identification des potentiels et mise à disposition d'instruments de travail appropriés et largement accessibles.**

L'Association suisse du chauffage à distance (ASCAD) entend, avec ses partenaires, encourager la réalisation de réseaux de chauffage de proximité et à distance permettant l'exploitation judicieuse d'énergies renouvelables et de sources de rejets thermiques. Le présent travail doit permettre d'élaborer des bases et les instruments de travail nécessaires, d'évaluer le potentiel de l'énergie renouvelable pour le chauffage de proximité et à distance et d'identifier les zones appropriées à leur utilisation.

À l'issue de ces travaux, des données et des évaluations de potentiel adéquates seront intégrées dans le webSIG<sup>1</sup> de l'ASCAD, afin d'exploiter les synergies présentes. Les résultats seront ainsi accessibles à un large spectre d'utilisateurs, accélérant la mise en œuvre.

<sup>1</sup> Le webSIG est un outil SIG basé sur Internet destiné au développement de projets dans le domaine du chauffage à distance. Il fait l'objet d'une description détaillée dans (33) et est librement accessible sous forme de démo sur le site Internet de l'ASCAD (<http://www.fernwaerme-schweiz.ch>).

## 2.3 Procédure

La réalisation du projet a été divisée en trois phases:

- **Phase 1:** actualisation du webSIG de l'ASCAD avec des données de consommation actuelles dans les domaines «habitation», «services» et «industrie». Ces travaux ont été réalisés sur ordre de l'ASCAD par Eicher+Pauli à l'automne 2012.
- **Phase 2:** détermination de zones appropriées (clusters) à l'approvisionnement en chauffage de proximité et à distance basé sur les énergies renouvelables et localisation géographique de ces zones dans le webSIG.
- **Phase 3:** mise en œuvre. En collaboration avec des partenaires, l'ASCAD initie des projets de chauffage de proximité et à distance dans des régions identifiées comme appropriées.

Les travaux exposés ici se rapportent à la phase 2. La mise en œuvre a été effectuée selon les étapes suivantes:

- a. Évaluation du potentiel du chauffage de proximité et à distance via l'identification de zones présentant des densifications de besoin appropriées en chauffage (bâtiments existants, rénovés).
- b. Identification géographique et quantitative du potentiel d'énergies renouvelables se prêtant à l'approvisionnement en chauffage de proximité et à distance.
- c. Attribution des régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance aux potentiels des énergies renouvelables à l'aide d'algorithmes SIG.

**Procédure en trois phases, la deuxième phase étant la partie maîtresse de la procédure.**

**Analyse de la demande en chaleur liée à une zone géographique et attribution de la demande à l'offre d'énergies renouvelables.**

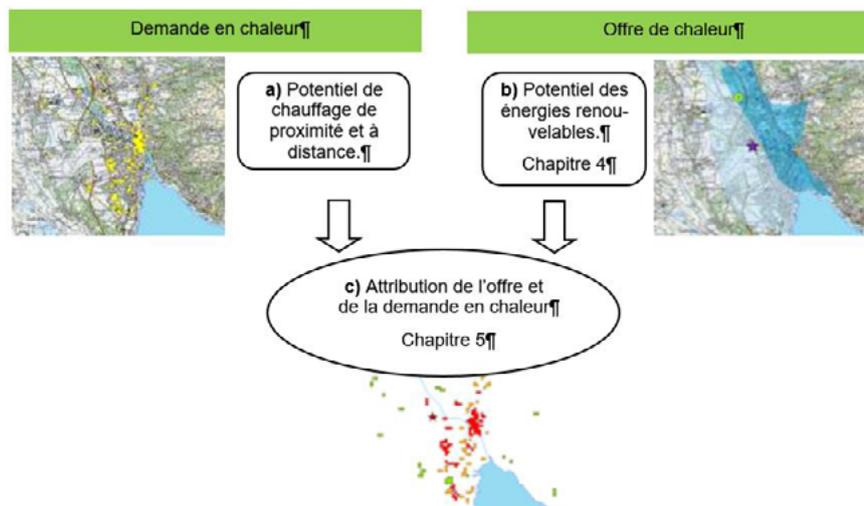


Figure 3: Représentation schématique du procédé appliqué lors de la phase 2

Il convient de partir du principe que les analyses effectuées et l'attribution correspondante ont été réalisées dans le cadre d'une détermination de potentiels de principe et ne peuvent en aucune façon remplacer des plans directeurs d'énergie.

## 3. Régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance

### 3.1 Méthodologie

**Regroupement des données relatives aux bâtiments, à l'énergie et à l'industrie et du besoin en chaleur par hectare.**

Les données du webSIG de l'ASCAD constituent la base de la détermination des régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance. Elles comprennent des informations liées à l'utilisation des bâtiments (habitation, services et industrie) et leur besoin en chaleur. Les statistiques suivantes constituent les fondements de ces données géoréférencées.

- Recensement des entreprises, Office fédéral de la statistique
- Recensement des bâtiments et des logements, Office fédéral de la statistique
- Statistique globale suisse de l'énergie 2010
- Consommation de l'énergie dans l'industrie et le secteur des services en 2010, Helbling

Les informations sont agrégées à l'hectare (100 x 100 mètres) et ne peuvent pas être localisées précisément pour des raisons de protection des données. Dans la Figure 4, les besoins en chaleur sont représentés sur une grille hectométrique. Il convient de noter que les besoins en chaleur déterminés ont été calculés à partir d'un parc immobilier entièrement rénové.

Les données ont été extraites du webSIG dans un système d'information géographique spécialement adapté aux analyses (ArcSIG 10), dans lequel elles ont d'abord été préparées pour l'analyse.

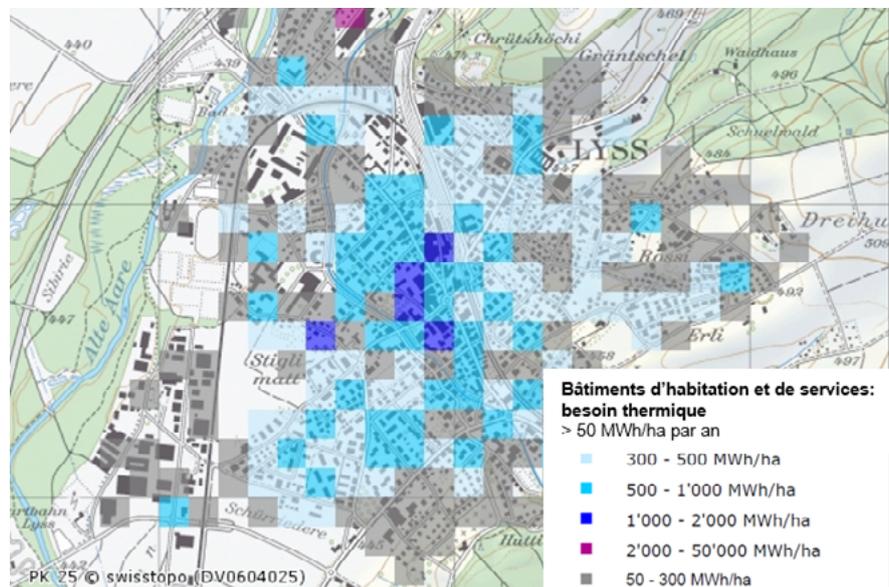


Figure 4: Image tirée du webSIG de l'ASCAD exposant les besoins en chaleur de bâtiments d'habitation et de services représentés sur une grille hectométrique

### 3.1.1 Besoins en chaleur

La préparation des données a d'abord consisté en la mise à jour des besoins en chaleur de l'industrie: la chaleur industrielle a été exclue. Celle-ci requiert généralement un niveau de température (élevé) qui ne convient pas aux chauffages à distance et de proximité basés sur des énergies renouvelables, tels que les pompes à chaleur.

**Les besoins en chaleur issue de processus industriels n'ont pas été pris en compte.**

Nous nous sommes appuyés sur une étude de Wagner (1) pour différencier les chaleurs industrielles. Wagner a étudié la répartition des besoins thermiques dans différentes branches de l'industrie allemande au regard du niveau de température requis. Le résultat est représenté dans la Figure 5.

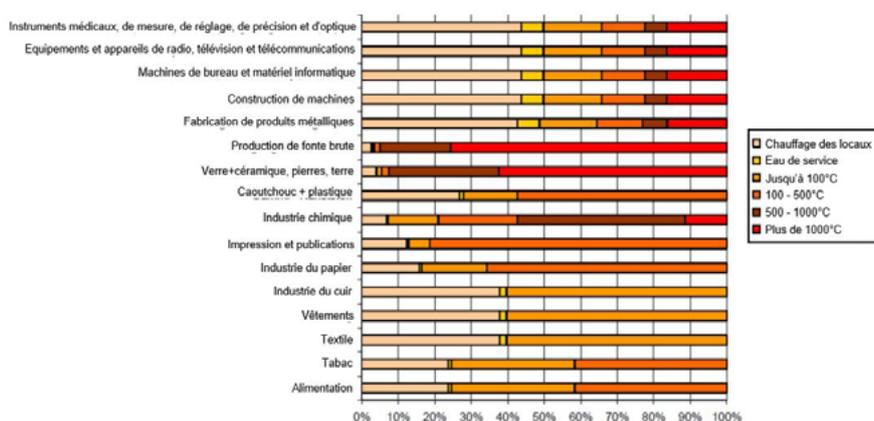


Figure 5: Répartition des besoins en chaleur par niveau de température dans l'industrie allemande (données tirées de l'étude de Wagner (1))

En supposant que les mêmes processus sont utilisés en Suisse, ces répartitions ont été utilisées pour différencier la chaleur des locaux. La répartition sectorielle a pu être harmonisée avec la répartition suisse de la NOGA.

**Répartition sectorielle selon la NOGA**

Lors d'une deuxième étape, les besoins en chaleur ont été réduits en tablant sur l'hypothèse de l'évolution de la demande en chaleur d'ici 2050. Nous nous assurons ainsi que les clusters déterminés pourront être approvisionnés à long terme de manière rentable en chauffage de proximité et à distance.

L'évolution des besoins en chaleur dépend de différents paramètres et conditions-cadres. Prognos les a étudiés en détail dans les perspectives énergétiques pour la Suisse en 2050 (2). Comme toujours, il est clair que les objectifs de l'approvisionnement énergétique ne pourront être atteints qu'en adoptant des mesures de grande envergure en matière d'efficacité. Conformément aux réflexions de (3), nous partons des hypothèses suivantes:

**Réduction des besoins en chaleur d'environ 50% dans les catégories «habitation» et «services», réduction de 20% dans la catégorie «industrie».**

- Réduction des besoins en chaleur de 50% pour le chauffage et l'eau chaude dans les catégories «habitation» et «services».
- Réduction des besoins en chaleur de 20% pour le chauffage et l'eau chaude dans la catégorie «industrie».

La réduction se rapporte à l'état de la consommation d'énergie de 2010 et est appliquée de manière systématique sans autre différenciation (telle que l'âge des bâtiments, etc.).

### **3.1.2 Parc immobilier**

**Parc immobilier de 2010 pris en compte avec une réduction de 50%.**

L'analyse SIG est basée sur le parc immobilier de 2010. Les nouveaux bâtiments construits en raison de l'augmentation de la population sont pris en compte de manière globale dans la réduction de 50%. Cela signifie que la réduction effective doit être supérieure à 50% dans les objets existants. Il importe de garder cette limitation à l'esprit en cas de comparaison avec des évaluations de potentiel analogues orientées vers le futur. Ce point de vue restrictif permet toutefois d'éviter les surévaluations de potentiels. De même, aucune densification exigée dans l'aménagement du territoire n'a été intégrée dans l'analyse. L'extrapolation peut donc être considérée comme très conservatrice.

La dernière étape a permis de localiser, à l'aide de l'analyse SIG et des données de besoin en chaleur, chaque hectare présentant une densification thermique suffisante pour constituer une zone de chauffage de proximité et à distance, et le cas échéant, de les regrouper en zones continues («clusters»). Pour ce faire, le modèle des coûts de distribution de la chaleur de l'étude (4) a été utilisé après avoir été légèrement remanié.

L'analyse a ainsi permis d'identifier des clusters susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance (évaluation au chapitre 3.3).

### **3.2 Analyse des clusters**

**Les hectares < 150 MWh/ha n'ont pas été pris en compte dans l'analyse. Il existe trois catégories de densification de construction.**

La constitution des clusters a été réalisée sur la base du modèle des coûts de distribution de la chaleur légèrement remanié de l'étude (5). Dans l'idéal, les approvisionnements en chauffage de proximité et à distance requièrent des zones présentant des besoins en chaleur élevés et spécifiques, c'est-à-dire des zones où un gros volume de chaleur peut être distribué sur une petite surface avec une faible longueur de conduites. Ces conditions ne sont pas réunies avec les hectares nécessitant moins de 150 MWh/a. Ils ont donc été exclus de l'analyse.

### 3.2.1 Densité thermique

Les besoins en chaleur spécifiques sont liés à la densité de construction qui influe sur les coûts des conduites. Dans les zones urbaines, les investissements dans la construction de la ligne sont beaucoup plus élevés que dans des zones rurales. Le modèle prend en compte cet aspect, en attribuant chaque hectare à l'une des trois catégories «Campagne», «Agglomération» et «Ville». La répartition est effectuée sur la base des besoins spécifiques en chaleur et de la situation géographique en fonction des catégories suivantes:

- Catégorie hectométrique «Ville»: deux hectares ou plus consécutifs présentant des besoins en chaleur spécifiques supérieurs ou égaux à 800 MWh par hectare et par année.
- Catégorie hectométrique «Agglomération»: plus de deux hectares consécutifs présentant des besoins en chaleur spécifiques compris entre 400 et 800 MWh par hectare et par année.
- Catégorie hectométrique «Campagne»: hectares consécutifs restants présentant des besoins compris entre 150 et 400 MWh par hectare et par année et hectares isolés présentant des besoins de 150 MWh et plus.

**Il existe trois catégories de densification de construction.**

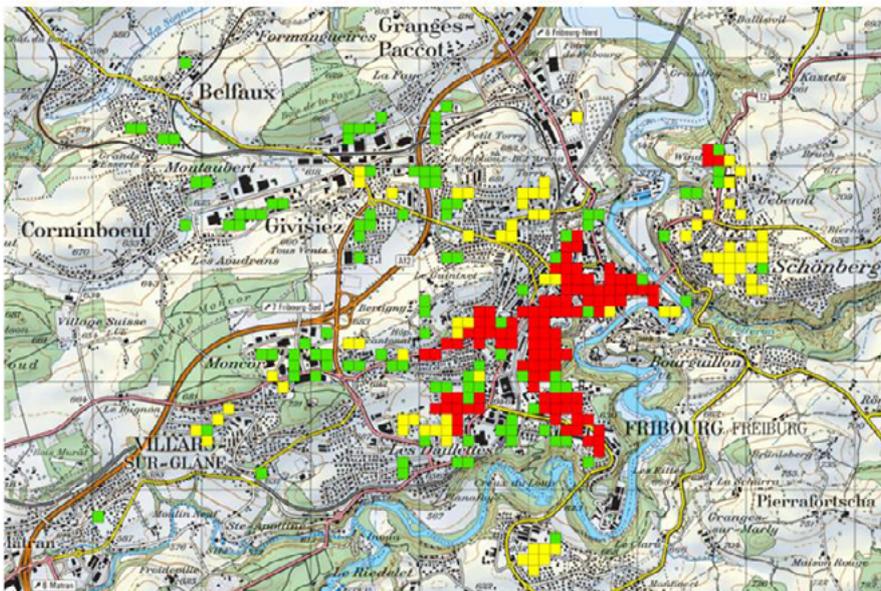


Figure 6: Hectares de la catégorie Ville (rouge), Agglomération (jaune) et Campagne (vert)

### 3.2.2 Rentabilité

Le prix du chauffage à distance est calculé à partir des coûts de l'énergie ainsi que des coûts générés par la production et la distribution de la chaleur. Les coûts de distribution de la chaleur (contribution au réseau) ne doivent pas être trop élevés, afin que le chauffage de proximité et à distance puisse concurrencer des productions de chaleur décentralisées.

**Coûts de distribution de la chaleur ne dépassent pas 4,5 cts/kWh.**

Différents travaux (voir p. ex. (6) et (7)) présentent des coûts de distribution de la chaleur d'environ 4 cts/kWh comme étant la limite de rentabilité. Le travail de (8) révèle qu'il existe parfois des réseaux de chauffage de proximité et à distance présentant des coûts de distribution élevés, qui ont été acceptés pour des raisons de politique énergétique. Dans ce contexte, nous avons fixé la limite supérieure à 4,5 cts/kWh, ce qui nous a permis de reprendre les paramètres du modèle existant.

**Technologie conventionnelle de distribution de la chaleur avec de l'eau chaude jusqu'à 90°C.**

Le modèle des coûts de distribution de la chaleur s'appuie sur une répartition de chaleur effectuée selon une technologie conventionnelle éprouvée. Cela signifie que la chaleur est acheminée à travers un réseau de distribution fermé avec de l'eau chaude à 70-90°C et revient ensuite à la centrale à des températures de retour d'environ 40°C. La dimension des conduites a été déterminée afin de pouvoir évaluer les investissements nécessaires.

**Regroupement de plusieurs hectares en clusters équipés de conduites de distribution de chaleur rentables.**

Les coûts de distribution de la chaleur dépendent des besoins spécifiques en chaleur de l'hectare concerné. Plus les besoins spécifiques sont élevés, plus les coûts de distribution de la chaleur sont bas. En se basant sur des topologies de réseau et des prix par mètre de conduite caractéristiques, qui nous ont été fournis dans le cadre de divers projets de chauffage à distance, les besoins spécifiques en chaleur ont été déterminés, les coûts de distribution de la chaleur se situant à environ 4,5 cts/kWh.

Ces valeurs limites nous ont permis de déterminer tous les hectares qui pouvaient être regroupés en clusters avec des coûts de distribution de chaleur inférieurs ou égaux à 4,5 cts/kWh.

### 3.2.3 Constitution de clusters

Pour identifier les clusters, il a fallu trouver des hectares susceptibles d'être regroupés avec des conduites de réseau de chauffage à distance. Un rayon de recherche, au sein duquel il est intéressant d'étendre le réseau du point de vue économique, est attribué à tous les hectares en fonction de leur densité thermique (voir Figure 7). Tous les hectares dont les rayons de recherche se chevauchent sont ensuite regroupés en un cluster.

