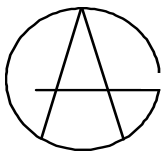


Service cantonal de l'énergie (SCANE)
Services industriels de Genève (SIG)

EVALUATION DU POTENTIEL GEOtherMIQUE DU CANTON DE GENEVE - PGG

Volume 1 - Rapport final

Elaboré par le **GROUPE DE TRAVAIL PGG** :



GEOTECHNIQUE APPLIQUEE DERIAZ S.A.(GADZ), pilote
Centre d'hydrogéologie et de géothermie (CHYN)
Jules Wilhelm, Ingénieur conseil

Octobre 2011

Historique

version 1	14.1.2011	Version provisoire de relecture générale
version 2	12.8.2011	Version pré-finale pour dernier contrôle
Version 3	31.10.2011	Version finale

Impressum

Date : octobre 2011

Dossier GADZ : Evaluation du potentiel géothermique du canton de Genève - PGG

N° dossier GADZ : 5357.3

N° rapport GADZ : 5357/1

Réalisation : groupe de travail PGG

Financement : Etat de Genève - Service cantonal de l'énergie - ScanE
 SIG - Services industriels de Genève

Adresses et coordonnées :

Géotechnique appliquée Dériaz SA (GADZ)

Bureau et laboratoire : 9, chemin des Vignes, 1213 Petit-Lancy / Genève

Agence Le Mont : 22, route du Grand-Mont, 1052 Le Mont/Lausanne

Centre d'hydrogéologie et de géothermie (CHYN)

Univ. de Neuchâtel

Rue Emile-Argand 11

CH - 2000 Neuchâtel

Jules Wilhelm, Ingénieur conseil

26, ch. du Fau-Blanc

CH – 1009 Pully

Citation :

Groupe de travail PGG, 2011. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Genève (PGG). Vol.1 : Rapport final, Vol.2 : Annexes, GADZ 5753/1, Genève.

Résumé

L'étude du potentiel géothermique du canton de Genève, menée entre 2009 et 2011, a permis de conclure que le Bassin genevois présente des conditions globalement favorables à l'utilisation de cette ressource tant pour les techniques de faible profondeur que de grande profondeur.

Géothermie de faible profondeur (<400 m)

La géologie du Bassin genevois est dominée à faible profondeur (quelques centaines de mètres) par des dépôts quaternaires et la Molasse tertiaire. Ce sont ces terrains qui pourront être exploités par des installations géothermiques de faible profondeur (sondes verticales, géostructures énergétiques, pompage dans les nappes peu profondes).

A ce jour, de très nombreux forages (plus de 15'000) ont été relevés et synthétisés, ce qui permet une bonne connaissance des formations du Quaternaire ainsi que de la Molasse du Bassin genevois. Par ailleurs, il existe à Genève une classification systématique de ces terrains depuis une quarantaine d'années, ce qui permet d'homogénéiser l'information géologique. Enfin, des modèles numériques ont été élaborés par le Service de géologie, sols et déchets (GESDEC) pour cartographier les principales limites de couches. Il en résulte que l'état de connaissance du sous-sol quaternaire et molassique peut être considéré comme remarquable à Genève. Grâce à cette information et aux nombreuses données géotechniques existantes, une étude détaillée a pu être réalisée afin de caractériser les paramètres géothermiques des différents terrains quaternaires et de la Molasse du canton de Genève.

Les sondes géothermiques représentent de loin la méthode la plus appliquée aujourd'hui. Déjà largement utilisée en Suisse et à Genève, cette technologie est bien maîtrisée et ne se heurte qu'à peu de contraintes dans notre canton hormis la protection de la nappe souterraine du Genevois et celle de l'Allondon. Elles peuvent être réalisées sur au moins 80% du territoire du canton. Les simulations effectuées montrent qu'une proportion importante de la demande actuelle en énergie de chauffage du canton (6'000 GWh/an) pourrait être couverte par des sondes ou des champs de sondes, soit au moins 20% avec des scénarios conservatifs. Cette production pourrait être augmentée puisque dans le cas de champs de sondes importants, les performances peuvent être jusqu'à 10 fois supérieures à celles considérées dans la présente recherche. L'étude détaillée du sous-sol à faible profondeur a permis d'établir des cartes donnant les conditions cadre pour le développement et le dimensionnement des sondes.

Les géostructures énergétiques (pieux, radiers, parois moulées, etc.), sur les mêmes principes de fonctionnement que les sondes, représentent des solutions éprouvées à l'étranger et en Suisse mais sont encore peu utilisées à Genève. Sur le canton, le potentiel global représenté par cette technique est relativement peu élevé car elle est essentiellement limitée aux constructions nécessitant des ouvrages de fondation ou de soutènement pour les utiliser comme échangeur de chaleur. Or, ces ouvrages ne sont réalisés que dans des conditions particulières (faible capacité portante des terrains de fondations et/ou projets particuliers). Il s'agit donc plutôt d'une technique opportuniste, relativement peu coûteuse, puisque les ouvrages utilisés sont réalisés dans le cadre du projet de génie-civil. Elle peut couvrir en moyenne 30% des besoins en chaleur d'un bâtiment car la dimension des capteurs dépend de considérations de génie-civil et non des besoins thermiques. Une carte des secteurs potentiels de développement de cette technique a été établie. L'importante zone de développement Praille - Acacias - Vernets (PAV) est un secteur particulièrement intéressant à cet égard.