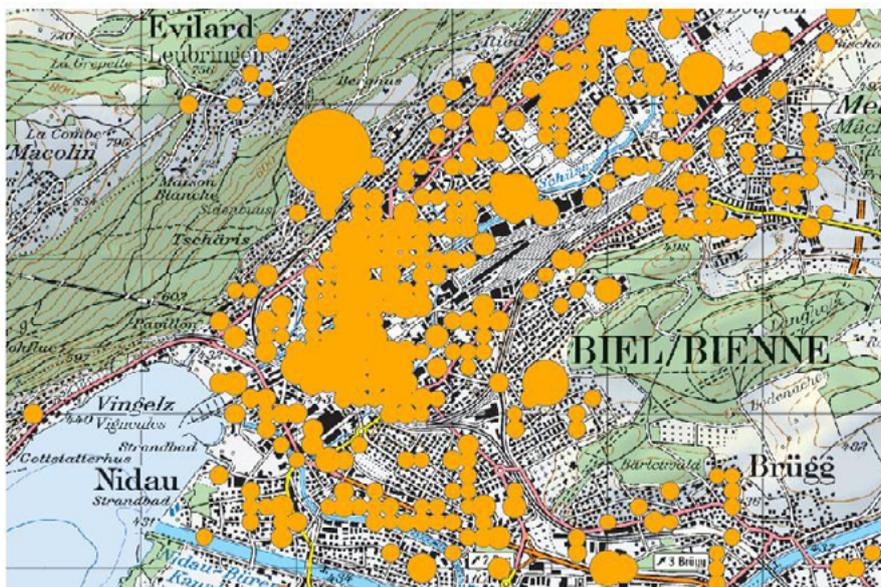


Figure 7: Constitution de clusters: les zones qui se chevauchent sont regroupées en clusters

Les hectares isolés restants, qui ne se prêtent pas au profil des réseaux de chauffage de proximité et à distance, ont été exclus de l'analyse. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la définition suivante du chauffage à distance:

«Le chauffage à distance désigne un chauffage produit et livré à d'autres par un tiers de manière indépendante d'un point de vue économique. Le chauffage ne dépend pas de la proximité de l'installation par rapport au bâtiment à chauffer ou de la présence d'un plus gros réseau de conduites.»

Il suffit donc qu'un seul bénéficiaire soit raccordé à une centrale de chauffage et paie pour obtenir du chauffage. En revanche, un complexe, qui possède une centrale commune et n'appartient qu'à un seul propriétaire, ne répond pas à cette définition. Cela vaut également pour les zones industrielles ou les cliniques. Toutes les constructions suivantes ont été exclues des hectares individuels:

- construction composée d'un seul bâtiment d'habitation (immeuble);
- construction seulement utilisée par le secteur industriel (hypothèse: un seul propriétaire);
- construction seulement utilisée par le secteur des services (hypo-thèse: un seul propriétaire, par exemple hôtels isolés);
- construction seulement utilisée par le secteur des services et comportant moins de 5 habitations (hypothèse: un seul propriétaire, par exemple modèle typique pour hôpitaux et cliniques psychiatriques);

**Exclusion des hectares isolés, qui ne correspondent pas à la définition du chauffage à distance.**

### 3.3 Résultats de l'analyse des clusters

#### 3.3.1 Répartition de la taille des clusters

**Environ 5'500 clusters ou réseaux de chauffage ont été comptabilisés.**

L'analyse des clusters dans le SIG a permis d'identifier environ 5'500 clusters ou régions susceptibles d'accueillir des réseaux de chauffage de proximité et à distance. La répartition de la taille des clusters est représentée dans la Figure 8. Il n'est pas étonnant que les plus grands clusters se trouvent dans les villes possédant des réseaux de chauffage de proximité et à distance existants. Ceux-ci couvrent des surfaces allant de 500 à plus de 1'300 ha

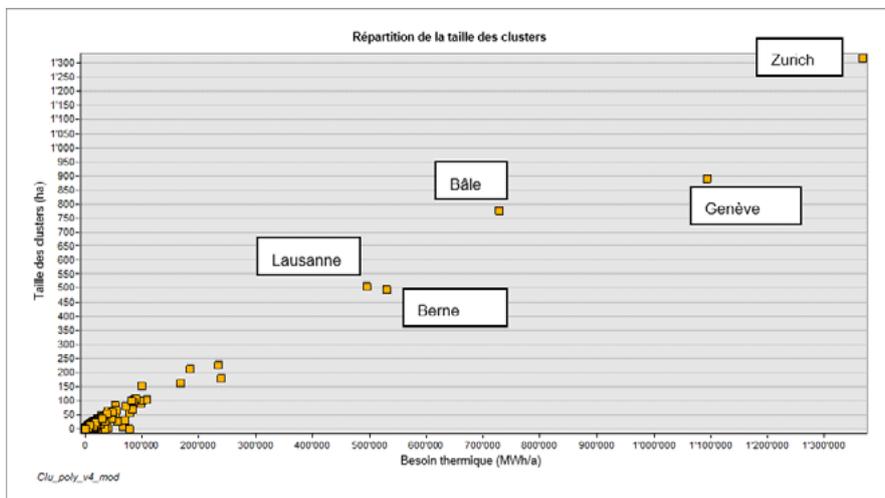


Figure 8: Répartition de la taille des clusters identifiés (besoins en chaleur par an et par surface)

Lorsqu'un cluster présente un besoin en chaleur supérieur à 100 GWh par an, nous parlons d'un mégacuster.

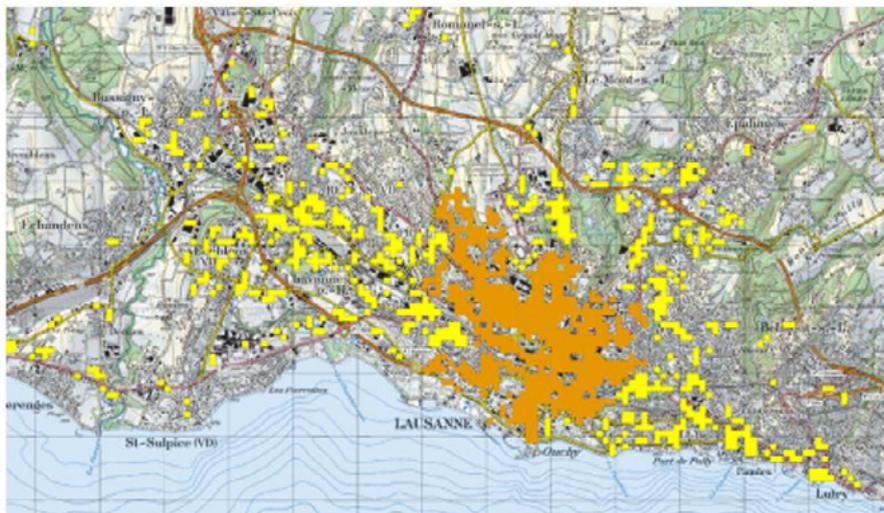


Figure 9: Exemple d'un mégacuster à Lausanne (hectares colorés en orange)

### 3.3.2 Potentiel du chauffage de proximité et à distance en

#### Suisse

La somme des clusters obtenus permet de déduire le potentiel de «chauffage à distance en Suisse» recherché. L'ensemble des besoins en chaleur saisis dans le webSIG étaient d'env. 85 TWh/a en 2010.

En intégrant l'hypothèse de la réduction des besoins en chaleur de 50% dans les habitations et les services, ainsi que de 20% dans le secteur de l'industrie, ces besoins passeront à env. 45 TWh/a en 2050.

Selon la présente analyse de clusters, environ 17 TWh/a pourront être couverts avec le chauffage à distance, soit 38%.

**En 2050, 38% des besoins thermiques de la Suisse pourront être approvisionnés de manière rentable au moyen de réseaux de chauffage de proximité et à distance.**

Besoins en chaleur pour le chauffage et l'eau chaude en 2010	85 TWh
Besoins en chaleur pour le chauffage et l'eau chaude en 2050	45 TWh
Besoins en chaleur des régions potentielles de réseaux de chauffage de proximité et à distance en 2050	17 TWh

Tableau 1: Evolution des besoins de la Suisse dans le modèle et des besoins potentiels des régions de chauffage de proximité et à distance identifiées.

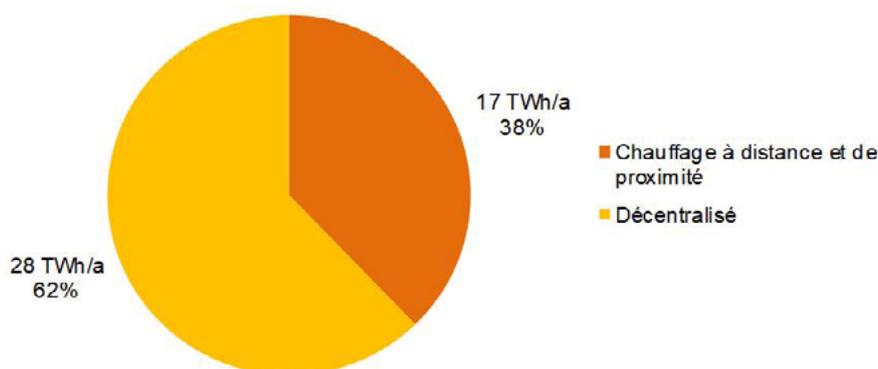


Figure 10: Part possible du chauffage de proximité et à distance en Suisse en 2050

**À l'échelle européenne, la part du chauffage à distance en Suisse est faible**

Avec une part de 38%, le potentiel identifié n'est pas élevé en comparaison internationale. Dans les pays nordiques, tels que le Danemark ou la Suède, la part est d'ores et déjà beaucoup élevée, comme en témoigne le Tableau 2.

<b>Pays (référence, valeur en pourcentage)</b>	<b>Part du chauffage à distance en 2010</b>
<i>Suisse (bâtiments résidentiels)</i>	4 %
<i>Allemagne (logements)</i>	14 %
<i>Autriche (logements)</i>	21 %
<i>Danemark (bâtiments)</i>	50 %

Tableau 2: Etat de la distribution de chauffage à distance en 2010 en comparaison euro-péenne.

## 4. Chauffages à distance alimentés par des énergies renouvelables

### 4.1 Méthodologie

Après avoir évalué le potentiel de chaleur des chauffages à distance et de proximité, ce chapitre traite de l'identification des sources d'énergie renouvelable pouvant alimenter les zones de chauffage de proximité et à distance. Seules les sources qui sont déjà utilisées avec succès et de manière rentable avec des technologies éprouvées ont été prises en considération. La géothermie profonde, dont la technologie doit encore être perfectionnée, constitue une exception.

**Référencement géographique des sources d'énergie renouvelable liées à une zone géographique.**

En principe, il convient de faire une distinction entre les sources d'énergie liées à une zone géographique et celles qui ne sont pas liées à une zone géographique. Une source d'énergie liée signifie qu'elle n'est disponible que localement et ne peut être utilisée qu'à proximité du site. C'est par exemple le cas des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM). La chaleur produite sur le site ne peut être distribuée et utilisée que de manière limitée avec des conduites. En revanche, le bois-énergie peut être transporté partout et n'est donc pas lié à une zone géographique. La liste suivante montre les sources d'énergie renouvelable analysées selon deux catégories:

#### **Sources d'énergie renouvelable liées à une zone géographique**

1. Usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)
2. Rejets thermiques issus d'exploitations industrielles et d'installations de refroidissement
3. Stations d'épuration des eaux usées (STEP)
4. Eaux souterraines
5. Eaux de surface

#### **Sources d'énergie renouvelable non liées à une zone géographique**

6. Bois-énergie
7. Géothermie profonde

Les sources d'énergie liées à une zone géographique sont toutes disponibles sous forme de données SIG géoréférencées.

**Les potentiels sont combinés dans le cadre de recherches documentaires.**

Outre la répartition géographique des sources d'énergie, leur potentiel joue également un rôle important pour leur attribution ultérieure aux zones de chauffage de proximité et à distance. Cela permet d'éviter des attributions irréalistes, car trop élevées. Les potentiels des systèmes évoqués sont abordés ci-après. Ils ont été déterminés par le biais de recherches documentaires et complétés, si besoin, avec nos propres estimations.

## 4.2 Sources d'énergie renouvelable liées à une zone géographique

### 4.2.1 Usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)

Outre la clarification du potentiel, la question de la part renouvelable dans les déchets joue un rôle central dans notre analyse. Dans l'étude (9) de 1993, la part en énergie renouvelable des déchets urbains de 32 communes a été analysée. Les parts renouvelables calculées par rapport à leur pouvoir calorifique se décomposent comme suit:

- 29% de papier et de carton
- 14% de produits naturels tels que le bois
- 50% des rejets thermiques des UIOM sont considérés comme renouvelables en raison de la composition des déchets.
- 7% de déchets compostables

**50% des rejets thermiques des UIOM sont considérés comme renouvelables en raison de la composition des déchets.**

Parallèlement aux déchets urbains, d'autres déchets sont également incinérés. Aucune donnée n'étant disponible sur ces déchets, la valeur calorifique de l'ensemble des déchets est considérée comme renouvelable à 50%.

Pour pouvoir évaluer le futur potentiel de chauffage à distance des UIOM, les hypothèses relatives à l'évolution des quantités de déchets jouent un rôle central. L'exemple de l'évolution de la quantité de déchets du canton de Zurich nous permet de distinguer différentes tendances en fonction des scénarios envisagés.

**Evolution de la quantité de déchets dans le canton de Zurich**  
Valeurs historiques et pronostics actuels

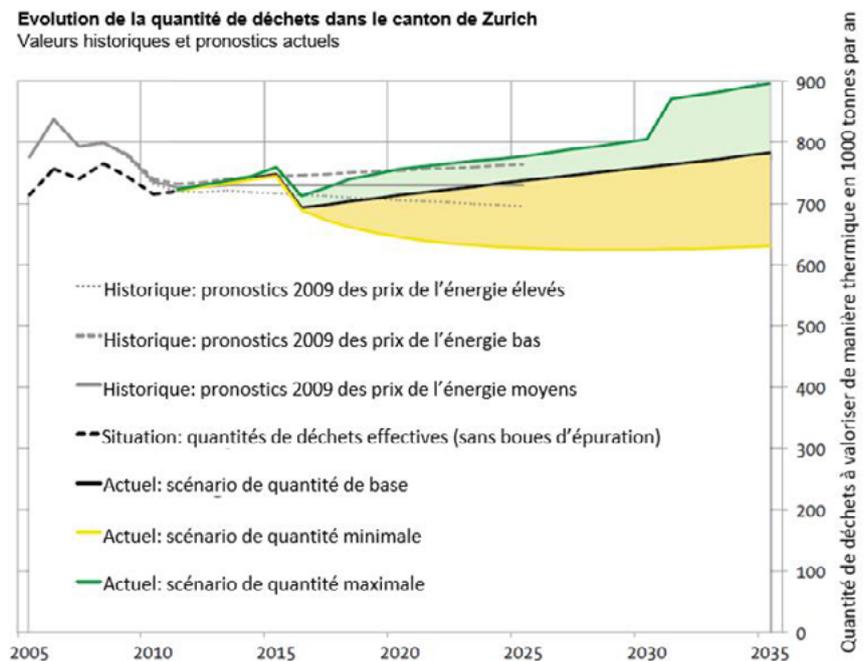


Figure 11: Evolution de la quantité de déchets dans le canton de Zurich (source (10))

L'évolution de la quantité de déchets est influencée par l'augmentation de la population, l'évolution conjoncturelle économique (PIB), mais aussi par les mesures politiques prises en matière de recyclage des déchets. Ainsi, si des matières plastiques et/ou des déchets biogènes<sup>2</sup> (voir étude de l'OFEV 2012) doivent être recyclés, cela a une influence décisive sur la valeur calorifique et la quantité de déchets et donc aussi sur le potentiel thermique.

### Quantité constante de déchets.

Dans le cadre de cette étude, nous partons du principe que la quantité de déchets reste constante. Nous supposons en effet que l'augmentation des déchets entraînée par l'augmentation de la population pourra être compensée par un meilleur processus de recyclage.

Chaque année, environ 3,7 millions de tonnes sont incinérées en Suisse, ce qui correspond à une quantité de chaleur de 11,9 TWh. Selon le papier de base sur la politique de l'énergie et des ressources des UIOM de Suisse (11), 2,8 TWh de chaleur ou de vapeur et 1,4 TWh d'électricité ont été vendus en 2010, ce qui correspondait à une efficacité énergétique nette (R1<sup>3</sup>) d'env. 55%.

Techniquement, il est possible d'améliorer considérablement l'efficacité énergétique. L'AWEL du canton de Zurich a réalisé un relevé reflétant l'état de la technique. Selon lui, l'efficacité énergétique nette des nouvelles installations se situe à 65%. Les meilleures installations actuelles atteignent même 80%.

Selon (11), une augmentation de l'efficacité énergétique nette de 55 à 80% sans consommation supplémentaire de combustibles permettrait de produire environ 1,1 TWh d'électricité ou 2,9 TWh de chaleur (ou une combinaison des deux).

Pour le potentiel de chaleur recherché, nous partons de cette éventuelle augmentation d'efficacité, que nous supposons en faveur de la chaleur à distance. Cela permettrait de disposer de 2,8 TWh de chaleur supplémentaires, ce qui conduit à un potentiel de chaleur total de 5,7 TWh/a. Pour résumer, les chiffres sont les suivants:

### Le potentiel de chaleur renouvelable des UIOM pourra passer de 2,8 à 5,7 TWh/an.

Quantité des déchets en Suisse en 2010	3.7 Mio to
Capacité thermique des déchets	12.0 TWh/a
Potentiel de chaleur des UIOM en 2010	2.8 TWh/a
<b>Potentiel de chaleur des UIOM à l'avenir</b>	<b>5.7 TWh/a</b>

<sup>2</sup> Le dernier relevé de l'OFEV sur la composition des ordures ménagères effectué en 2012 montre qu'environ 32% des ordures ménagères sont constitués de déchets biogènes. La moitié de ces déchets biogènes est majoritairement constituée de denrées alimentaires encore comestibles.

<sup>3</sup> L'efficacité énergétique nette est définie comme étant le rapport entre l'énergie nette produite dans l'installation (chaleur et électricité) et l'ensemble de l'énergie utilisable pour la production de vapeur, corrigée des pertes thermiques dues aux mâchefers et les pertes par rayonnement. Pour obtenir la description détaillée, voir (37).

## 4.2.2 Rejets thermiques issus de l'industrie

**L'utilisation des rejets thermiques dans l'industrie doit être analysée individuellement et de manière critique**

Lors des processus de production de l'industrie, des rejets thermiques peuvent être générés à différents niveaux de température. Si l'on part du principe que le processus est optimisé sur le plan thermique, on peut considérer n'importe quel rejet thermique produit sans utilisation supplémentaire d'énergie primaire comme renouvelable.

Les paramètres suivants sont toutefois décisifs pour savoir si les rejets thermiques peuvent être utilisés de manière pertinente:

- Le niveau de température des rejets thermiques permet de déterminer la façon dont ils peuvent être utilisés le plus judicieusement possible. La plage de température permet de produire de l'électricité par ORC<sup>4</sup> (température de rejets thermiques >150°C) et même d'utiliser les rejets thermiques comme source de chaleur par le biais de pompes à chaleur (température de rejets thermiques < 30°C).
- La disponibilité temporelle au cours de la journée et la quantité constante de déchets hebdomadaires et annuels jouent un rôle décisif dans la rentabilité de l'exploitation.
- Généralement, des durées de seulement cinq ans sont appliquées dans les calculs de rentabilité industriels. Par ailleurs, les interventions extérieures à la production ne sont généralement pas les bienvenues dans les processus et aucune garantie ne peut être donnée pour des livraisons de chaleur résiduelle à long terme.