L'exploitation des **nappes phréatiques peu profondes** (nappes principales et superficielles) offre également des perspectives d'avenir, même si elle implique des contraintes hydrogéologiques et juridiques plus importantes que pour les deux techniques précédentes. Les nappes principales de Montfleury et du Rhône présentent un potentiel élevé pour des projets de grande taille. Les nappes superficielles ont quant à elles des potentiels faibles à moyens pour des projets de taille réduite, avec en plus des caractéristiques hydrogéologiques hétérogènes. La production potentielle totale de chaleur, toutes nappes confondues, a été estimée entre 40 et 110 GWh/an, soit entre 1 et 2 % des besoins de chaleur du canton. Cette

production pourrait être nettement augmentée pour les nappes principales (facteur 5 à 10) en optimisant les techniques (recharge saisonnière).

Le stockage saisonnier se présente principalement comme un moyen d'optimiser les autres méthodes géothermiques de faible profondeur (champs de sondes, exploitation des nappes) en profitant des cycles thermiques naturels et de la réversibilité des systèmes (exploitation de chaud ou de froid). Cette technique offre également la possibilité de valoriser des sources énergétiques disponibles (chaleur récupérée par refroidissement de bâtiments industriels) pour les utiliser ensuite pour des logements (stockage tampon). On peut également stocker de la chaleur dans des réservoirs d'eau enterrés avec des sources d'énergie diverses (solaire notamment). A Genève, le potentiel d'utilisation se présente plutôt sous la forme de stockage lié à des champs de sondes géothermiques verticales. Il s'agit d'une solution déjà utilisée avec succès en Suisse, encore sous forme de projet dans notre canton. Le stockage dans les nappes a toutefois déjà été réalisé avec succès à Genève pour le bâtiment de Jargonnant.

Toutes ces techniques sont actuellement maîtrisées et peuvent donc être mises en œuvre. L'expérience locale est bonne pour les sondes, plus limitée pour les autres méthodes. Leurs possibilités d'utilisation sont désormais bien définies à Genève suite à la présente étude. Les actions à engager dès à présent sont la promotion de la géothermie auprès des différents acteurs concernés et la définition des cadres réglementaires de son utilisation. Des cahiers des charges type pour les études à réaliser dans le cadre de projets géothermiques devraient être établis. Par ailleurs, une coordination à l'échelle cantonale est très importante pour ce type de technique. A cet égard, certains outils existent déjà (planification énergétique territoriale) mais d'autres restent à développer, notamment en ce qui concerne la gestion globale du sous-sol, afin d'optimiser leur application.

Géothermie profonde (>400 m)

Les installations de grande profondeur concerneront pour leur part les couches mésozoïques (ère secondaire) du Trias, du Jurassique et du Crétacé que l'on retrouve dans les reliefs du Jura et du Salève, ainsi que le socle cristallin (4 à 5 km de profondeur). Elles seront également fortement liées à la tectonique régionale.

Les études montrent que le potentiel d'exploitation des **aquifères profonds** est réel dans le Bassin genevois. Il existe en effet plusieurs couches aquifères potentiellement intéressantes (Crétacé, Malm, Dogger, Muschelkalk) ainsi que plusieurs zones fracturées importantes les recoupant et permettant de les exploiter dans des conditions plus favorables (débits plus importants). L'aquifère le plus profond (Muschelkalk), situé entre 2.5 et 4.3 km de profondeur est toutefois le seul à présenter une température suffisante pour envisager une coproduction de chaleur et d'électricité ($T > 100^{\circ} \text{C}$). Entre le Muschelkalk et le socle cristallin, la formation du Permo-carbonifère, encore très peu connue, pourrait également représenter un potentiel certain pour la géothermie.

Les techniques d'exploration et d'exploitation des aquifères profonds sont également maîtrisées à l'heure actuelle. En revanche, la connaissance des structures géologiques profondes est pour l'instant très lacunaire. Il s'agit donc dans un premier temps d'engager dès que possible des programmes d'investigations détaillées (campagnes de géophysique et forages d'exploration) pour être prêt, le moment venu à exploiter ces ressources de grande capacité potentielle. De telles reconnaissances sont en cours dans d'autres cantons.

Des systèmes géothermiques stimulés (EGS) pourraient également être envisagés à Genève par l'exploitation de la chaleur du socle cristallin dès 4 à 5 km de profondeur. Un tel projet avait d'ailleurs été initié en 1998. Les événements survenus lors du programme Deep Heat Mining à Bâle en 2006 ont conduit à l'interruption de ces projets, tant à Bâle qu'à Genève. Il n'en reste pas moins que cette ressource est disponible partout sous nos pieds et qu'elle pourra certainement, à terme, être exploitée chez nous pour la coproduction de chaleur et d'électricité lorsque la technologie aura atteint une certaine maturité technologique et économique et que les structures profondes auront été reconnues par forage. Il est donc recommandé de mettre à profit les reconnaissances ciblées sur les aquifères profonds pour également recueillir les informations permettant de connaître la structure du socle cristallin.

Le développement de l'utilisation des ressources géothermiques à Genève doit désormais faire l'objet de diverses mesures d'incitation et de coordination à l'échelle cantonale. Une série de recommandations est présentée dans chacun des chapitres concernés ainsi qu'à la fin du rapport.

Table des matières

Résumé.....	3
1. Introduction.....	11
1.1 Cadre général - Définitions.....	11
1.1.1 Présentation du projet.....	11
1.1.2 Exploitation des ressources géothermiques.....	12
1.2 Démarche de l'étude.....	15
1.3 Contexte local - Distribution et consommation d'énergie.....	16
1.4 Orientation de la politique fédérale et cantonale en matière de géothermie.....	16
1.5 Présentation du rapport.....	17
1.6 Organisation de l'étude.....	17
1.7 Bibliographie.....	18
2. Cadre général du Canton de Genève.....	19
2.1 Géographie et Topographie.....	19
2.2 Climat.....	20
2.3 Développement de Genève.....	21
2.4 Contraintes territoriales pour la géothermie.....	22
2.5 Prescriptions fédérales et cantonales pour la géothermie.....	23
2.6 Bibliographie.....	25
3. Géologie du Canton de Genève.....	27
3.1 Introduction.....	27
3.2 Le Soubassement rocheux.....	27
3.2.1 Les formations primaires et secondaires (paléozoïque et mésozoïque).....	27
3.2.2 La Molasse Tertiaire.....	29
3.2.3 Tectonique genevoise.....	31
3.3 Le Quaternaire.....	32
3.4 Classification genevoise des sols.....	33
3.5 Autres classifications des sols.....	35
3.6 Hydrogéologie.....	35
3.7 Contraintes législatives liées à la géologie pour la géothermie.....	36
3.8 Commentaires et conclusions.....	39
3.9 Bibliographie.....	39
4. Paramètres thermiques et géothermiques à Genève.....	41
4.1 Rappels théoriques pour les sols.....	41
4.1.1 Conductivité thermique.....	41
4.1.2 La capacité thermique ou calorifique.....	44
4.2 Les paramètres géothermiques des sols genevois.....	45
4.3 Gradient géothermique et température du sol.....	51
4.4 Flux et recharges géothermiques.....	53
4.5 Commentaires.....	55
4.6 Bibliographie.....	55

5.	Sondes Géothermiques verticales	57
5.1	Introduction	57
5.2	Description des systèmes	58
5.3	Exemples et projets de réalisation à Genève	60
5.4	Normes et directives	61
5.5	Avantages	61
5.6	Risques et contraintes associées	62
5.6.1	Risques environnementaux	62
5.6.2	Risques géologiques et géotechniques	63
5.6.3	Conflits avec le bâti existant et futur	64
5.7	Procédure d'autorisation et contraintes légales	64
5.8	Dimensionnement des sondes	65
5.8.1	Principes	65
5.8.2	Paramètres généraux du site	66
5.8.3	Paramètres techniques et géométriques de la sonde	67
5.8.4	Logiciels de dimensionnement	76
5.9	Comportement à long terme	77
5.10	Développements récents	79
5.10.1	Sondes de moyenne profondeur (400-800 m)	79
5.10.2	Foreuses compactes	80
5.11	Evaluation du potentiel d'implantation des sondes géothermiques verticales à Genève	80
5.11.1	Cartographie des paramètres géothermiques	80
5.11.2	Potentiel d'implantation géographique	88
5.11.3	Particularités liées à la rénovation du bâti	88
5.12	Calcul du potentiel cantonal	89
5.12.1	Calcul de l'énergie dissipée par le flux géothermique	89
5.12.2	Calcul du potentiel d'exploitation par des sondes	89
5.13	Synthèse et recommandations	97
5.14	Bibliographie	98
6.	Géostructures énergétiques	101
6.1	Introduction	101
6.2	Les géostructures énergétiques	101
6.2.1	Concept général	101
6.2.2	Dimensionnement des géostructures énergétiques	104
6.2.3	Avantages et contraintes d'un système à géostructures énergétiques	107
6.2.4	Aspects économiques	107
6.3	Exemples et projets de réalisations	110
6.3.1	Terminal Dock Midfield de l'aéroport de Zurich	110
6.3.2	Bâtiment scolaire Vers-l'Eglise, Fully	112
6.3.3	Centre Aldi à Domdidier	113
6.3.4	Bâtiments locatifs à Delémont	114
6.3.5	Exemple à Genève : Nouvelle halle logistique du CICR à Satigny (GE)	115
6.3.6	Bâtiments tours sur pieux énergétiques à Francfort	116
6.3.7	Métro de Vienne	117
6.3.8	Géostructures dans les tunnels creusés	119
6.4	Evaluation du potentiel thermique des géostructures énergétiques dans le canton de Genève	121
6.4.1	Géologie et secteurs de développement	121
6.4.2	Estimation du potentiel énergétique au niveau cantonal	122
6.4.3	Projets de développement particuliers	124
6.4.4	Tunnels et tranchées couvertes	142
6.5	Conclusions et recommandations	143
6.6	Bibliographie	144