Les points évoqués montrent que l'utilisation des rejets thermiques dans l'industrie doit être évaluée individuellement et de manière critique.

Le canton du Valais a effectué un relevé des sources de rejets thermiques sur le territoire du canton. Les données ont été relevées dans près de 200 exploitations industrielles et intégrées dans le SIG cantonal (Figure 12).

Le résultat a révélé une quantité totale de rejets thermiques d'environ 2'000 GWh/a, dont 1'500 GWh/a sont encore inutilisés. Le Tableau 3 montre la répartition des quantités de rejets thermiques au sein des différentes possibilités d'utilisation ou niveaux de température.

---

<sup>4</sup> Principe ORC (Organic Rankine Cycle): exploitation de turbines vapeur avec un autre fluide de travail que la vapeur d'eau. Ce principe est surtout utilisé pour produire de l'électricité à de faibles gradients de température.

<b>Utilisation possible</b>	<b>Niveau de température min. des rejets thermiques</b>	<b>Potentiel</b>
Production d'électricité OCR	150°C	16.5 GWh/a
Production de froid avec la technologie d'absorbeur	100°C	3.8 GWh/a
Chauffage à distance	85°C	604.3 GWh/a
Chauffage/eau chaude	60 / 65°C	16.3 GWh/a
Froid/chauffage à distance	10°C	940.3 GWh/a
<b>Total</b>		<b>1'581.2 GWh/a</b>

Tableau 3: Potentiel des rejets thermiques du Valais (source: (12))

Le canton du Vaud va mener un projet similaire. Aucune autre analyse systématique de ce type n'est disponible dans le restant de la Suisse.

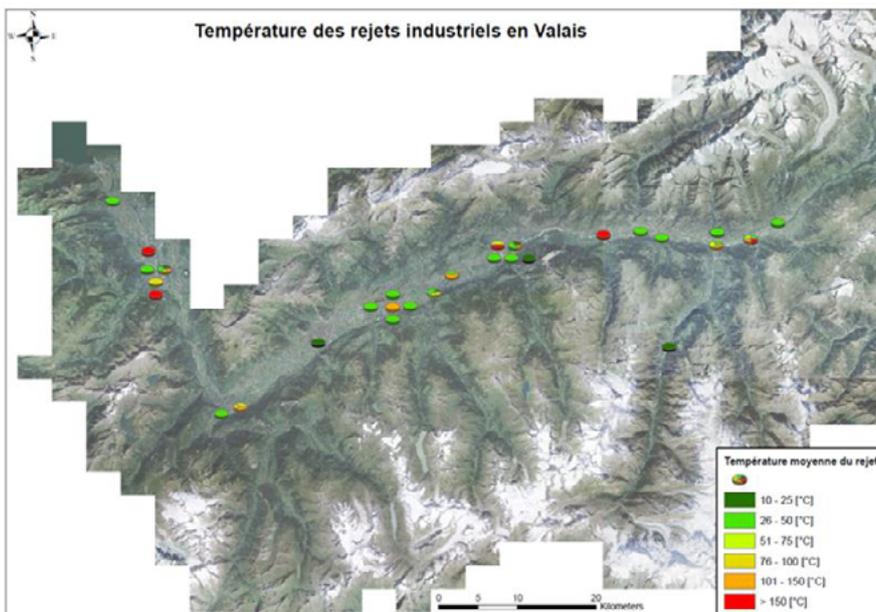


Figure 12: Niveaux de température des sources de rejets thermiques en Valais (source: CREM)

Peu d'études sont disponibles, que ce soit en Suisse ou à l'échelle internationale. L'étude la plus détaillée est celle du fournisseur d'énergie norvégien Enova datant de 2009. L'IFEU (Institut allemand pour la recherche sur l'énergie et l'environnement) d'Heidelberg a essayé d'évaluer le potentiel des rejets thermiques en Allemagne sur la base de cette étude et de deux autres travaux. Ils ont représenté le volume de rejets thermiques en pourcentage de la consommation d'énergie finale dans différentes branches (Tableau 4).

<b>Branche</b>	<b>Part RT &gt;140°C</b>	<b>Part RT 60-140°C</b>	<b>Part RT &gt;60°C</b>
Agroalimentaire	-	-	-
Textile/cuir	-	-	-
Papier/imprimerie	-	-	-
Fabrication du papier	-	-	-
Chimie/laboratoires pharma	5%	2.5%	7.5%
Ciment/béton	40%	20%	60%
Autres minéraux non ferreux	40%	20%	60%
Métal/fer	30%	15%	45%
Métaux non ferreux	30%	15%	45%
Métal/appareils	3%	1.5%	4.5%
Machines	3%	1.5%	4.5%
Autres industries	1%	0.5%	1.5%
Construction	-	-	-

Tableau 4: Rejets thermiques exprimés en pourcentage de la consommation d'énergie finale (source: (13))

Les parts de rejets thermiques mentionnées dans le Tableau 4 ont été transposées à la Suisse, afin d'obtenir une estimation approximative du potentiel total de rejets thermiques pour la Suisse malgré le manque de données de base.

La demande en énergie finale de l'industrie suisse pour le chauffage et l'électricité s'élevaient à environ 47,5 TWh en 2010 selon (14). Près de 54% ont été utilisés pour la chaleur de processus, ce qui correspond à 25 TWh. Il en résulte une quantité potentielle de rejets thermiques avec  $T_{\text{rejets thermiques}} > 60^\circ\text{C}$  d'environ 3,6 TWh/a (comparaison Valais: 640 GWh/a).

Une part beaucoup plus importante de rejets thermiques devrait être disponible à des températures comprises entre  $20^\circ\text{C}$  et  $60^\circ\text{C}$ . Des indications concrètes ne peuvent pas être données pour le moment, car aucune analyse systématique sur le thème des rejets thermiques industriels n'est actuellement disponible pour la Suisse.

La quantité de rejets thermiques estimée doit donc être considérée avec la plus grande prudence. En effet, les bases issues de différentes études internationales ont été compilées sans être adaptées aux conditions de la Suisse. Il convient également de se demander si l'industrie agroalimentaire ne produit vraiment aucun rejet thermique notable. À notre connaissance, il existe en Suisse des entreprises agroalimentaires pouvant émettre des rejets thermiques pour des réseaux de chauffage à distance.

Outre la difficulté de déterminer la quantité de rejets thermiques en Suisse, les investigations se heurtent également au problème de localisation des sources de chaleur. Pour ce faire, il faudrait effectuer un relevé similaire à celui du Valais dans toute la Suisse et le représenter dans un SIG spécifique au chauffage à distance.

Selon nous, l'exemple du Plan directeur Energie de Lyss (voir (15)) montre combien cette analyse serait pertinente. Les rejets thermiques de l'entreprise GZM AG présentent une température de  $100^\circ\text{C}$  et suffiraient théoriquement à couvrir la moitié des besoins en chaleur de chauffage de la ville de Lyss. Le potentiel a seulement été identifié dans le cadre du relevé systématique des rejets thermiques pour les travaux effectués lors de l'élaboration du plan directeur.

Au vu de l'ampleur des données, il n'a pas été possible, dans le cadre de cette étude, d'établir une représentation et une quantification géoréférencées rationnelles des sources de rejets thermiques. Aucune attribution n'a donc eu lieu dans le chapitre 5.

**Seule une estimation approximative est possible faute de données suffisantes.**

**Il est souhaitable d'effectuer un relevé à l'échelle de la Suisse des quantités de rejets thermiques et de leur localisation.**

**Prélèvement de la chaleur présente dans les eaux usées traitées.**

**Une attribution géoréférencée des rejets thermiques industriels n'est pas possible actuellement.**

### 4.2.3 Stations d'épuration des eaux usées (STEP)

Avec les eaux usées provenant des foyers, des bureaux, de l'industrie et de l'artisanat, d'énormes quantités de chaleur sont perdues dans les canalisations sans être exploitées, constituant une charge pour les cours d'eau naturels. Ces rejets thermiques peuvent toutefois être récupérés à l'aide d'échangeurs de chaleur et utilisés à des fins de chauffage.

En principe, la chaleur peut être prélevée des eaux usées avant la STEP (eaux non traitées) ou après la STEP (eaux traitées). Nous analyserons dans cette étude l'utilisation des rejets thermiques provenant d'eaux usées traitées après la STEP (Figure 13). Le prélèvement de chaleur s'effectue alors sans problème, car le processus d'épuration n'est pas affecté et une grande quantité d'eau est acheminée dans des réseaux de conduites, ce qui est particulièrement intéressant pour les grandes installations de chauffage.

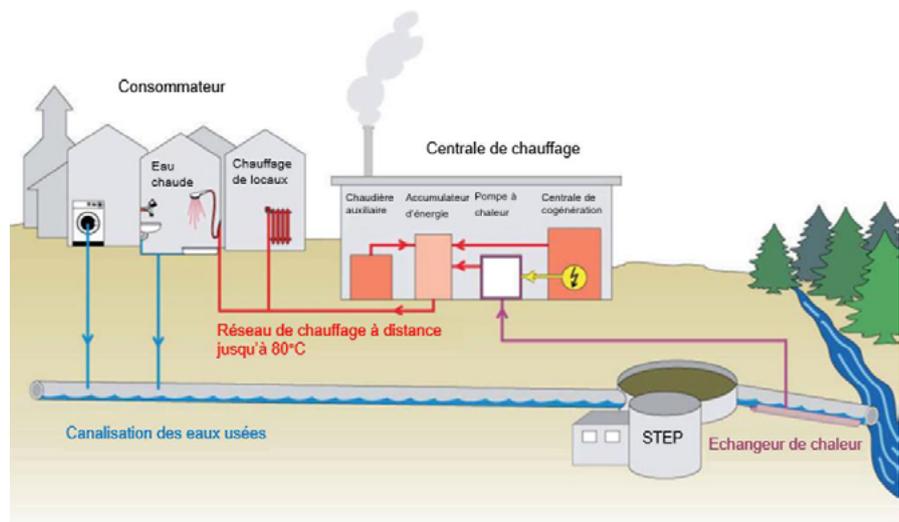


Figure 13: Principe de l'utilisation de la chaleur issue des eaux usées traitées (16)

#### L'évolution de la quantité d'eaux usées est pertinente

Le potentiel doit tenir compte de l'évolution future de la quantité d'eaux usées. Des informations à ce sujet sont par ailleurs disponibles dans le rapport Assainissement 2025 en Suisse publié par l'EAWAG (17).

La répartition des sources d'eaux usées est la suivante:

- 15% d'eau de pluie
- 40% d'eau claire parasite<sup>5</sup>
- 45% d'eau provenant des foyers et de l'industrie

• <sup>5</sup> Eau en mouvement constant provenant des fontaines et des eaux souterraines, qui s'infiltrent dans les canalisations.

La part des foyers et de l'industrie connaît une augmentation du fait de la croissance de la population. On table sur une augmentation de 15% par rapport à aujourd'hui, soit un nombre d'habitants de 9 millions.

En contrepartie, des économies seront réalisées dans les foyers et l'industrie grâce aux nouvelles technologies et aux appareils à basse consommation d'eau. Mais elles sont considérées comme relativement faibles.

D'autres économies sont attendues au niveau des eaux claires parasites. En effet, il existe désormais une obligation légale de réduire le taux d'eau claire parasite au niveau de la Confédération. Mais là aussi, les économies sont considérées comme minimes.

Ces informations ne permettent pas de dégager une tendance claire de l'évolution de la quantité d'eaux usées. Nous partons donc du principe qu'elle restera constante. Les quantités d'eaux usées issues des statistiques (18) de 2007 constituent le fondement de notre évaluation du potentiel thermique. Pour déterminer le potentiel de chaleur, nous prenons en compte les STEP de la catégorie 1 à 3. Il s'agit des STEP de grande taille à partir de 10'000 équivalents-habitants<sup>6</sup> (EH). Au total, nous avons comptabilisé 296 installations, dont la répartition est représentée dans Figure 14.

**Hypothèse fondée sur des quantités d'eaux usées constantes.**



Figure 14: Répartition des STEP de plus de 10'000 EH en Suisse. La taille des symboles est proportionnelle au nombre de EH

• <sup>6</sup> La conversion en équivalents-habitants permet d'obtenir une valeur de référence de la charge polluante dans la gestion des eaux.

Un volume de débit journalier moyen a d'abord été déterminé pour chaque STEP afin de pouvoir définir les quantités de rejets thermiques disponibles. Ce volume moyen a été calculé à partir des débits journaliers calculés durant la saison sèche, entre octobre et juin, afin de ne pas surévaluer les données.

La moyenne annuelle de la température des eaux usées de toutes les STEP est de 13,5 °C. En hiver, nous partons du principe que la température perd 2 kelvins, passant ainsi à 11,5°C. En cas de récupération maximale de chaleur via des pompes à chaleur, les eaux usées sont re-froidies de 6,5 kelvins, passant à 5°C.

Le débit journalier moyen de toutes les STEP ramené sur un an et refroidi de 6,5 kelvins permet d'obtenir le potentiel de chaleur théorique, que des installations de pompes à chaleur peuvent produire avec un COP de 4,5 (voir Figure 15). Selon nos estimations, le potentiel thermique obtenu grâce à des pompes à chaleur installées dans les STEP se situe à envi-ron 13,9 TWh/a.

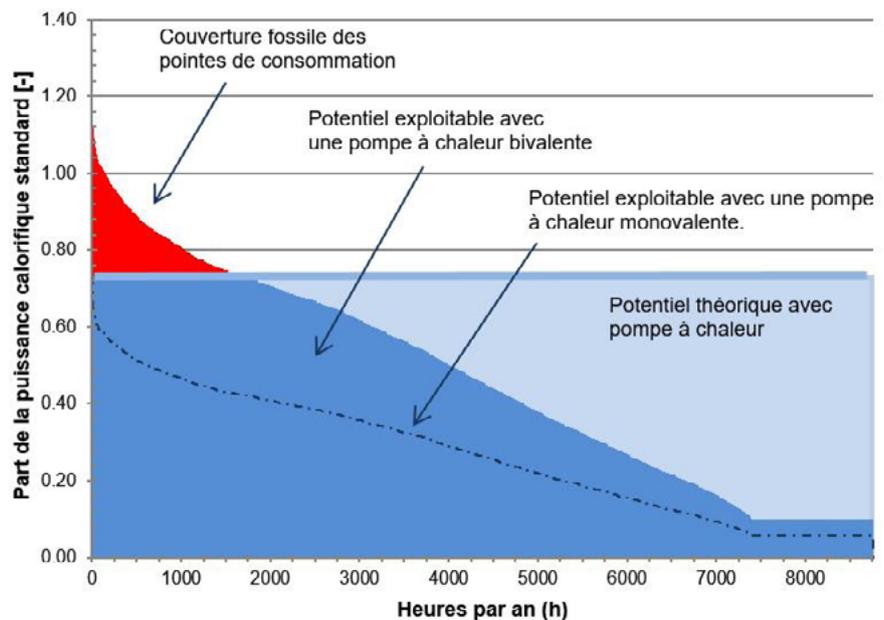


Figure 15: Potentiel de chaleur théorique et exploitable

Pour calculer le potentiel, nous partons d'une production de chaleur bivalente. Bivalente signifie que la pompe à chaleur ne fournit pas toute la puissance de chauffage requise. Durant les jours les plus froids, la pompe à chaleur est complétée par une couverture fossile des pointes de consommation (Figure 15, zone rouge). Les installations sont conçues de telle manière qu'environ 90% de la production d'énergie est assurée par la pompe à chaleur et 10% par l'énergie fossile.

La couverture des pointes de consommation permet également d'obtenir des températures de départ plus élevées pour l'eau de chauffage que celles qui auraient été fournies par des pompes à chaleur. De plus, comme la pompe ne doit fournir qu'une partie de la puissance de chauffage, sa taille est plus réduite qu'en mode monovalent, diminuant les coûts d'investissement.

Dans le cas d'une utilisation complète du potentiel théorique des STEP avec des installations bivalentes, une quantité de chaleur **d'environ 7,7 TWh/a<sup>7</sup>** pourrait être exploitée.

#### 4.2.4 Eaux souterraines

Les eaux souterraines constituent une source d'énergie idéale, lorsque la source ne doit pas seulement être chauffée, mais également refroidie. La température est d'environ 10°C tout au long de l'année. Elle est donc supérieure aux eaux de surface et à l'air extérieur durant les périodes froides (voir Figure 16). Une grande épaisseur<sup>8</sup> des aquifères et une perméabilité élevée des sols créent de bonnes conditions pour l'utilisation d'eaux souterraines.

**Aucune étude de potentiels n'est connue à l'échelle de la Suisse.**

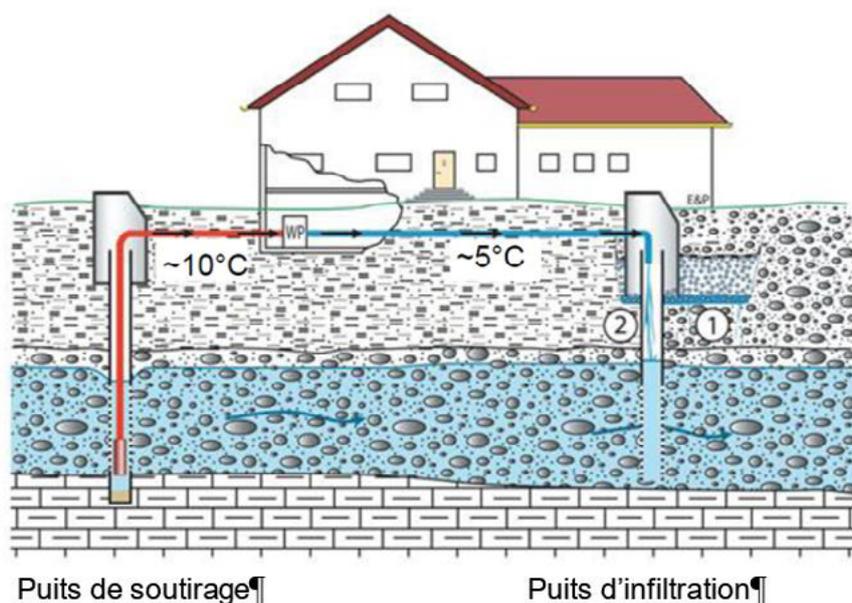


Figure 16: Schéma de principe de l'utilisation des eaux souterraines (source: Eberhard und Partner AG)

Même lorsque les nappes phréatiques sont suffisantes, il existe des restrictions. Par exemple, l'eau refroidie, qui est réacheminée dans la nappe phréatique et se répand avec l'écoulement souterrain, forme des pa-naches thermiques froids, qui peuvent influencer des utilisations voisines et réduire le potentiel (Figure 17).

<sup>7</sup> Ce potentiel de 7,7 TWh/a comprend le profil des besoins thermiques pour le chauffage et l'eau chaude. Cela signifie qu'une plus faible quantité de chaleur peut être utilisée en été qu'en hiver. Les besoins en énergie de ruban sont donc plus élevés.

<sup>8</sup> Epaisseur de la couche aquifère.

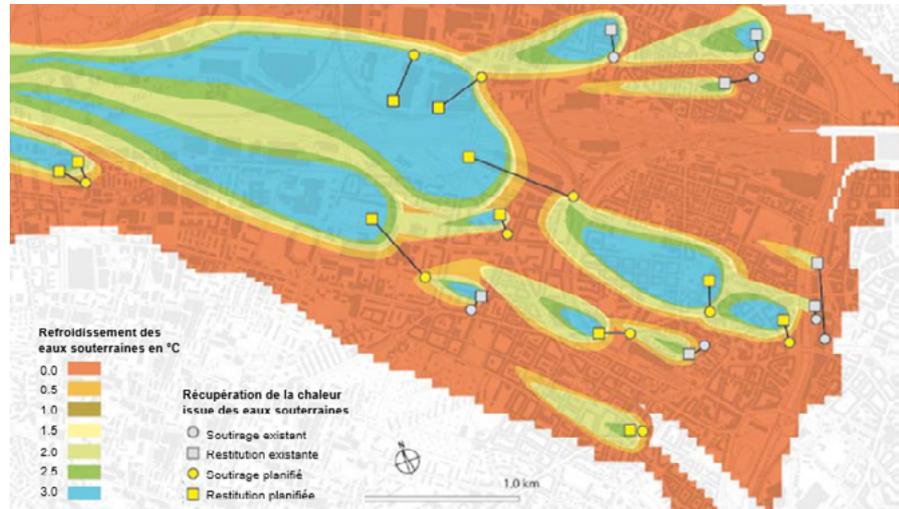


Figure 17: Existence de panaches thermiques froids dans le flux des eaux souterraines de la Limmat (source: (20))

D'autres restrictions s'appliquent lorsque des résidus toxiques sont présents dans le sol ou que l'existence de zones protégées interdit l'utilisation d'eaux souterraines. La qualité de l'eau peut également compliquer ou même rendre impossible l'utilisation de certaines eaux souterraines.

Aucune étude n'est connue à l'échelle de la Suisse sur le potentiel thermique des eaux souterraines. En revanche, nous disposons d'analyses locales, comme celle du potentiel thermique des eaux souterraines situées en fond de vallée près d'Ebnat-Kappel et Wattwil (19).

Dans le cadre de notre évaluation de potentiel, nous prenons seulement en compte des zones d'eaux souterraines faisant au moins 10 mètres d'épaisseur. Ceci permet de déterminer la zone propice à l'exploitation d'eaux souterraines. La zone déterminée s'étend sur une surface d'environ 1'233 km<sup>2</sup>, ce qui correspond à 3% de la Suisse.



Figure 18: Localisation des zones d'eaux souterraines faisant au moins 10 mètres d'épaisseur

L'étude d'Ebnat-Kappel a permis d'identifier un potentiel thermique d'environ 2,7 à 8,0 W/m<sup>2</sup> dans la zone d'eaux souterraines (ce qui correspond à un potentiel compris entre 5,3 et 16,0 kWh/m<sup>2</sup>a). La puissance d'extraction de chaleur a été calculée par analogie avec les corbeilles géothermiques. Une autre méthode consiste à partir du rendement des eaux souterraines et de la propagation des panaches thermiques froids: on dispose des puits de soutirage et des puits d'infiltration fictifs selon un modèle régulier, comme représenté dans la Figure 19.

**Exemples de calcul par analogie avec les corbeilles géothermiques ou les panaches thermiques froids.**

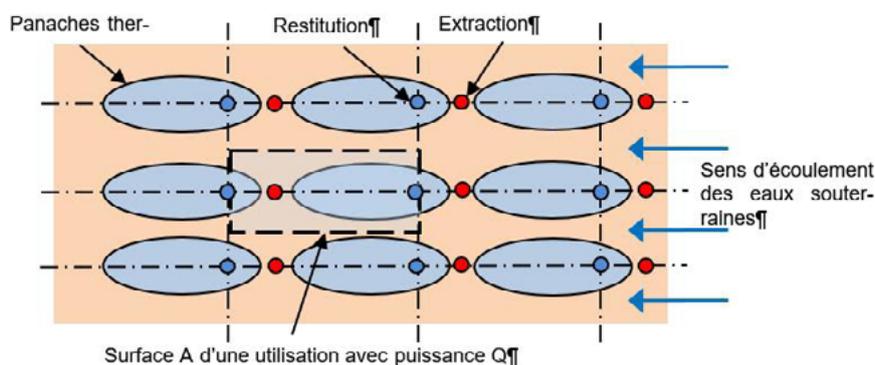


Figure 19: Configuration permettant de déterminer la puissance d'extraction spécifique théorique

La puissance d'extraction de l'eau est la même partout et les distances ont été fixées afin qu'elles ne s'influencent pas (calculs effectués, par exemple, selon le procédé développé par Ingerle en 1988). Cela permet d'évaluer la puissance d'extraction spécifique, qui selon les paramètres utilisés, se situe de 0,5 à 28 W/m<sup>2</sup>.

Les études réalisées dans la commune de Berne avec une méthode similaire et des paramètres réels par Kellerhals et Haefeli ont donné des valeurs allant de 0,8 à 2,1 W/m<sup>2</sup>, et même jusqu'à 13 W/m<sup>2</sup> à certains endroits.

Les fourchettes du potentiel de chaleur spécifique sont élevées et ne peuvent pas être spécifiées localement dans les zones d'eaux souterraines sans impliquer de lourdes dépenses faute de données suffisantes. Nous nous limitons donc à définir une valeur limite générale de 1,5 W/m<sup>2</sup> pour le potentiel de chaleur ambiante spécifique. Cette valeur s'applique à toutes les surfaces d'eaux souterraines prises en considération dans cette analyse et limite l'extraction de chaleur.

**Estimation prudente d'une puissance d'extraction moyenne**

Les eaux souterraines constituent une source de chaleur disponible tout au long de l'année. Nous obtenons une puissance de ruban d'environ 1'800 MW dans toute la Suisse. De manière analogue aux rejets thermiques des STEP, nous supposons que des installations de pompes à chaleur bivalentes seront utilisées avec les mêmes paramètres de configuration. Nous obtenons ainsi un potentiel de chaleur de 12 TWh/a.

### 4.2.5 Lacs

L'étude «Potentiel d'utilisation de l'énergie thermique émise par le Lac de Zurich» menée par le professeur Wuest de l'EAWAG pour la ville de Zurich a constitué la base de notre évaluation du potentiel de la chaleur ambiante issue des lacs (21). Selon lui, chaque lac devrait être analysé en tenant compte de ses caractéristiques propres. Mais la méthode évoquée dans son rapport peut être utilisée pour réaliser une première estimation du potentiel des autres lacs.

Le bilan thermique d'un grand lac peut être illustré à l'aide de la répartition des températures au cours des saisons. Dans la Figure 20, la répartition verticale des températures du lac des Quatre-Cantons au cours d'une année est représentée à titre d'exemple. La couche supérieure se réchauffe au printemps et en été, puis se refroidit à nouveau en automne et en hiver. L'échange thermique s'effectue principalement à la surface du lac. Le bilan thermique est le suivant:

$$Q_{tot} = Q_{ray\ dans} - Q_{ray\ de} - Q_{évap} - Q_{conv} - Q_{géoth} \quad [1]$$

Définitions:

- $Q_{tot}$  = taux d'échange thermique [W/m<sup>2</sup>]
- $Q_{ray\ dans}$  = rayonnement absorbé par l'eau [W/m<sup>2</sup>]
- $Q_{ray\ de}$  = rayonnement à ondes longues émis par l'eau [W/m<sup>2</sup>]
- $Q_{évap}$  = perte par évaporation, éven. gain par formation de rosée
- $Q_{conv}$  = perte par convection
- $Q_{géoth}$  = flux de chaleur sur le fond du lac

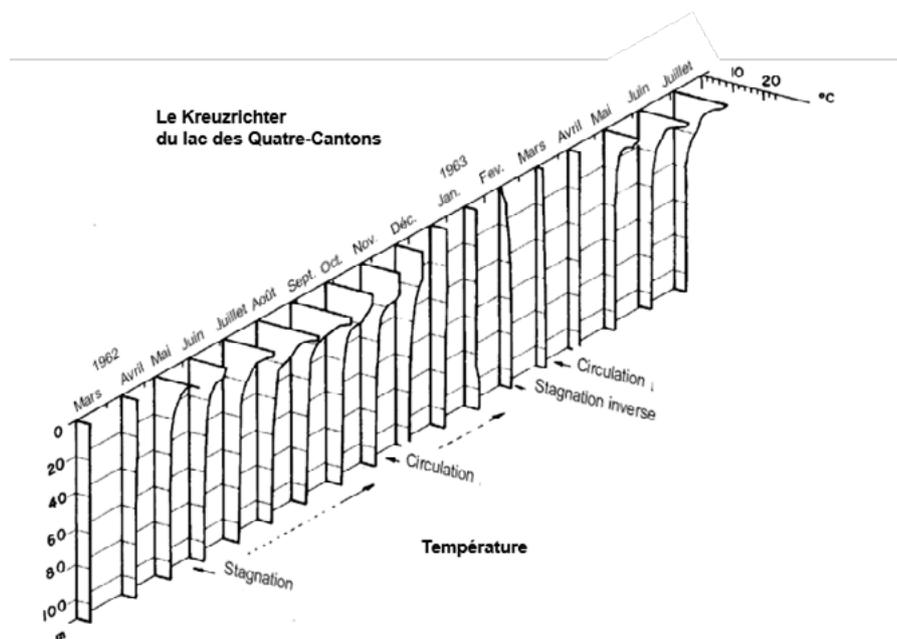


Figure 20: La répartition verticale des températures dans le lac des Quatre-Cantons au fil des saisons (Prof. H. Ambühl EAWAG)

Outre le flux de chaleur en surface, l'apport d'eau ( $Q_{conv}$ ) est le deuxième plus grand facteur d'influence sur le bilan thermique. Il influence de manière significative le bilan thermique, surtout dans les lacs subalpins, qui reçoivent une grande quantité d'eau fondue froide au printemps. Toutefois, l'influence de l'apport est relativement faible par rapport à celle de l'échange de chaleur en surface dans le lac de Zurich.

Le flux moyen de chaleur en surface est à peu égal durant les saisons chaudes (positif) et froides (négatifs). Il est d'environ  $70 \text{ W/m}^2$  pour le lac de Zurich. Une surface de  $89 \text{ km}^2$  offre une puissance moyenne considérable de  $6'230 \text{ MW}$ .

Une partie de ces flux de chaleur peut être exploitée à l'aide de pompes à chaleur. Ces installations prélèvent de l'eau dans le lac et la restituent refroidie. Les conditions à respecter, notamment la température de restitution, sont réglementées au niveau fédéral dans l'Ordonnance sur la protection des eaux. Il est écrit que le prélèvement de chaleur ne doit pas altérer, dans le plan d'eau, le régime naturel des températures, la répartition des nutriments ni les conditions de vie et de reproduction des organismes, en particulier dans la zone littorale. Compte tenu de ces exigences, l'étude de l'EAWAG conclut que le prélèvement de chaleur n'est pas critique tant que le volume du lac n'est pas refroidi massivement. Cela signifie que l'ensemble du volume du lac se refroidit de plus d'un kelvin durant la saison chaude.

La recommandation fait donc état d'un refroidissement maximal de  $0,5^\circ\text{C}$  pour l'ensemble du volume du lac. Ce refroidissement, appliqué à la saison froide sans prendre en compte les flux de chaleur en surface, etc., donne pour le lac de Zurich une exploitation maximale possible d'énergie thermique de  $2'200 \text{ GWh}$  par saison (avec un volume de  $3,9 \text{ km}^3$ ). Cette estimation a été appliquée de la même manière à d'autres lacs (le volume des lacs est tiré de (22) et (23)).

Les lacs frontaliers, dont seulement une partie est située en Suisse, ont été traités spécifiquement. Il s'agit des lacs Léman, de Constance, Majeur et de Lugano. Pour ces lacs, le potentiel a été adapté de manière proportionnelle à la surface lacustre située en Suisse. Seuls les lacs répondant aux critères suivants ont été pris en compte:

1. Altitude inférieure ou égale à  $1'000 \text{ m}$ . Ainsi, tous les lacs artificiels situés en montagne ont été exclus de l'analyse.
2. Le potentiel de la chaleur ambiante est supérieur à  $50 \text{ GWh/a}$ . Ainsi, tous les petits lacs ont été exclus de l'analyse.

Dans la figure suivante, tous les lacs qui satisfont aux exigences susmentionnées sont représentés en rouge.

**Bilan thermique principalement en surface.**

**Un prélèvement de chaleur de  $0,5 \text{ K}$  est considéré comme non problématique.**

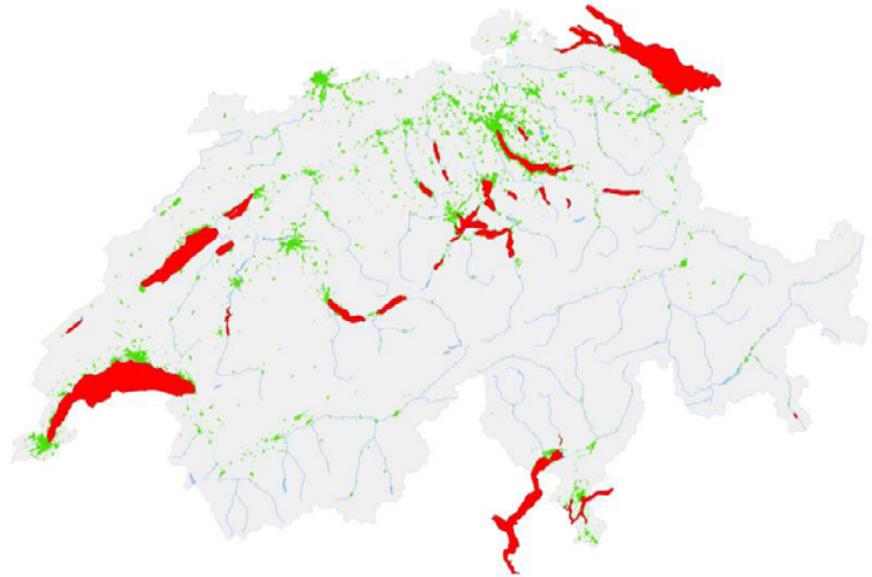


Figure 21: Les lacs, qui ont été pris en compte pour l'évaluation du potentiel thermique, sont colorés en rouge. Les zones de chauffage de proximité et à distance dé-terminés sont colorées en vert.

La chaleur ambiante définie est à nouveau exploitée avec des installations de pompe à chaleur bivalentes. Le potentiel thermique ainsi obtenu est de 97 TWh/a. Le diagramme suivant (Figure 22) montre la répartition du potentiel thermique des différents lacs analysés.

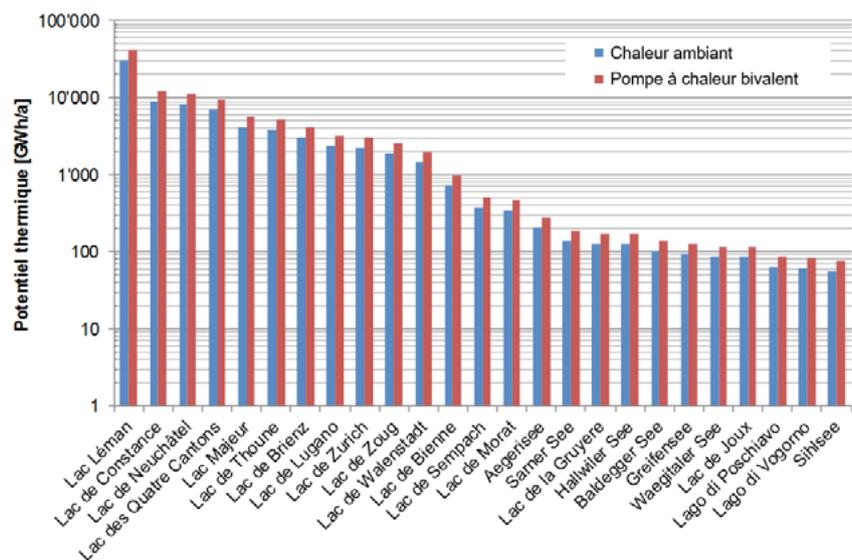


Figure 22: Potentiel des lacs sélectionnés. Les potentiels des lacs transfrontaliers ont été adaptés à la superficie du lac située en Suisse.

#### 4.2.6 Cours d'eau

Le bilan thermique des cours d'eau est plus complexe que celui des lacs. En principe, le même bilan thermique que celui représenté dans l'équation [1] s'applique par tronçon. Selon l'étude de Reinartz (24), 82% des échanges thermiques ont lieu en surface, 15% entre l'eau et le lit du cours d'eau et les 3% sont engendrés par d'autres processus (Figure 23).

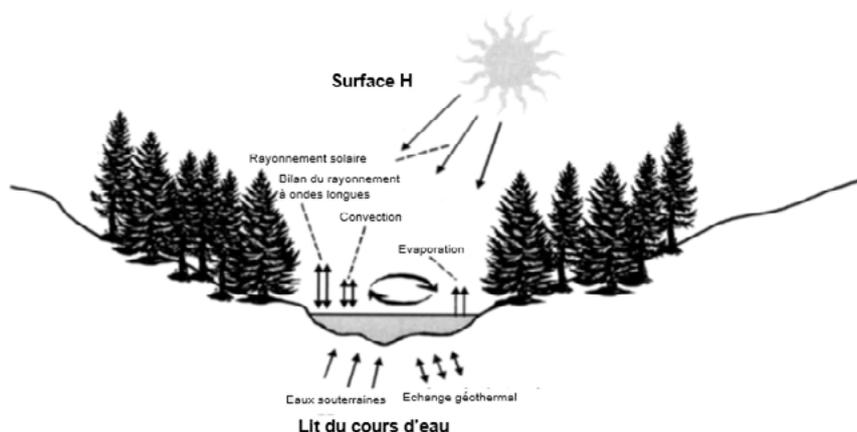


Figure 23: Processus d'échange de chaleur dans les cours d'eau (source (24)).

Avec cet échange continu d'énergie, la température de l'eau se modifie le long du cours d'eau. Tandis que la température de l'eau située dans les zones de la source correspond quasiment à celle de la nappe phréatique tout au long de l'année, elle augmente à mesure que le cours d'eau s'éloigne et se rapproche de la température de l'air locale moyenne journalière. Cela dépend surtout de l'augmentation de la surface de l'eau et donc du plus grand échange d'énergie avec l'atmosphère.