7.	Exploitation des nappes phréatiques peu profondes (<100 m)	147
7.1	Introduction	147
7.2	Description des systèmes	147
7.3	Exemples et projets de réalisation	148
7.4	Lois, normes et directives	150
7.5	Avantages	150
7.6	Risques et contraintes associées	150
7.6.1	Risques environnementaux	150
7.6.2	Risques techniques liés à l'hydrogéologie du site	152
7.6.3	Conflits avec le voisinage, le bâti existant et futur	153
7.7	Procédure d'autorisation et contraintes légales	153
7.8	Dimensionnement des installations	154
7.8.1	Principes de dimensionnement	154
7.8.2	Logiciels de dimensionnement	158
7.9	Caractéristiques générales des nappes phréatiques à Genève	160
7.9.1	Nappes principales	160
7.9.2	Nappes superficielles	161
7.9.3	Nappes temporaires	162
7.9.4	Température des nappes	163
7.9.5	Chimie des nappes	165
7.9.6	Débits exploitables	166
7.10	Exploitabilité géothermique des nappes genevoises	167
7.10.1	Cas général	167
7.10.2	Méthodologie	171
7.10.3	Exploitabilité des nappes principales	174
7.10.4	Exploitabilité des nappes superficielles	184
7.11	Synthèse sur le potentiel cantonal et recommandations	210
7.12	Bibliographie	215
8.	Stockage saisonnier	217
8.1	Introduction	217
8.2	Principes et dimensionnement	217
8.2.1	Dimensionnement du stock	219
8.2.2	Stockage avec sondes géothermiques verticales	223
8.2.3	Le stockage en aquifère	226
8.2.4	Logiciels de dimensionnement	230
8.3	Risques et contraintes légales associées	230
8.4	Exemples de réalisation	230
8.4.1	Stock avec sondes verticales	230
8.4.2	Stockage en aquifère	232
8.4.3	Stockage combiné avec cuve de stockage et sondes	233
8.5	Evaluation du potentiel de mise en place de stockage saisonnier sur le canton de Genève	234
8.5.1	Potentiel du stockage diffusif avec sondes verticales	234
8.5.2	Potentiel du stockage en aquifère	235
8.5.3	Projets de stockage sur le canton	235
8.6	Synthèse et conclusion	238
8.7	Bibliographie	238

9.	Ressources géothermiques profondes	241
9.1	Introduction	241
9.2	Exploitation des aquifères profonds	241
9.2.1	Concept technique général	241
9.2.2	Phases de réalisation	243
9.2.3	Techniques, équipements, coûts	245
9.2.4	Développement de la géothermie en aquifère profond dans les pays voisins	251
9.2.5	Développement de la géothermie en aquifère profond en Suisse.....	253
9.2.6	Projets de géothermie profonde dans le Bassin genevois	258
9.3	Technologie et développement des systèmes géothermiques stimulés (EGS).....	260
9.3.1	Concept technique et état des connaissances	260
9.3.2	Questions en suspens et problèmes à résoudre	262
9.3.3	Situation des projets EGS dans le monde.....	264
9.3.4	Projections à moyen terme.....	264
9.4	Synthèse des données du sous-sol genevois	266
9.4.1	Géologie	267
9.4.2	Contexte tectonique et sismicité naturelle	269
9.4.3	Conditions hydrogéologiques et géothermiques.....	271
9.5	Résultats.....	280
9.5.1	Structures géologiques profondes du Bassin genevois	280
9.5.2	Potentiel géothermique des aquifères profonds.....	285
9.5.3	Synthèse des résultats	290
9.6	Conclusions et recommandations	291
9.7	Bibliographie.....	292
10.	Conclusions et recommandations finales.....	299
10.1	Conclusions.....	299
10.2	Recommandations	300

1. Introduction

1.1 Cadre général - Définitions

1.1.1 Présentation du projet

Les questions énergétiques sont en ce moment sur le devant de la scène et il n'est plus un jour où les enjeux qui leurs sont liés ne soient débattus, à l'échelle internationale, régionale et locale.