**Bilan thermique plus complexe et facteurs d'influence externes.**

Citons par exemple les variations de température le long du Main du 22 juillet 2006 représentées dans la Figure 24. On voit que la température n'augmente pas de manière linéaire et présente même des écarts. Ces variations peuvent avoir des causes humaines telles qu'un réchauffement engendré par des centrales thermiques, mais également naturelles, telles que l'apport d'un affluent.

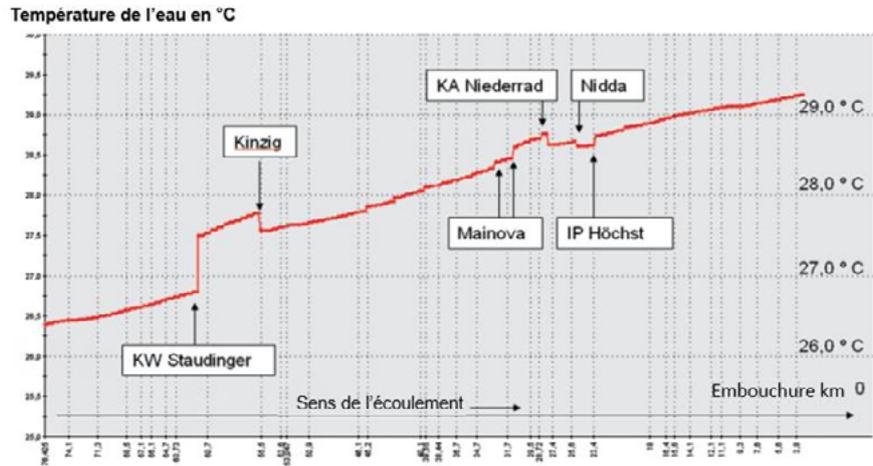


Figure 24: Profil de température du Main le 22 juillet 2006 (source (25))

### Refroidissement d'1 kelvin.

En ce qui concerne les influences humaines, elles sont régulées par des conditions-cadres légales relatives à l'utilisation de cours d'eau figurant dans la loi fédérale sur la protection des eaux (26). Il y est indiqué que l'apport ou le prélèvement de chaleur ne doit pas modifier la température la plus proche possible de l'état naturel du cours d'eau de plus de 3°C et celle des tronçons appartenant à la zone à truites de plus de 1,5°C ; la température de l'eau ne doit pas dépasser 25°C. Ces exigences sont applicables après un mélange homogène.

Pour pouvoir évaluer un potentiel, nous devons déterminer la puissance thermique d'une rivière. Le débit  $\dot{V}$  permet de calculer la puissance possible d'extraction de chaleur en un point précis du cours d'eau selon la formule suivante:

$$\dot{Q} = \dot{V} \rho c \Delta T \quad [2]$$

$\rho$  étant la densité,  $c$  la capacité thermique de l'eau et  $\Delta T$  le refroidissement par la pompe à chaleur. Les débits du cours d'eau  $\dot{V}$  sont calculés dans des stations hydrauliques placées le long des cours d'eau. Les données sont publiées par l'Office fédéral de l'environnement (27). Dans le cadre de la présente étude, nous avons opté pour les débits minimaux en hiver, qui limitent le potentiel de prélèvement de chaleur et sont donc tout à fait indiqués pour la détermination du potentiel.

### Refroidissement d'1 kelvin.

En ce qui concerne le taux de refroidissement  $\Delta T$ , nous avons opté pour une valeur de 1 kelvin. Nous respectons ainsi d'une part les prescriptions légales, y compris pour les tronçons appartenant à la zone à truites, et nous ne nous trouvons pas encore dans une plage de températures pouvant engendrer une influence notable. Selon l'EAWAG (21), cela serait le cas à partir de 1,6 kelvin. Un autre point concerne les températures peu élevées de l'eau qui peuvent survenir au cours de l'hiver. Le profil de la température moyenne journalière est représenté en guise d'exemple dans la Figure 25. La température la plus basse a été mesurée en 1971 à 1,8°C. L'extraction de puissance serait encore possible avec la valeur de refroidissement choisie.

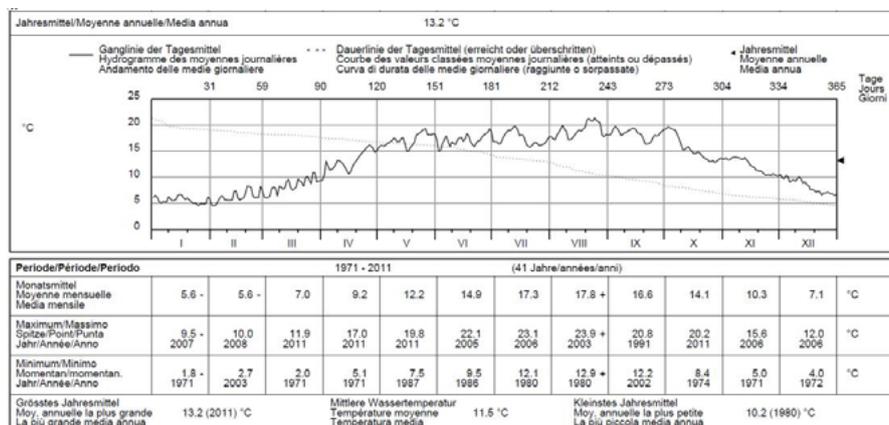


Figure 25: Variations des températures moyennes journalières de l'Air près de Hagneck (tiré de (27))

Dans le présent travail, nous nous sommes limités aux grands cours d'eau ayant un débit minimal de 10 m<sup>3</sup>/s (Figure 26). Nous avons donc surtout répertorié les zones les plus densément peuplées. Les cours d'eau peuvent approvisionner plusieurs zones de chauffage de proximité et à distance présentant un besoin thermique élevé.

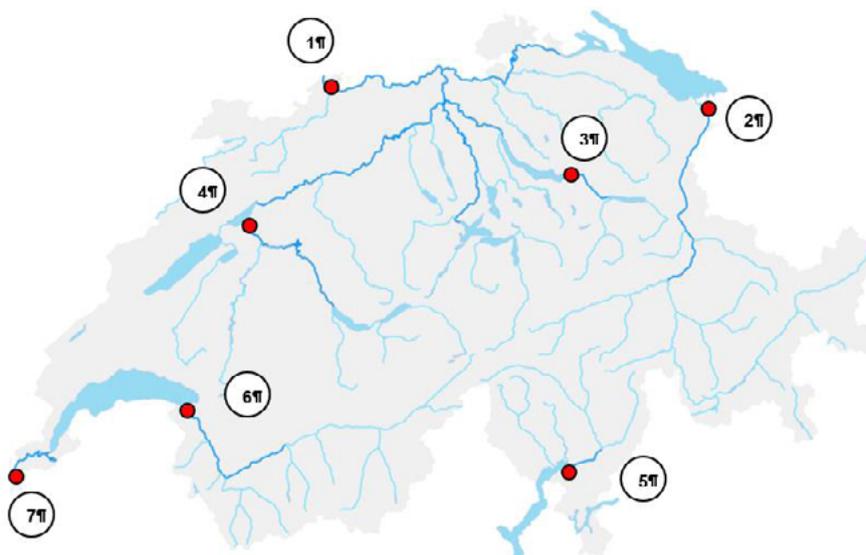


Figure 26: Les cours d'eau marqués en bleu foncé ont un débit min. supérieur à 10 m<sup>3</sup>/s. Les points rouges représentent les points du bilan évoqués dans le Tableau 5.

Le potentiel des cours d'eau a été apprécié selon les hypothèses suivantes:

1. Les cours d'eau sont refroidis d'1 kelvin de la source jusqu'à ce qu'ils quittent la Suisse.
2. Le point 1 ne s'applique pas pour les cours d'eau qui se déversent dans un lac. Dans ce cas-là, on considère qu'une régénération a lieu et que le cours d'eau peut être à nouveau refroidi d'1 kelvin à sa sortie du lac jusqu'à ce qu'il quitte la Suisse.

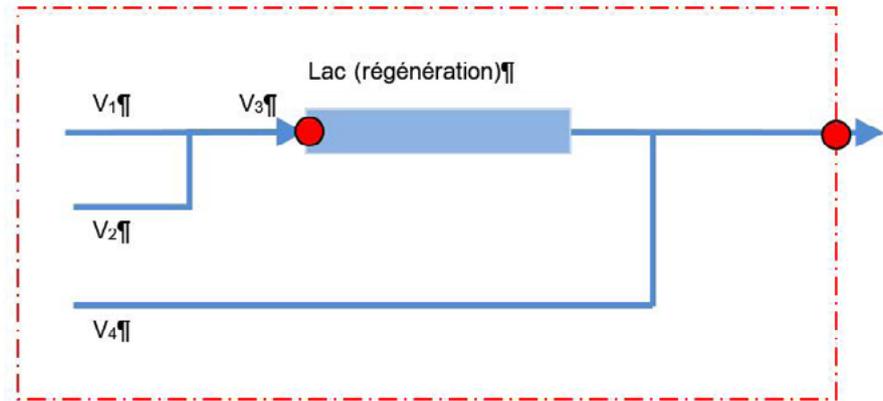


Figure 27: Principe de l'estimation du potentiel des cours d'eau en Suisse.

L'hypothèse 1 provient du fait que la plus grande partie de l'échange thermique a lieu à la surface et qu'on ne peut pas s'attendre à une régénération dans le cours normal de la rivière en hiver. Les régénérations engendrées par des influences humaines, notamment les centrales nucléaires de Mühleberg (600 MW de rejets thermiques) et Leibstadt (1'200 MW de rejets thermiques) sont négligeables.

La deuxième supposition est justifiée par le grand potentiel thermique des lacs. Le refroidissement des cours d'eau se régénère au détriment de la chaleur accumulée.

Le potentiel de chaleur a de nouveau été calculé en supposant que des installations de pompes à chaleur bivalentes pouvaient être utilisées. Nous obtenons ainsi un potentiel de chaleur de 23,1 TWh/a.

Nr	Cours d'eau	Station de mesure	Débit moyen [m3/s]	Débit minimal [m3/s]	Puis-sance [MW]	Potentiel thermique [GWh/a]
1	Rhin	Rheinfelden	1'154	569	2'380	15'700
2	Rhin	Diepoldsau	274	88	370	2'400
3	Limmat	Linth-Weesen, Biäsche	59	21	90	600
4	Aar	Hagneck	180	46	190	1'300
5	Ticino	Bellinzona	65	21	90	600
6	Le Rhône	Branson	145	41	170	1'100
7	La Rhône	Chancy, Aux Ripes	349	73	300	2'000
		<b>Total</b>			<b>3'590</b>	<b>23'700</b>

Tableau 5: Données de débit, puissance et potentiel thermique sur les points du bilan

### **4.3 Sources d'énergie renouvelable non liées à une zone géographique**

*Dans la présente analyse de potentiel, nous supposons que tous les clusters, qui n'ont pas un accès intéressant du point de vue de la rentabilité à des sources d'énergie appropriées et liées à une zone géographique, sont approvisionnés par les sources d'énergie bois et géothermie. L'utilisation de rejets thermiques industriels n'a pas été prise en compte, car une localisation géographique est nécessaire, avant de pouvoir les attribuer aux consommateurs.*

*Les potentiels ne sont évalués que brièvement ci-après. En effet, le traitement de la faisabilité technique ou la valorisation optimale de la valeur énergétique (production d'électricité, chaleur à haute température pour l'industrie et l'artisanat) dépasseraient le cadre de la présente analyse de potentiel.*

#### **4.3.1 Bois-énergie**

*La source d'énergie bois revêt une importance spéciale pour l'approvisionnement en énergie durable. Grâce aux températures élevées qui peuvent être atteintes avec des chauffages au bois, le bois est d'une grande valeur pour l'approvisionnement de processus industriels ou la production d'électricité et ne doit plus être utilisé à long terme pour la production de chauffage et/ou d'eau chaude. L'accent est mis sur l'utilisation de cette énergie dans des installations de couplage chaleurforce et dans la production de chaleur de processus pour l'industrie.*

**Le potentiel énergétique du bois est exploité de manière insuffisante en cas de seule production de chaleur ambiante.**

*Le potentiel à long terme du bois-énergie a été étudié à plusieurs reprises en Suisse. Une première étude a été réalisée par l'INFRAS (28), qui a déterminé le potentiel de l'année 2003 concernant l'exploitation énergétique de bois provenant des forêts, des champs et des haies, ainsi que de bois de récupération et du bois résiduel. Les chiffres ont été actualisés par la Haute école suisse d'agronomie (HESA) dans une étude de 2010 réalisée pour le compte de l'OFEN (29).*

*Selon cette étude, près de la moitié du potentiel du bois-énergie était déjà exploitée en 2005. Cela concernait 3,4 millions m<sup>3</sup> de bois composés à 64% de bois de forêt, 17% de bois de récupération, 16% de bois résiduel ainsi que 3% de pellets.*

*La tendance ne fait que croître. En 2012, 4 millions de m<sup>3</sup> de bois ont été utilisés à des fins énergétiques, la part de l'énergie-bois dans la consommation d'énergie finale dans l'ensemble de la Suisse s'élevant à 4,0%.*

*En ce qui concerne l'exploitation maximale possible du potentiel, les auteurs de l'HESA ont obtenu une valeur de 7,65 millions de m<sup>3</sup> de bois par an pouvant être exploités dans le futur à des fins énergétiques. Cela correspond à un potentiel thermique d'environ 20,5 TWh par an.*

**Le potentiel de bois-énergie de la Suisse est actuellement exploité aux 2/3.**

L'OFEV fait état dans une présentation actuelle d'un potentiel de bois-énergie durablement exploitable d'environ 6,0 millions de m<sup>3</sup> par an, soit 16,1 TWh (étape énergie finale). La quantité exploitée a été estimée à environ 10,7 TWh en 2008 (OFEV, 2012), le taux d'exploitation étant d'environ 65%.

### 4.3.2 Géothermie profonde

#### Systèmes de production d'électricité

La chaleur géothermique peut être utilisée selon le niveau de température pour la seule production de chauffage, la seule production d'électricité ou une production couplée chaleur/électricité. Deux types d'utilisation sont généralement distingués concernant la production potentielle d'électricité issue de la géothermie profonde:

- **Systèmes hydrothermaux:** utilisation d'aquifères profonds d'origine naturelle (couches de roches perméables) et
- **Systèmes pétrothermaux:** exploitation d'un sous-sol «sec» et «dense» par le biais d'une stimulation artificielle de la perméabilité disponible afin de pouvoir l'utiliser comme un échangeur de chaleur (Enhanced Geothermal Systems, EGS).

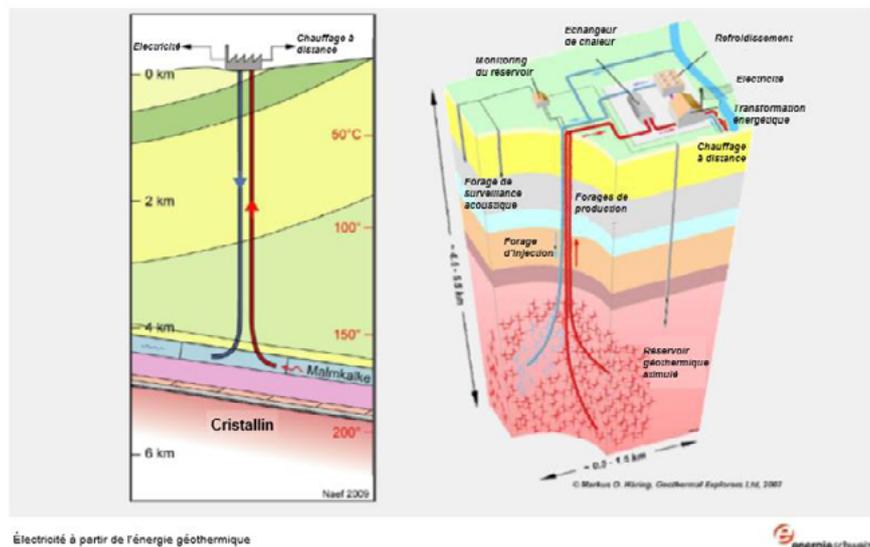


Figure 28: Principe du système hydrothermal et pétrothermal

Les représentants les plus connus de ces systèmes en Suisse sont le projet de Bâle, où le système pétrothermal devrait être réalisé, et le projet de St-Gall, où le système hydrothermal doit être mis en œuvre. Les chiffres relatifs à ces projets sont résumés dans le Tableau 6.

Site	Système	Puissance		Energie	
		Electrique	Thermique	Electrique	Thermique
Bâle	EGS	6 MW	17 MW	31 GWh/a	48 GWh/a
St-Gall	Hydrothermal	2.5-5 MW	17-20 MW	7-14 GWh/a	80-90 GWh/a

Tableau 6: Chiffres des deux plus grands projets géothermiques de Suisse.

Les deux systèmes sont conçus pour la production combinée de chaleur et d'électricité. Le spectre de puissance d'une installation comprenant deux à trois forages profonds est de 3 à 6 MWel. Les coûts d'investissement spécifiques se situent à 10 millions d'euros par MWel (3) et sont ainsi similaires à ceux des nouvelles centrales nucléaires. Les coûts de forage, qui représentent deux tiers des investissements, constituent le plus grand potentiel d'économie. Ces coûts diminueront également avec le développement du marché des forages profonds et l'établissement de la technologie et seront divisés par deux d'ici 2050. Cela se reflète également dans les coûts de production de l'électricité: actuellement compris entre 40 et 50 cts/kWh, ils devraient atteindre entre 10 et 20 cts/kWh à long terme.

**Systèmes principalement utilisés pour produire de l'électricité.**

Les sites possédant des réseaux de chauffage de proximité et à distance existants ou potentiels revêtent un intérêt particulier au vu de l'amélioration de l'utilisation de l'énergie et de la meilleure rentabilité. Ils présentent généralement un besoin en puissance thermique d'environ 20 MW.

Outre les investissements élevés, les vibrations formées par la stimulation hydraulique dans le sous-sol posent encore de grands problèmes. Elles ont même provoqué l'interruption du projet à Bâle. Le procédé doit être amélioré dans le futur afin d'éviter ce type de difficultés.

## **Des sondes géothermiques profondes pour la production de chaleur seule**

Dans le cas d'une utilisation de la chaleur sans production de courant, la situation se simplifie énormément: des forages d'environ 3'000 mètres de profondeur permettent d'obtenir des températures de sol de 90°C. La chaleur est produite à l'aide d'une sonde géothermique profonde (SGP) comme représentée dans la Figure 29.

**En principe, les sondes géothermiques profondes pour la production de chaleur seule sont indépendantes du site.**

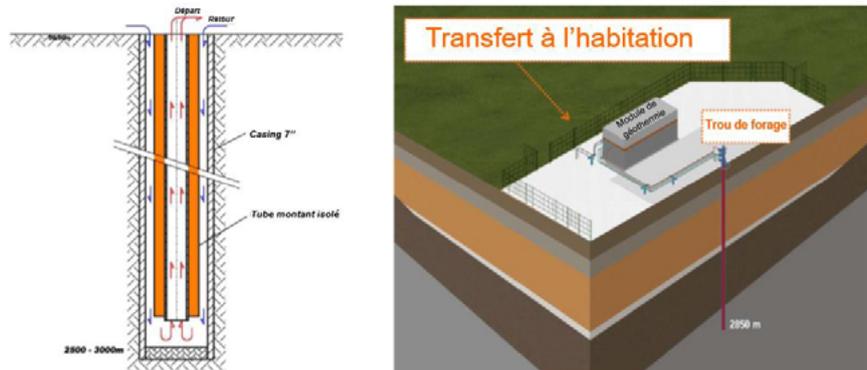


Figure 29: Principe des sondes géothermiques profondes (SGP)

Le grand avantage de ce système est l'indépendance géologique des sites. D'un point de vue géologique, cette technologie peut être utilisée partout en Suisse. La surface nécessaire est toutefois restrictive. 5'400 m<sup>2</sup> de surface sont en effet nécessaires pour réaliser un forage. Il est donc presque impossible d'utiliser la géothermie dans des zones densément peuplées.

Une SGP permet d'exploiter un système de chauffage avec une température de départ d'environ 50°C. Des puissances d'extraction d'environ 300 kW par forage sont possibles.

Le principal avantage des SGP est qu'aucune pompe à chaleur ne doit être utilisée. Seules des pompes de circulation d'eau d'une puissance d'environ 15 kW sont nécessaires. On obtient ainsi un COP d'environ 20 avec une puissance de chauffage de 250 à 300 kW.

L'inconvénient réside dans les investissements élevés du forage, qui sont actuellement compris entre CHF 850 et CHF 1'100 par mètre de forage. Le prix de revient de la chaleur s'élève à 30 cts/kWh. C'est près de deux fois plus élevé que les installations de pompes à chaleur traditionnelles actuelles.

**Technologie en principe disponible, développement et réduction des coûts nécessaires.**

En résumé, la technologie de production d'électricité et de chaleur via la géothermie existe, mais elle doit encore être perfectionnée pour pouvoir être utilisée dans toute la Suisse. Les investissements doivent également baisser afin que les installations puissent être compétitives face aux autres sources d'énergie renouvelable.

Nous nous appuyons sur les informations fournies par l'AXPO (30) pour déterminer le potentiel de chaleur. Le groupe Axpo évalue le potentiel théorique à long terme de la production d'électricité pour la Suisse à environ 17 TWh par an, ce qui correspondrait à une quantité de chaleur de 70 TWhth.

#### 4.4 Potentiel thermique des sources d'énergie renouvelable

Le potentiel de chaleur offert par les sources d'énergie renouvelable en Suisse est d'environ 240 TWh/a, ce qui représente plus de 5 fois les besoins de chaleur à long terme pour le chauffage des locaux et l'eau chaude et 14 fois les besoins des clusters de chauffage appropriés (17 TWh/a). Nous ne manquons donc en aucun cas de sources de chauffage renouvelable disponibles.

**L'offre de chaleur est plus de cinq fois supérieure aux besoins à venir.**

Le résumé suivant présente les potentiels identifiés des différentes sources d'énergie renouvelable et souligne l'importance cruciale des sources d'énergie renouvelable que sont les lacs suisses et la géothermie.

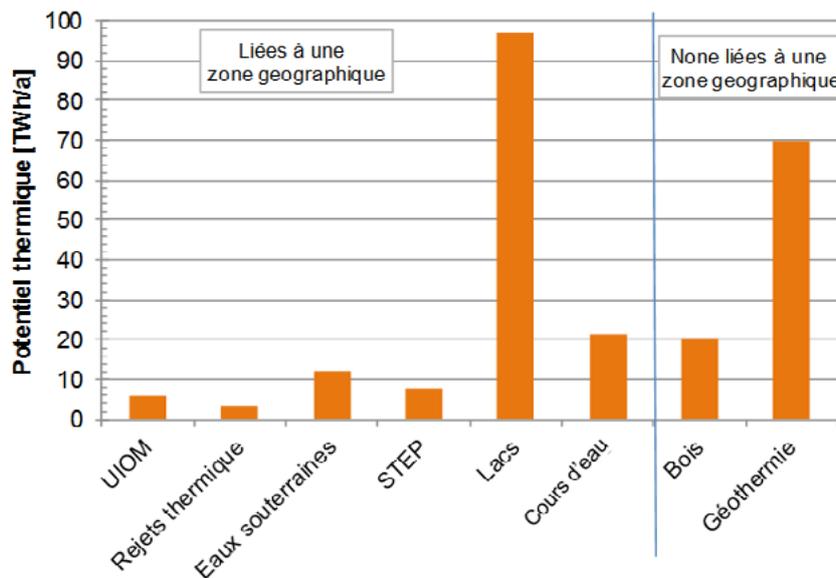


Figure 30: Potentiels thermiques des sources d'énergie considérées

<b>Source d'énergie</b>	<b>Potentiel thermique</b>
<i>KehriUsines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)</i>	<i>5.7 TWh/a</i>
<i>Rejets thermiques industriels</i>	<i>3.6 TWh/a</i>
<i>Eaux souterraines</i>	<i>12.2 TWh/a</i>
<i>Stations d'épuration des eaux usées (STEP)</i>	<i>7.7 TWh/a</i>
<i>Lacs</i>	<i>97.0 TWh/a</i>
<i>Cours d'eau</i>	<i>23.7 TWh/a</i>
<i>Bois</i>	<i>20.0 TWh/a</i>
<i>Géothermie</i>	<i>70.0 TWh/a</i>
<b>Total</b>	<b>239.9 TWh/a</b>

Tableau 7: Résumé des potentiels thermiques déterminés.

**Grand potentiel des eaux de surface.**

*Bien que les estimations effectuées au cours des analyses soient approximatives et qu'un certain nombre de questions, notamment techniques, doivent encore être clarifiées, l'évaluation montre, d'une part, l'énorme potentiel de la chaleur ambiante et, d'autre part, l'importance cruciale jusqu'ici négligée des eaux de surface.*

*Du fait de l'implantation fréquente de grandes villes suisses près des lacs et des grands cours d'eau, l'utilisation renforcée de ces potentiels ne semble pas irréaliste, surtout si l'on pense que ces sources d'énergie renouvelable permettent également, dans de nombreux cas, un refroidissement basé sur les énergies renouvelables.*

## 5. Approvisionnement futur des chauffages à distance et de proximité

### 5.1 Méthodologie

#### 5.1.1 Aperçu

Dans le chapitre 3, les futures zones de chauffages à distance et de proximité pertinentes ont été localisées et leur besoin thermique déterminé. Dans le chapitre 4, l'offre thermique présente sous la forme de sources d'énergie renouvelable pouvant potentiellement approvisionner ces régions a été déterminée. Toutes les données sont donc désormais disponibles pour attribuer la demande à l'offre en chauffage.

**Attribution automatique réalisée à l'aide du SIG compte tenu du potentiel et de la situation géographique.**

La tâche consiste à attribuer, de manière pertinente, l'une des nombreuses sources de chaleur aux quelque 5'500 clusters en tenant compte de la situation géographique et du potentiel disponible. Ce travail fastidieux a été effectué de façon automatisée à l'aide du système d'information géographique (SIG).

Pour ce faire, il a fallu développer des algorithmes d'attribution, qui ont été mis en œuvre avec les outils d'analyse fournis par le SIG et des scripts Python au sein de méthodes de calcul.

La procédure automatisée à l'aide de règles prédéterminées a des limites et ne peut pas être comparée à un plan directeur d'énergie local. Ainsi, nous n'avons pas pu aborder les stratégies d'approvisionnement locales, car leur prise en compte à l'échelle de la Suisse aurait dépassé le cadre du présent projet.

Les réseaux existants de chauffage de proximité et à distance constituent une autre restriction. Ils n'ont pas pu être pris en compte, car il n'existe aucun relevé complet et géoréférencé à l'échelle nationale.

Néanmoins, la méthode de calcul choisie est tout à fait suffisante pour déterminer l'exploitation des potentiels. En outre, elle permettra de réaliser à l'avenir des analyses de sensibilité à l'aide de la variation des hypothèses du modèle. Enfin, l'analyse pourra être étendue et approfondie grâce aux jalons posés ici.

#### 5.1.2 Priorités

Il convient, en premier lieu, de prioriser les sources d'énergie prises en compte pour l'attribution, car il arrive souvent que des clusters puissent être approvisionnés par différentes sources de chaleur. L'ordre de priorité a été fixé dans le Tableau 8 afin de garantir des attributions claires. La liste de priorités est née de réflexions sur la valeur de l'énergie (notamment sur le niveau de température), l'état de la technique ainsi que sur la rentabilité actuelle des systèmes. La valeur ajoutée d'une source d'énergie également appropriée au refroidissement n'est pas prise en compte. Ces installations combinées sont souvent d'ores et déjà intéressantes d'un point de vue économique, mais cet aspect ne pourra être pris en compte que lorsque le besoin en énergie de refroidissement sera disponible à l'hectare près.

**Attribution des priorités**

<b>Source d'énergie</b>	<b>Priorité</b>
<i>Usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)</i>	1
<i>Eaux souterraines</i>	2
<i>Stations d'épuration des eaux usées (STEP)</i>	3
<i>Lacs</i>	4
<i>Cours d'eau</i>	5
<i>Bois</i>	6
<i>Géothermie profonde</i>	7

Tableau 8: Liste de priorités prises en compte pour l'attribution

Ces priorités fixent l'ordre de l'attribution. Ce schéma a été mis en place en attribuant d'abord un cluster aux UIOM, puis aux eaux souterraines, etc. jusqu'à avoir traité toutes les sources d'énergie. Les clusters «raccordés» sont exclus de la répartition suivante.

### **5.1.3 Densité de raccordement radiale**

**Développement d'un algorithme permettant d'attribuer des sources de chaleur aux clusters selon des critères économiques.**

La principale difficulté rencontrée lors de l'attribution des clusters aux sources de chaleur était de déterminer des clusters dont le raccordement à la source de chaleur semble supportable du point de vue économique. Cela signifie que les coûts de la distribution de chaleur doivent être inférieurs à 4,5 cts/kWh.

En ce qui concerne la construction des conduites, le principe suivant s'applique: plus la conduite nécessaire à un raccordement est longue, plus elle sera chère et donc plus elle devra distribuer de chaleur pour être rentable. Dans la pratique, le rapport entre la chaleur vendue et la longueur de conduite nécessaire joue un rôle crucial. Cette «densité de raccordement» devrait être d'au moins 1,8 MWh par année et mètre de tracé ( $T_m$ ) de conduite (3).

L'algorithme d'attribution que nous avons développé est désormais basé sur ce concept de densité de raccordement. Dans la mesure où nous ne disposons pas encore d'une génération automatisée de conduites de chauffage à distance gérée de manière réaliste et que nous ne possédons donc pas encore de longueur de conduite réelle, nous nous sommes basés, pour simplifier les choses, sur la distance  $r$  du cluster par rapport à la source de chaleur. La demande en chaleur  $Q$  du cluster nous permet d'obtenir la densité radiale de raccordements  $\rho_A$  selon l'équation suivante:

$$\rho_A = \frac{Q}{r} \quad [3]$$

Ces dimensions sont représentées graphiquement dans la Figure 31 a) avec une source ponctuelle (UIOM/STEP).

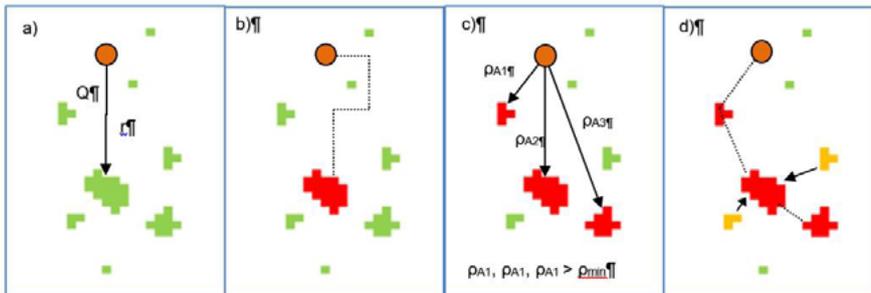


Figure 31: Illustration de l'algorithme d'attribution en cas de source ponctuelle. Pour de plus amples explications, voir le texte.

Cette densité radiale de raccordement nous sert désormais de critère de raccordement. Pour l'attribution, nous ne sélectionnons que les clusters, dont la densité radiale de raccordement dépasse le minimum fixé  $\rho_{min}$ .

La valeur minimale  $\rho_{min}$  de la densité radiale de raccordement ne peut pas être directement comparée à la densité minimale réelle de raccordement de 1,8 MWh/aTm. Cette valeur limite serait trop faible ou trop élevée selon les situations:

- La valeur serait trop faible si, par exemple, un seul cluster était disponible (Figure 31 a). Une conduite réelle est toujours plus longue que la distance à vol d'oiseau (Figure 31 b) prise en compte dans les calculs. La valeur minimale  $\rho_{min}$  devrait donc être supérieure à 1,8 MWh/aTm.
- Elle serait trop élevée si plusieurs clusters se trouvaient à proximité. Ils ne seraient pas exploités de manière individuelle, mais à la manière d'un collier de perles (voir Figure 31 c et d, la ligne en pointillée). La longueur des raccordements individuels est plus longue qu'un raccordement commun. La valeur minimale devrait donc être inférieure à 1,8 MWh/aTm.

Il convient donc de considérer la valeur de 1,8 MWh/aTm comme une valeur de référence et de trouver par variation par variation une valeur limite adaptée à l'algorithme. Dans le cas présent, nous avons défini la valeur limite à  $\rho_{\min}$  1,5 MWh/aTm.

L'algorithme d'attribution est divisé en deux étapes. Lors d'une première étape, l'attribution est effectuée à l'aide de l'algorithme suivant:

- Les densités de raccordement radiales  $\rho_A$  sont déterminées pour tous les clusters au sein d'une distance maximale autorisée  $r_{\max}$  de la source de chaleur (Figure 32).
- Tous les clusters dont les  $\rho_A$  dépassent la valeur minimale  $\rho_{\min}$  sont sélectionnés pour l'attribution.
- Nous sélectionnons autant de clusters que nécessaire, afin que le potentiel thermique de la source de chaleur soit pleinement exploité. Pour ce faire, nous avons d'abord sélectionné les clusters présentant la  $\rho_A$  la plus élevée, c'est-à-dire présentant la plus forte rentabilité (voir la Figure 31 b) clusters représentés en rouge).

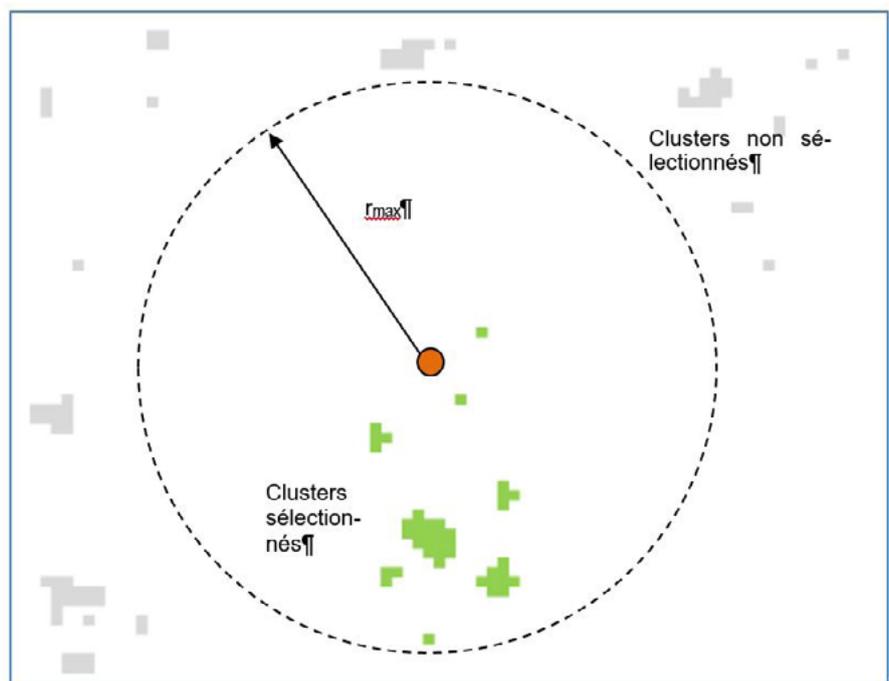


Figure 32: Limitation du nombre de clusters présentant une distance maximale  $r_{\max}$  par rapport à la source de chaleur. Les clusters rentrant en ligne de compte pour l'attribution sont marqués en vert clair.

La distance maximale autorisée a été introduite, afin d'éviter dans la pratique des conduites trop longues et donc irréalistes. Plus la distance est longue et plus la probabilité est élevée que des circonstances topographiques (montagnes, autoroutes, cours d'eau, etc.) entre un cluster et la source de chaleur augmente le coût d'une conduite ou la rendent même impossible à réaliser.

**Détermination des meilleurs clusters et densification ultérieure à partir de ces derniers**

Le potentiel de chaleur est exploité ou pas en fonction de la répartition de la taille des clusters. Dans la pratique, d'autres clusters pourraient être exploités à partir des régions exploitées de manière rentable. Cela se fait dans la deuxième étape de notre algorithme:

- En partant des clusters déterminés au cours de l'étape 1, tous les clusters situés à proximité et pouvant être raccordés à une densité de raccordement radiale supérieure à  $\rho_{\min}$  sont sélectionnés.
- Parmi ces clusters, nous en sélectionnons autant que nécessaire pour maximiser l'exploitation du potentiel thermique.

Dans la Figure 31 c), ces clusters supplémentaires sont représentés en orange. Un autre algorithme a été développé pour les eaux souterraines.

C'est là le cœur de notre algorithme. On peut l'utiliser lorsque la source de chaleur et un cluster sont séparés par une certaine distance. C'est le cas pour les sources de chaleur ponctuelles telles que les UIOM ou les STEP, mais également les sources de surface ou linéaires, telles que les lacs et les cours d'eau. Elles se prêtent généralement bien à la méthode de la densité de raccordement radiale. En ce qui concerne les rivières, il convient également de tenir compte de l'interdépendance des bras de fleuve (voir le chapitre suivant 5.2.5).

Nous avons dû procéder autrement pour les eaux souterraines. Pour des raisons de rentabilité, seuls les consommateurs de chaleur situés dans la zone d'eaux souterraines ont été pris en compte. Comme il n'y a en principe aucun problème de distance devant être résolu par l'algorithme, nous en avons développé un autre. Celui-ci est décrit dans le chapitre 5.2.2 Eaux souterraines.

**Un autre algorithme a été développé pour les eaux souterraines.**

Naturellement, un système de captage pourrait être monté en cas de très grandes nappes phréatiques. Les eaux souterraines seraient alors distribuées via un système de conduite. Nous y avons délibérément renoncé afin de ne pas surestimer le potentiel des eaux souterraines.