Les réserves en énergie fossile diminuent progressivement et leur prix augmente. Par ailleurs, les changements climatiques globaux sont manifestes. De 1970 à 2004, les émissions anthropiques mondiales de gaz à effet de serre ont augmenté de 70%, à un rythme accéléré ces 10 dernières années. Il est très probable (plus de 90% de certitude) que ces émissions de gaz contribuent aux changements climatiques, et les effets à long terme de ce réchauffement sur la Suisse seront certainement négatifs (OcCC, 2007). La recherche de sources d'énergies alternatives vise, en parallèle avec les efforts d'économie d'énergie, à résoudre une partie de ces problèmes à divers titres : remplacement progressif des énergies en voie d'épuisement (charbon, pétrole, gaz) ou contestées (nucléaire), de même que la diminution de la production des gaz à effet de serre. A cet égard, la prise en compte des sources d'énergies alternatives doit être une priorité lors des choix stratégiques concernant l'approvisionnement en énergie d'une collectivité, quelle que soit sa taille.

La chaleur de la Terre représente une source d'énergie quasiment inépuisable. En effet, on estime que 99% du volume terrestre se trouve à des températures supérieures à 1000°C, avec seulement 0.1% de son volume à moins de 100°C. Le contenu total en chaleur de la Terre est de 10^{31} J et il faudrait plus d'un milliard d'années pour l'épuiser via le flux thermique terrestre global de 40 millions de MW (Rybach et Mongillo, 2006). Cette ressource est exploitée depuis plusieurs centaines d'années par les pays possédant des sources thermales, par exemple l'Italie, la France, l'Allemagne, la Hongrie et même la Suisse. En Suisse, justement, le développement de l'utilisation des ressources géothermiques de basse température et de faible profondeur (sondes géothermiques notamment) dès le milieu des années 1980 place notre pays parmi les leaders dans ce domaine.

En Suisse Romande, l'étude du potentiel géothermique a déjà été réalisée, en partie ou complètement, dans les cantons du Valais (Géothermoval, 1988-1996), de Vaud (PGV, 2003 puis projet APOGEE, en cours), Fribourg (PGF, 2005) et Neuchâtel (PGN, 2008 et PDGN, 2010). Fin 2009, le canton de Genève (Service cantonal de l'énergie - ScanE) et les Services industriels de Genève (SIG) ont à leur tour décidé de financer une étude similaire. Le présent rapport contient ainsi les résultats des investigations effectuées pour **l'évaluation du potentiel géothermique du canton de Genève (PGG)**. Les cinq technologies étudiées se répartissent en deux grandes catégories :

- Géothermie de faible profondeur : sondes géothermiques verticales (SGV), géostructures énergétiques (GEN), nappes phréatiques (NAP)
- Géothermie de grande profondeur : aquifères profonds (APR), systèmes géothermiques stimulés (EGS)

En outre, les possibilités de stockage saisonnier dans le sol et dans les nappes ont été étudiées.

1.1.2 Exploitation des ressources géothermiques

La Terre dégage en permanence de la chaleur. Le flux géothermique est une quantité de chaleur qui provient des profondeurs de la Terre et traverse sa surface. Il provient en partie de la chaleur intrinsèque du manteau profond emmagasinée lors de l'accrétion terrestre et en plus grande partie de la désintégration des éléments radioactifs contenus dans la croûte terrestre. De façon générale il est plus élevé sur les plaques continentales relativement jeunes que sur les plaques océaniques ou les boucliers géologiques très anciens. En moyenne, rapporté sur toute la surface du globe, le flux géothermique est de 50 mW/m² (Parriaux, 2006) mais il peut varier de moins de 30 mW/m² à plus de 150 mW/m² (Figure 1-1).