L'algorithme présenté pourrait être étendu et perfectionné afin de permettre une attribution encore plus réaliste, notamment en tenant compte des critères topologiques, qui ont une influence sur la construction des conduites, tels que la différence d'altitude. Autre remarque: le cluster pourrait être étendu de sorte à pouvoir approvisionner la zone de chauffage de proximité et à distance par plus d'une source de chaleur. De plus, la priorisation pourrait être affinée avec d'autres règles, basées sur l'expérience dans la construction de conduites.

Pour le moment, nous considérons l'algorithme comme suffisant pour la problématique étudiée.

## 5.2 Attribution des sources d'énergie localisées

### 5.2.1 Attribution des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM)

La distance maximale autorisée  $r_{max}$  pour l'attribution a été fixée à 5 km. La température élevée de la chaleur rend attractif de parcourir de grandes distances, comme le montre par exemple la conduite de 4,6 km qui va de l'UIOM de Gamsen à Lonza.

Pour illustrer l'attribution obtenue, les régions d'approvisionnement déterminées sont représentées dans la Figure 33 sur l'exemple de l'UIOM de Colombier.

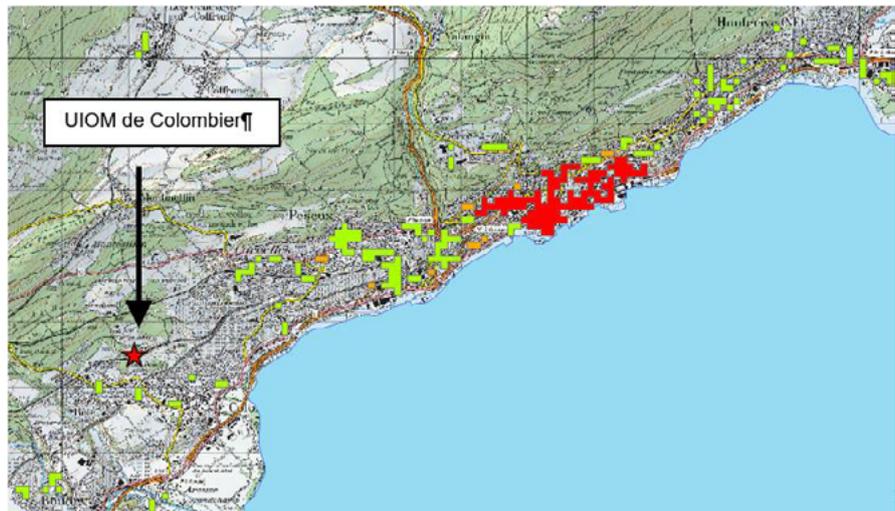


Figure 33: Exemple UIOM de Colombier: le cluster le plus intéressant à raccorder est re-présenté en rouge. Les clusters qui peuvent être raccordés en complément afin d'exploiter le potentiel sont marqués en orange. Les clusters verts ne sont pas attribués.

**Les UIOM possèdent un potentiel de rejets thermiques rentable non exploité.**

Les potentiels thermiques et les quantités de chaleur distribuables des UIOM sont représentés dans la Figure 34. Il apparaît que le potentiel de chaleur ne peut pas toujours être distribué dans son intégralité. La principale raison est liée au fait que les UIOM ont été construites en vue d'éliminer des déchets et ne sont donc pas situées à proximité immédiate des zones urbaines densément peuplées.

Du point de vue de la planification de l'énergie, les sites devront donc être repensés lors du remplacement des UIOM et une solution permettant une utilisation optimale de l'énergie devra être trouvée.

En partant du potentiel de chaleur supposé de 5,7 TWh/a, 3,6 TWh/a ont pu être attribués à des clusters. Ainsi, près de 21% du potentiel de chauffage à distance de 17 TWh/a peuvent être couverts.

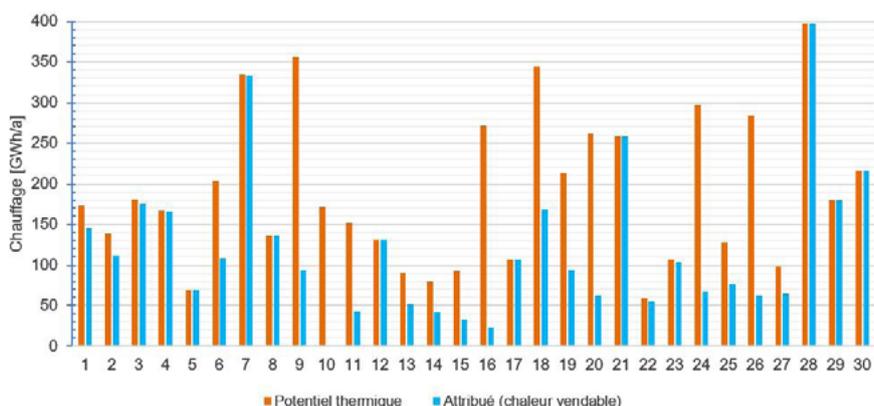


Figure 34: Potentiel thermique disponible (orange) et chaleur distribuée (bleu clair) des UIOM

Le graphique montre que le potentiel disponible n'est pas exploité dans certaines UIOM, tandis que la chaleur distribuée est limitée par la chaleur disponible dans les autres UIOM. Du point de vue énergétique, il conviendra donc de déplacer les déchets dans des installations dont le potentiel distribuable est plus important que la chaleur disponible.

## 5.2.2 Attribution des eaux souterraines

Contrairement aux autres sources de chaleur, l'attribution des eaux souterraines s'effectue selon un algorithme propre. La condition de base pour l'attribution est qu'un cluster se trouve dans la zone d'eaux souterraines. L'algorithme filtre donc en premier les clusters situés dans des zones d'eaux souterraines. Une liste de clusters est ensuite élaborée pour chaque zone d'eaux souterraines.

Ces listes sont élaborées en spécifiant le besoin en chaleur (du plus élevé au moins élevé) avec un algorithme d'attribution de sorte à exploiter au maximum le potentiel de chauffage de la zone d'eaux souterraines.

**Attribution des clusters les plus appropriés jusqu'à ce que le potentiel soit exploité.**

L'algorithme permet de s'assurer que les potentiels disponibles ne sont pas surexploités et que les clusters les plus appropriés sont attribués à une utilisation prioritaire.

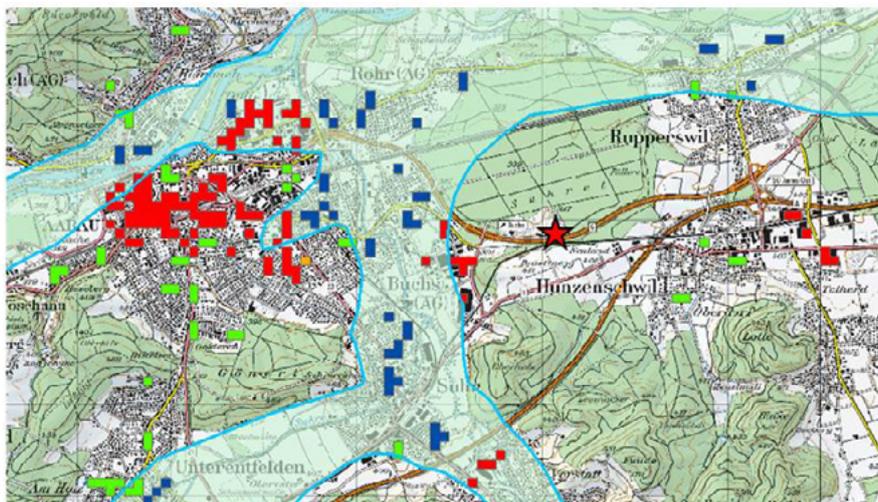


Figure 35: Attribution des eaux souterraines (en bleu) sur l'exemple d'Aarau. Les clusters représentés en rouge sont ceux qui ont été attribués à l'UIOM (étoile). Les clusters représentés en vert n'ont pu être attribués à aucun potentiel.

La condition de base, pour qu'un cluster se trouve sur une zone d'eaux souterraines, est difficile à remplir et ne doit pas impérativement s'appliquer, comme le montre l'exemple d'Aarau. Dans cette commune, il est prévu d'approvisionner des zones qui ne se trouvent pas dans la zone d'eaux souterraines. Cela s'explique par la disponibilité élevée et la capacité de refroidissement des eaux souterraines. Elles sont captées et distribuées du côté de l'afflux en amont de la ville.

De l'autre côté, une attribution stricte et donc prudente est tout à fait indiquée pour ne pas pronostiquer une distribution irréaliste de chaleur issue des eaux souterraines.

Sur le potentiel retenu de 12,2 TWh/a, 1,9 TWh/a a été attribué à des clusters, ce qui correspond à 11% du potentiel de chauffage à distance.

### 5.2.3 Attribution des stations d'épuration des eaux usées (STEP)

La distance maximale autorisée  $r_{max}$  pour l'attribution a été fixée à 1,5 km. Pour le reste, nous avons procédé comme pour les UIOM, c'est-à-dire que l'algorithme d'attribution a pu être repris sans modification.

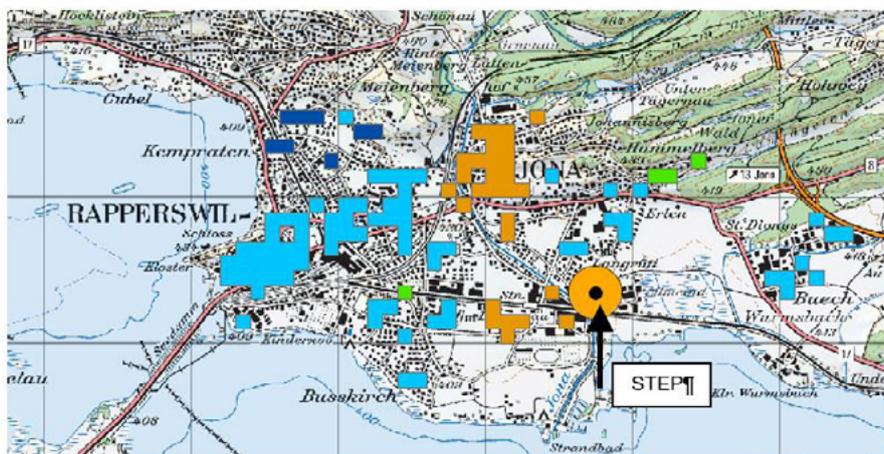


Figure 36: Exemple d'attribution de STEP: le cercle orange avec le point noir représente l'emplacement de la STEP. Les clusters qui lui ont été attribués sont colorés en orange (bleu clair = eaux souterraines; bleu foncé = lac, vert = non attribué).

Sur les 297 STEP prises en compte, 138 n'ont pas pu transmettre de chaleur aux clusters selon l'algorithme d'attribution. La situation est la même que pour les UIOM: certaines STEP sont situées dans des lieux défavorables au regard de l'utilisation des rejets thermiques. Cela explique également pourquoi seulement 1,9 TWh/a des 7,7 TWh/a exploitables ont pu être attribués.

Toutefois, il convient de préciser que des transferts d'approvisionnement peuvent se produire pour des raisons de rentabilité en cas d'analyse locale plus poussée. Ainsi, l'exploitation des eaux lacustres et fluviales pourra par exemple être privilégiée à celle des rejets thermiques issus de STEP.

### 5.2.4 Attributions de lacs

La distance maximale autorisée  $r_{max}$  pour l'attribution a été fixée à 3 km. Il convient de prendre en compte le fait que l'eau des lacs possède également des capacités de refroidissement et offre donc une meilleure rentabilité que l'utilisation de la chaleur seule. Pour ce qui est des lacs, les distances par rapport aux clusters sont calculées à partir de la rive. Le même algorithme est de nouveau utilisé. La différence d'altitude au sein d'un cluster n'a pas été prise en compte jusqu'à maintenant, ce qui peut impliquer une surestimation du potentiel dans certaines zones comportant des rives abruptes. 5,1 TWh/a de l'énorme potentiel des lacs estimé à 97 TWh/a ont pu être attribués à des clusters.

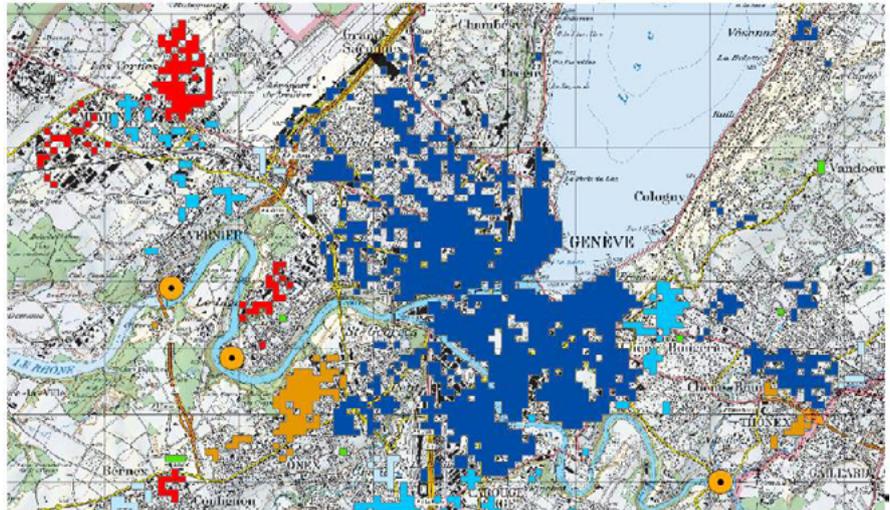


Figure 37: Exemple d'attribution d'un lac: les clusters représentés en bleu foncé sont at-tribués au lac (orange = STEP, bleu clair = eaux souterraines , rouge = UIOM).

### 5.2.5 Attribution de cours d'eau

Les cours d'eau sont plus complexes que les lacs. En partant de la zone de la source, ils se rejoignent avec d'autres cours d'eau ou débouchent dans un lac. Leur débit d'eau change donc, ainsi que leur potentiel thermique (voir chapitre 4.2.6). Nous analysons les cours d'eau en tronçons, au sein desquels le débit d'eau reste constant (pour le principe, voir Figure 38).

Le potentiel thermique de chaque tronçon de cours d'eau dépend des précédents (si existants). Si de la chaleur a déjà été prélevée dans un tronçon précédent, l'eau s'est déjà refroidie d'une partie du kelvin autorisé et le potentiel thermique diminue en conséquence. Considérons par exemple le cours d'eau dans le tronçon  $A_3$  (figure 38). Il se compose des affluents  $A_1$  et  $A_2$ . Le potentiel thermique du  $Q_{A_3}^p$  tronçon  $A_3$  est donc égal à la somme  $A_1$  et  $A_2$ , soit:

$$Q_{A_3}^p = Q_{A_1}^p + Q_{A_2}^p \quad [4]$$

Si l'eau de la rivière est refroidie dans les tronçons  $A_1$  et  $A_2$ , cela a des conséquences sur le tronçon  $A_3$ . En effet, le potentiel thermique  $Q_{A_3}^p$  est diminué proportionnellement aux prélèvements de chaleur effectués dans les tronçons précédents:

$$Q_{A_3}^p = (Q_{A_1}^p - Q_{A_1}^w) + (Q_{A_2}^p - Q_{A_2}^w) \quad [5]$$

Cette diminution du potentiel thermique doit être prise en compte lors de l'attribution. Sinon, cela pourrait entraîner une surévaluation du potentiel de la rivière.

Un cas spécial se pose lorsqu'un lac est situé sur le cours d'une rivière. Son débit ( $A_5$ ) est alors considéré comme régénéré et les tronçons précédents ( $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ ) ne doivent pas être pris en compte.

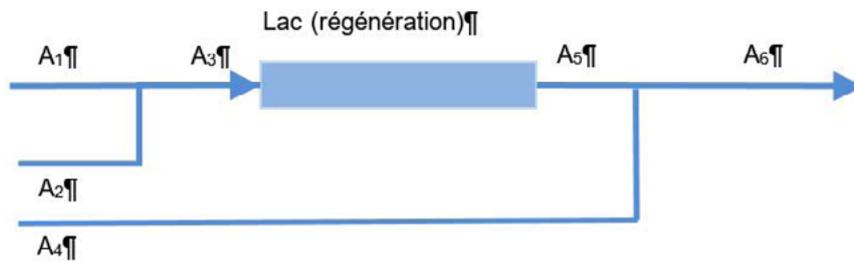


Figure 38: Dépendance des potentiels thermiques dans les cours d'eau entre les différents tronçons.

L'algorithme d'attribution a été modifié de la manière suivante:

- Les étapes 1 et 2 mentionnées au chapitre 5.1.3 ont été effectuées sur les différents tronçons.
- Tous les tronçons ont été consciencieusement vérifiés à l'aide de la formule [5] de la matrice de dépendance élaborée afin de ne pas extraire trop de chaleur.
- Si le bilan est négatif dans la formule [5], les potentiels thermiques sont adaptés et l'algorithme d'attribution est à nouveau lancé.

La distance maximale autorisée  $r_{max}$  pour l'attribution a été fixée à 3 km.

1,8 TWh/a du potentiel thermique de 21,3 TWh/a a pu être attribué.

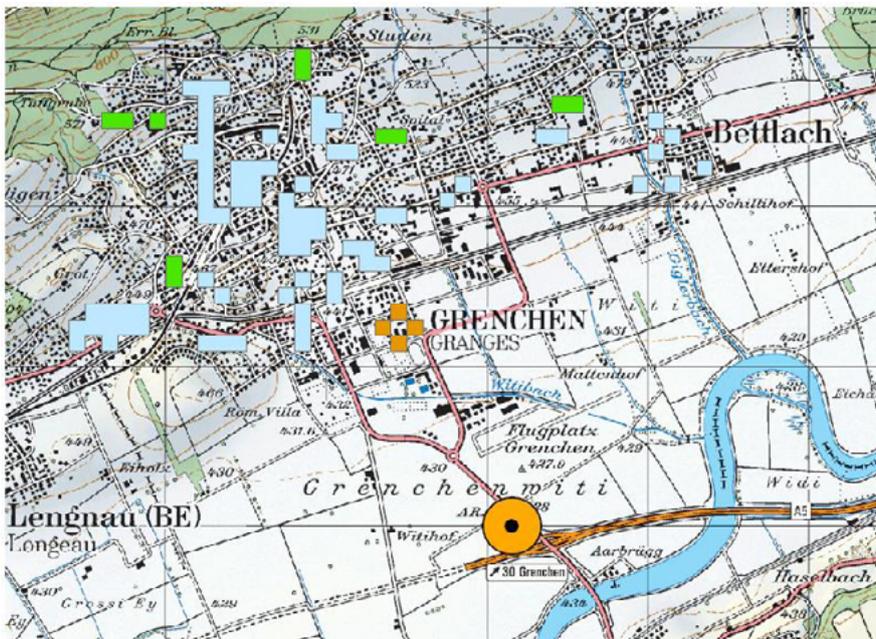


Figure 39: Exemple de l'attribution d'un cours d'eau près des Granges (clusters représentés en bleu clair)

### 5.3 Attribution de sources d'énergie non localisées

L'attribution des sources d'énergie localisées a permis de combler 14,3 TWh/a des 17,3 TWh/a nécessaires. Il manque donc 3,0 TWh/a, qui pourraient être approvisionnés par le biais de sources d'énergie non localisées. La Figure 40 montre la répartition par taille des clusters restants.

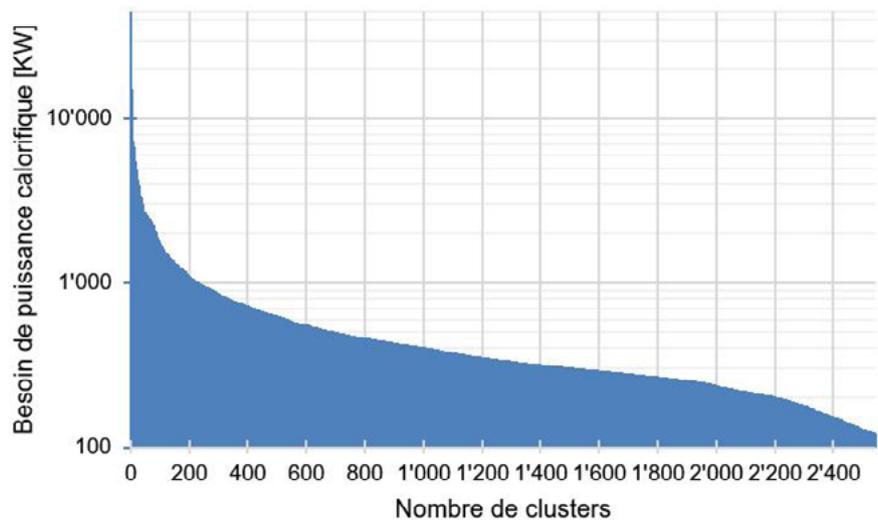


Bild 40: Grössenverteilung der Cluster ohne zugeordnete Energiequelle

Le spectre comprend moins de gros clusters et beaucoup de petits clusters. Le Tableau 9 résume la répartition des clusters en catégories de puissance thermique.

<b>Catégorie de puissance</b>	<b>Nombre</b>	<b>Besoin thermique total</b>	<b>Répartition du besoin thermique</b>	<b>Technologies attribuées</b>
20 – 50 MW	3	0.2 TWh/a	7 %	Géothermie pro-fonde
10 – 20 MW	3	0.1 TWh/a	3 %	Centrales thermiques à bois
0.5 – 10 MW	701	1.6 TWh/a	54 %	HChauffages au bois
inférieure à 0.5 MW	1'838	1.1 TWh/a	36 %	Sondes thermiques
<b>Total</b>		<b>3.0 TWh/a</b>	<b>100 %</b>	

Tableau 9: Catégories de puissance thermique des clusters sans source de chaleur attribuée

La catégorie de puissance supérieure présentant des besoins en puissance thermique de 20 MW et plus est prédestinée à la géothermie profonde. L'un des trois clusters se trouve à St-Gall où un système hydrothermal de géothermie profonde est planifié. Un autre serait principalement approvisionné par une UIOM, si notre modèle l'autorisait (perfectionnement).

La deuxième catégorie de puissance est comprise entre 10 à 20 MW. C'est une plage appropriée aux centrales thermiques à bois avec production d'électricité. La distribution est suffisante pour exploiter des installations CCF à bois de manière rentable. Mais ici aussi, seuls 3 clusters appropriés sont disponibles. Cela montre que le couplage chaleurforce bois ne présente qu'un très faible potentiel avec la technologie actuelle dans le domaine du chauffage de locaux, sauf dans les grands réseaux de chauffage à distance disponibles.

La fourchette suivante, qui va de 0,5 à 10 MW, pourrait être approvisionnée par des chauffages à copeaux de bois. La part du potentiel thermique totale du bois serait inférieure à 8%. Ainsi, seule une petite partie serait utilisée pour le chauffage des locaux et la préparation d'eau chaude (utilisations non optimales du point de vue énergétique).

Pour la catégorie de puissance inférieure à 0,5 MW, des installations de sondes thermiques traditionnelles bivalentes pourraient être utilisées, car ces clusters se trouvent généralement à la campagne, où les restrictions d'espace sont quasiment absentes. Des installations bivalentes à air ambiant peuvent également être envisagées dans cette catégorie de puissance.

Ces hypothèses pourraient permettre de couvrir les besoins thermiques restants de 3,0 TWh/a à l'aide du bois et de la géothermie.

L'utilisation des rejets thermiques pourrait apporter une contribution dans des proportions encore inconnues. Avant qu'une évaluation correspondante ne soit possible, une clarification des potentiels doit être réalisée avec une localisation géographique précise.

<b>Source d'énergie renouvelable</b>	<b>Quantité de chaleur attribuée</b>
Bois	1.7 TWh/a
Géothermie (profonde et non profonde)	1.3 TWh/a

Tableau 10: Résumé de l'attribution de sources d'énergie non localisées

## 5.4 Résultat

Pour résumer, les sources de chaleur sont attribuées au potentiel de chauffage de proximité et à distance estimé à environ 17 TWh/a de la manière suivante:

<b>Source de chaleur</b>	<b>Potentiel thermique [TWh/a]</b>	<b>Attribué [TWh/a]</b>	<b>Couverture des besoins en chauffage à distance</b>
UIOM	5.7	3.6	21%
Utilisation directe des rejets thermiques industriels	3.6	Non attribué	Non attribué
Eaux souterraines	12.2	1.9	11%
STEP	7.7	1.9	11%
Lacs	97.0	5.1	29%
Cours d'eau	21.3	1.8	10%
Bois	20.5	1.7	10%
Géothermie	70.0	1.3	8%
<b>Total</b>	<b>238.0</b>	<b>17.3</b>	<b>100%</b>

Tableau 11: Potentiel thermique et attribution résultante

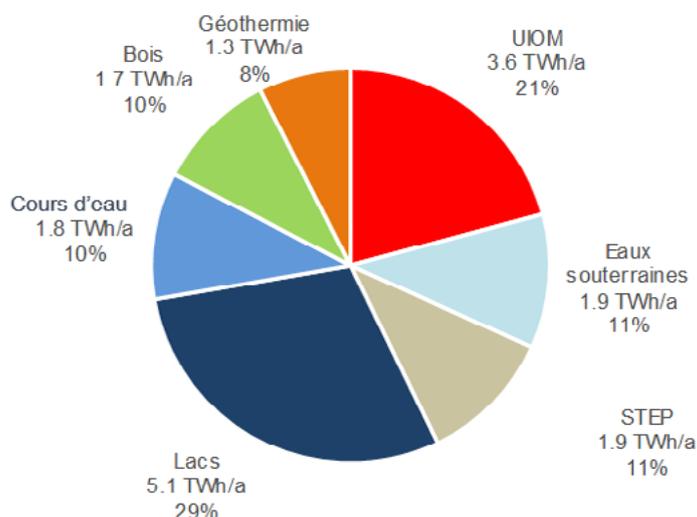


Figure 41: Répartition des sources de chaleur attribuées au potentiel de chauffage de proximité et à distance

Selon les hypothèses émises, 100% du potentiel de chauffage de proximité et à distance identifié peut être approvisionné avec les sources d'énergie renouvelable considérées. D'autres informations peuvent être déduites du résultat à partir de la valeur thermique.

### **Chaleur exploitable directement**

Il est particulièrement intéressant, du point de vue de la rentabilité, d'utiliser les rejets thermiques produits à partir d'une température de 70°C, car ils peuvent être utilisés directement. L'UIOM et l'utilisation directe des rejets thermiques industriels remplissent cette condition. En effet, les rejets thermiques des installations d'incinération des ordures ménagères peuvent couvrir à eux seuls un cinquième des besoins à long terme des systèmes de chauffage de proximité et à distance fixés à 17 TWh/a. L'exploitation directe des rejets thermiques industriels pourrait augmenter cette part à presque 50%. Toutefois il est n'est pas possible, avec les chiffres actuellement disponibles, de déterminer la part effectivement utilisable des rejets thermiques industriels.

### **Chaleur exploitable indirectement**

La chaleur exploitable indirectement doit être relevée à un niveau de température utilisable (env. 65°C) à l'aide d'une pompe à chaleur. Cela permettrait de couvrir tous les besoins en chauffage de locaux et d'eau chaude. Pour des raisons de rentabilité, les réseaux de chaleur à distance et de proximité fonctionnent avec des températures extérieures très basses et une température de départ d'au moins 90°C. Cela rend nécessaire l'utilisation d'une chaudière auxiliaire exploitée à l'aide d'énergie fossile, qui fournit 40 à 50% de la puissance thermique maximale et près de 10% de l'énergie annuelle.

**Les lacs présentent un grand potentiel.**

**Les lacs présentent un grand potentiel.**

*Les ressources en eau naturelle de la Suisse (lacs, cours d'eau et eaux souterraines) fournissent la plus grande part de chaleur renouvelable utilisable indirectement. Déjà sans les cours d'eau, la couverture des besoins à long terme est de 1/3. Le fait que l'eau lacustre et les eaux souterraines peuvent non seulement être utilisées pour chauffer, mais aussi pour refroidir directement, est particulièrement important et améliore considérablement l'utilisation des systèmes correspondants d'un point de vue de la rentabilité.*

*Il convient encore de noter que les STEP fournissent une contribution importante avec une part de 11% des besoins à long terme.*

## 6. Perspectives

*Le premier rapprochement entre les énergies renouvelables liées à une zone géographique et les clusters de chauffage a permis de montrer qu'une part importante (38%) des besoins à long terme en chauffage de locaux et en eau chaude peut être approvisionnée par des énergies re-nouvelables à l'aide de réseaux de distribution de chaleur.*

*Les présents travaux préliminaires vont être suivis d'étapes concrètes, ainsi que de la mise en œuvre et de l'exploitation des potentiels identifiés. Outre les prestations de transfert déjà introduites, nous considérons avant tout les domaines thématiques suivants comme importants et pensons qu'ils devraient être traités dans le cadre de prochaines étapes de projet.*

### **Mise en œuvre des résultats**

- 1. Présentation des résultats aux utilisateurs potentiels (prestataires d'énergie, contracteurs, planificateurs, cantons, etc.). Adaptation du webSIG accessible au public.*
- 2. Publications dans des organes de publication correspondants et notamment dans les revues suivantes:*
  - Tec21*
  - Energiefachbuch*
  - Euroheat & Power*
- 3. Présentations publiques lors de manifestations.*
- 4. Renforcement des activités de mise en œuvre concrètes en collaboration avec la Cité de l'énergie, les distributeurs d'énergie et les contracteurs.*

### **Compléments apportés aux présentes analyses SIG**

- 5. Saisie de réseaux de chauffage de proximité et à distance existants et intégration dans le webSIG.*
- 6. Analyses fondamentales sur les sources de rejets thermiques industriels dans le but d'obtenir des rejets thermiques disponibles à l'hectare près avec mention des niveaux de température.*
- 7. Comptabilisation du froid avec des températures supérieures à 8°C (climatiseurs). Détermination à l'hectare près du besoin en froid, basée sur les différents types de bâtiment et leur utilisation. Détermination de la part de froid renouvelable pouvant être couverte par les eaux souterraines, lacustres et fluviales.*

# A. Annexe

## A.1 Bibliographie

1. Wagner, H.-J., et al. Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES. s.l.: Ruhr-Universität Bochum, 2002.
2. Kirchner, Almut, et al. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Bâle: Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2012.
3. Bacher, Binz, Eicher, Iten; Keller. Energierespekt, Faktorverlag 2013. ISBN: 978-3-905711-27-1.
4. Erb, Markus et Gutzwiler, Stephan. Ausbau von WKK in der Schweiz: WKK-Standortevaluation auf Basis einer GIS-Analyse. Dr. Eicher+Pauli AG. Sarnen: V3E-Verband Effiziente Energie Erzeugung, 2011.
5. Erb, Markus, Gutzwiler, Stephan und Kaufmann, Urs. Fossile BHKW - Potential und Standortevaluation im Rahmen der Entwicklung der BFE WKK - Strategie. Dr. Eicher + Pauli AG. Berne: Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2012.
6. Dettli, Reto, Müller, Mathias et Ott, Walther. Zukunft der Nah- und Fernwärme in der Schweiz. Zurich: econcept, 2006.
7. Energiestadt. Räumliche Energieplanung - Werkzeuge für eine zukunftstaugliche Wärmeversorgung. Ettenhausen: EnergieSchweiz für Gemeinden, c/o Nova Energie GmbH, 2011.
8. Klingler, Georg, Ott, Walter und Rom, Noemi. Die Zukunft leitungsgebundener Energieversorgungssysteme. Econcept. Berne: Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2011.
9. Stumpf et al., K. Zusammensetzung der Siedlungsabfälle der Schweiz 1992/1993. Schriftenreihe Umwelt, BUWAL. Dez. 1995, 248.
10. Entsorgung + Recycling Zürich. Überprüfung der Kapazitäts- und Standortplanung der thermischen Verwertung von Abfällen im Kanton Zürich 2012 - 2035. Zurich: AWEL, ZVA, 2012.
11. Liechti, Jörg. Energieoptimierung der KVA. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) Zürich, l'association suisse des exploitants d'installations de traitement des déchets (ASED), Berne. 2012e
12. Kuchler, Fabien. Identification des rejets thermiques industriels en Valais. Centre de Recherches Energétiques et Municipales. Sion: canton du Valais, service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2012.
13. Pehnt, Martin, et al. Die Nutzung industrieller Abwärme- technisch-wirtschaftliche Potentiale und energiepolitische Umsetzung. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg: s.n., 2010.
14. Kirchner, Almut, et al. Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2010 nach Verwendungszwecken. Berne: Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2011.
15. Eggen, Bernhard et Anton, Sres. Richtplan Energie Teil B: Bericht zum Richtplan Energie. Lyss: commune de Lyss, 2011.
16. Ryser Ingenieure AG. Heizen und Kühlen mit Abwasser. Zurich: Baudirektion Kanton Zürich, AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kt. Zürichs, 2010.
17. EAWAG. Assainissement 2025 en Suisse. Dübendorf: Eawag, 2012. Bulletin de l'EAWAG, n°21.
18. Gutzwiler, Stephan, Rigassi, Reto et Eicher, Hanspeter. Abwasserwärmenutzung, Potential, Wirtschaftlichkeit und Förderung. Liestal: BFE, 2008.
19. Geologiebüro Lienert & Haering AG. Grundwasser-Wärmepotential im Talboden von Ebnat-Kappel und Wattwil - Potentialanalyse. Energietal Toggenburg. 2011.
20. Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft. Energienutzung aus Untergrund und Grundwasser - Planungshilfe. Zurich: s.n., 2010.

21. Wüest, Alfred. *Potential zur Wärmeenergienutzung aus dem Zürichsee*. EAWAG, Kastanienbaum. Zürich: AWEL, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich, 2012.
22. *Liste des plus grands lacs de Suisse (en allemand)*. Wikipedia. [On-line] [citation du: 25 octobre 2013.] [http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_gr%C3%B6sssten\\_Seen\\_in\\_der\\_Schweiz](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_gr%C3%B6sssten_Seen_in_der_Schweiz).
23. *Office fédéral de la topographie. Die grössten Seen und höchsten Berge*. Berne: Office fédéral de la statistique, OFS, 2009.
24. Reinartz, Ralf. *Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süsswasserfische Bayerns*. [Hrsg.] Bayrisches Landesamt für Umwelt. Referat 57 - Gewässerökologie. 2007e
25. Lange, Jörg. *Wärmelast Rhein*. Mainz: Fédération allemande pour l'environnement et la protection de la nature (BUND), 2009.
26. *Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux)*. 1998, état 2011.
27. *Office fédéral de l'environnement, OFEV. Données et bases hydrologiques*. [Online] 2013. <http://www.hydrodaten.admin.ch/fr/>.
28. INFRAS. *Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz*. Berne: Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2004.
29. Pauli, Bernhard, Bürgi, Patric et Brühlhard, Stefan. *Bois, matière première et source d'énergie*. Berne: Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2010.
30. AXPO. *De l'électricité aujourd'hui et demain. Perspectives pour l'électricité 2020 – mise à jour*. 2010e
31. Doppelreiter, David. *Tiefe Erdwärmesonde - nachhaltige, verlässliche und preis-stabile Wärme*. Vienne: RAG, 2013. Présentation.
32. Wandschneider + Gutjahr Ingenieurgesellschaft mbH, Hambourg. *Materialien zum „Stand der Technik“ für die Energienutzung in KVA*. Zürich: AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2011.
33. Oppermann, Gerhard, Gutzwiler, Stephan et Müller, Ernst A. *Projektentwicklung Fernwärme Schweiz - Abwärmennutzung aus (de)zentralen Quellen der Industrie und Umwelt*. s.l.: Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2010.
34. ASCAD, Association suisse de chauffage à distance. *webSIG*. s.l.: [www.fernwaerme-schweiz.ch](http://www.fernwaerme-schweiz.ch).
35. Morf, Leo. *Materialien zum „Stand der Technik“ für die Energienutzung in KVA*. Wandschneider + Gutjahr Ingenieurgesellschaft mbH, Hambourg. Zürich: Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, 2011.
36. Renz, Stefan. *Office fédéral de l'énergie OFEN, Programmes de recherche Pompes à chaleur et froid; Déc. 2013, -16*. Office fédéral de l'énergie (OFEN). *News aus der Wärmepumpen-Forschung, 19. Tagung des BFE-Forschungsprogramms „Wärmepumpen und Kälte“*. 26 juin 2013, p. 9- 21.
37. Ryttec AG, Münsingen. *Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren*. Berne: Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

## **A.2 Remerciements**

*Le projet a pu être mené grâce au financement des organisations suivantes:*

- *Office fédéral de l'énergie OFEN*
- *Forum du chauffage à distance*
- *Brugg Rohrsystem AG, Kleindöttingen*
- *Axpo AG, Baden*
- *Hoval AG, Feldmeilen*
- *Caliqua AG, Bâle*
- *Schmid AG, Eschlikon*
- *AEW Energie AG, Aarau*
- *Logstor Schweiz AG, Regensdorf*

*Dr. Eicher+Pauli AG a également participé financièrement au projet sous la forme de prestations propres.*

*Pour finir, nous tenons également à remercier Dr. Peter Meier de GEO-Energie Suisse AG pour les informations fournies sur le thème de la géo-thermie.*

**eicher+pauli**

Planer für Energie- und Gebäudetechnik

*Dr. Eicher+Pauli AG  
Stauffacherstrasse 65, CH-3014 Bern  
Tel. 031 370 14 14  
Fax 031 370 14 15  
info@eicher-pauli.ch  
www.eicher-pauli.ch*

**chauffage à distance**  
l'énergie du confort

*Association suisse du chauffage à distance  
(ASCAD)  
Walter Böhlen  
Römerweg 2  
5443 Niederrohrdorf  
info@fernwaerme-schweiz.ch  
www.fernwaerme-schweiz.ch*

67