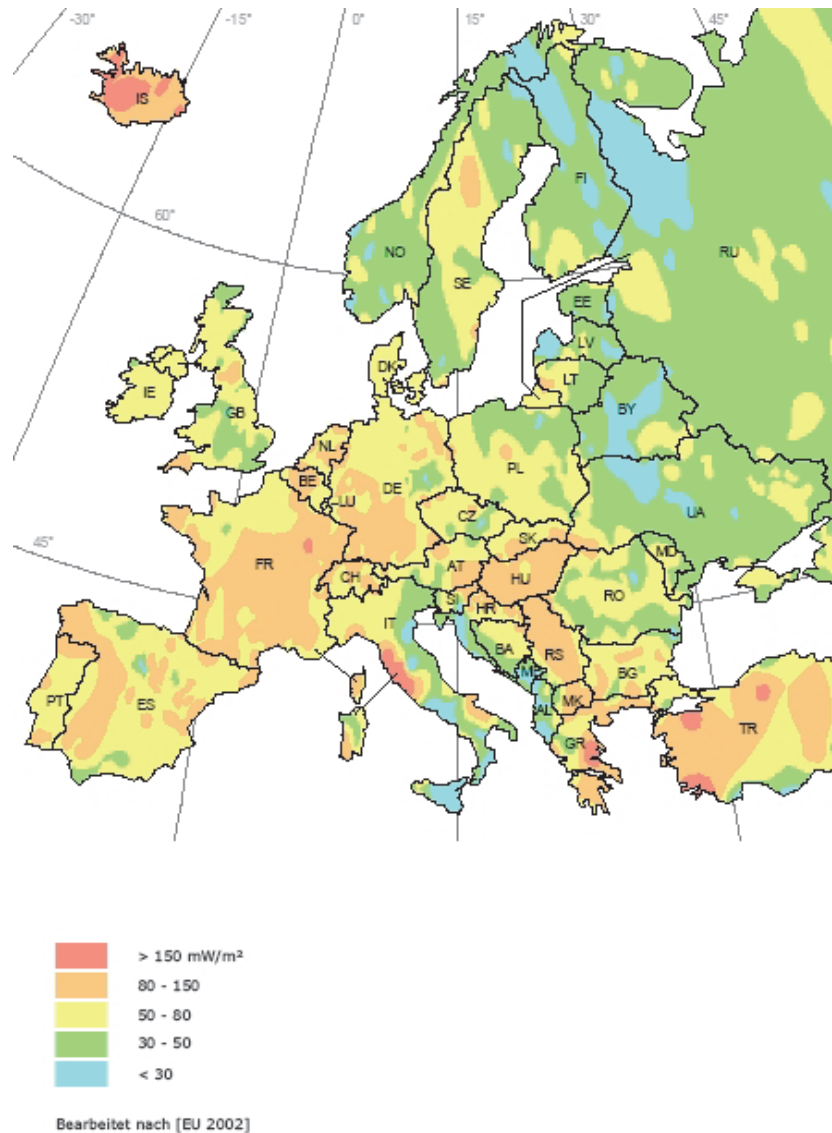


Figure 1-1. Flux géothermique en Europe (www.energie-atlas.ch)

L'exploitation géothermique consiste à capter et à valoriser ce flux géothermique, indépendamment de la provenance de cette chaleur. Suivant leur nature et leur gisement, les ressources géothermiques sont valorisées en ayant recours à des techniques d'exploitation variées.

Ainsi, on distingue au moins dix techniques différentes pouvant être utilisées en Suisse (Figure 1-2) :

- Collecteurs horizontaux enterrés (serpentins) et corbeilles énergétiques
- Sondes géothermiques verticales (SGV)
- Champs de sondes géothermiques (~5 à > 50 SGV)
- Sondes géothermiques profondes (> 400 m)
- Géostrutures énergétiques (GEN, pieux de fondation, dalles, parois enterrées)
- Nappes phréatiques (NAP, aquifères de faible profondeur < 100 m)
- Sources d'eau chaudes
- Eaux de drainage des tunnels
- Aquifères profonds (APR, aquifères > 400 m)
- Systèmes géothermiques stimulés (EGS, géothermie de grande profondeur)

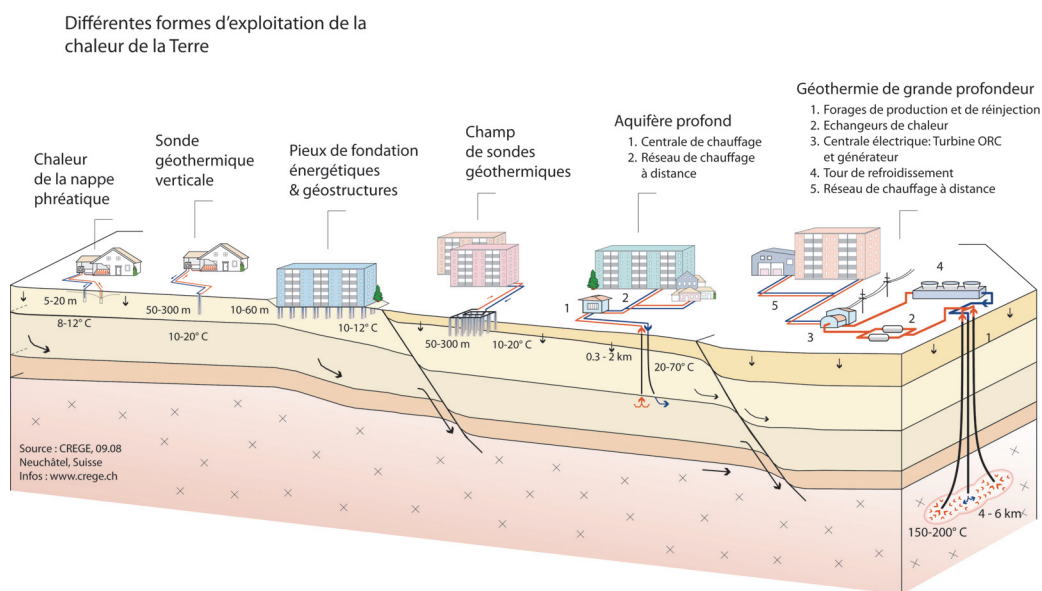


Figure 1-2. Différents types d'exploitation de la chaleur géothermique (CREGE, 2008).

On distingue généralement la géothermie de faible profondeur (systèmes avec une profondeur maximum de 400 m), de la géothermie de grande profondeur. La géothermie de faible profondeur comprend les sondes (horizontales ou verticales) et champ de sondes géothermiques, les géostrutures énergétiques et les aquifères peu profonds. La géothermie de grande profondeur rassemble les aquifères profonds, les sondes de grande profondeur et les systèmes stimulés.

Dans le cadre de cette étude, qui a pour but d'évaluer le potentiel géothermique du canton de Genève, cinq de ces techniques d'exploitation ont été retenues, en fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques prévalant dans le canton.

Les sondes géothermiques verticales (SGV), qui ont débuté il y a plus de 20 ans et qui connaissent un véritable boom en Suisse depuis 10 ans, essentiellement pour le chauffage de villas individuelles, mais également pour le chauffage et le refroidissement de bâtiments de plus grande taille (champs de sondes). Elles représentent une technologie sûre avec un taux de succès très proche de 100%, pour un coût concurrentiel avec les autres énergies de chauffage sur le marché.

Les géostructures énergétiques (GEN), dont le concept a été lancé il y a environ 15 ans, sont de plus en plus utilisées, surtout dans le nord du pays. Il s'agit de profiter d'une structure enterrée à but statique pour l'équiper d'échangeurs de chaleur. Actuellement, ce sont principalement des pieux de fondation.

Les nappes phréatiques (NAP), qui représentent une source de chaleur et de froid à faible profondeur, et possèdent un potentiel important, bien qu'elles soient souvent en concurrence avec leur utilisation pour l'eau potable.

Le **stockage saisonnier de chaleur** dans le sol ou les nappes phréatiques fait déjà partie intégrante de plusieurs de ces systèmes, mais peut également être utilisé pour stocker de la chaleur produite par d'autres moyens que la géothermie, par exemple par des panneaux solaires. Il est encore peu pratiqué sous cette forme en Suisse.

Les aquifères profonds (APR), dont l'exploitation a commencé en Suisse il y a une vingtaine d'années, représentent une ressource encore peu connue, en raison du faible nombre de forages profonds existants. A ce jour, moins de dix réalisations utilisent ce type de ressource. Actuellement, plusieurs projets sont néanmoins en cours d'étude avancée.

Les systèmes géothermiques stimulés (SGS ou EGS « Enhanced geothermal systems »), dont le développement a été freiné récemment en raison des événements sismiques intervenus lors de la stimulation du forage de Bâle et de l'arrêt de ce projet.

Les figure 1-3 et figure 1-4 illustrent les statistiques principales pour la géothermie en Suisse.

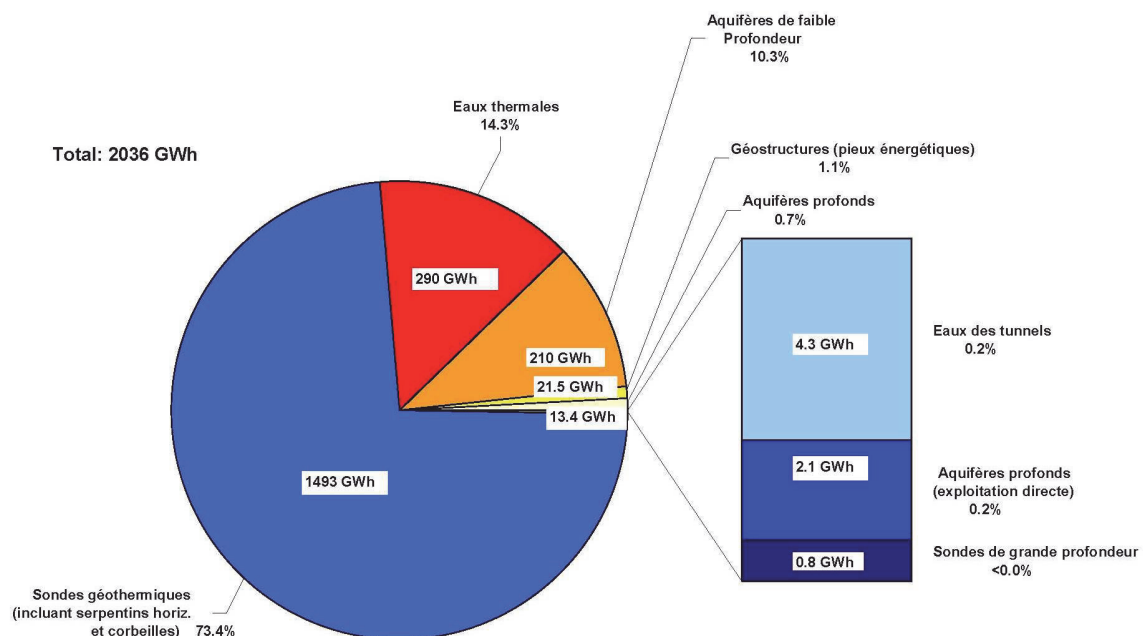


Figure 1-3. Diagramme montrant la part d'énergie de chauffage produite par tous les systèmes géothermiques en 2008 (OFEN, 2009)

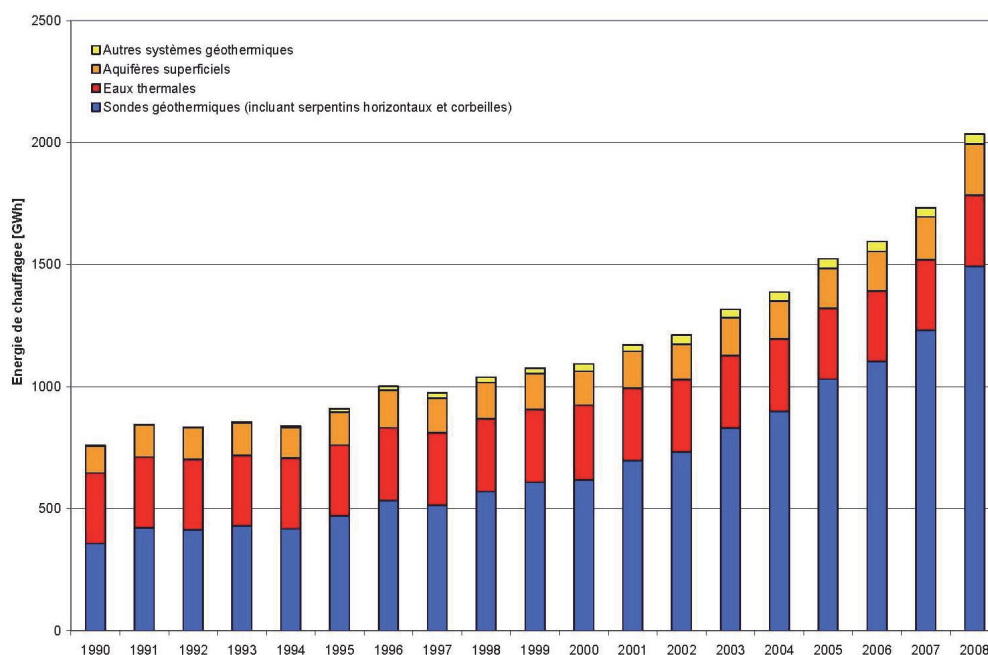


Figure 1-4. Production d'énergie géothermique de chauffage par tous les systèmes depuis 1990 – (OFEN)

A l'heure actuelle, et à l'instar de l'ensemble du pays, un seul mode d'exploitation de la géothermie est largement pratiqué à l'échelle du canton de Genève : les sondes géothermiques verticales (y c. les champs de sondes). Les nappes phréatiques sont utilisées dans de rares cas alors que les premiers exemples de géostructures énergétiques viennent d'être réalisés sur le canton.

Malgré les recherches poussées déjà réalisées (APR - forage de Thônex, 1993), aucune installation de géothermie profonde n'a pu être exploitée à ce jour sur le canton. Cependant des études complémentaires sont en cours.

1.2 Démarche de l'étude

L'étude du potentiel géothermique du canton a été conduite en parallèle dans tous les domaines intéressés. Elle visait à déterminer, de manière générale, les possibilités de recourir à cette ressource renouvelable dans le canton et de procéder à une première quantification énergétique pour chacune des méthodes étudiées. Cette approche globale à l'échelle du territoire a été précisée, selon les cas, en tenant compte de la répartition géographique de la ressource (nappes phréatiques, géostructures énergétiques) et des aspects liés à l'aménagement du territoire (zones construites et zones de développement).

En ce qui concerne les limites géographiques de l'étude, il a été décidé de procéder à une distinction en fonction des deux grands types de géothermie.

Pour la géothermie de faible profondeur, dont le potentiel est à considérer au niveau local, l'extension de l'étude correspond à la limite cantonale.

Pour la géothermie de grande profondeur, il apparaissait évident qu'il y avait plus de sens à la considérer sur un plan régional, tant pour des raisons géologiques que de politique énergétique. La zone d'étude a donc été étendue à l'ensemble du bassin naturel franco-genevois délimité par le Jura, le Vuache et le Salève.

Enfin, il est fondamental de préciser qu'une telle étude globale de potentiel ne peut en aucun cas se substituer aux études de détail nécessaires pour la réalisation de projets spécifiques.

1.3 Contexte local - Distribution et consommation d'énergie

Par sa petite taille et la forte pression démographique existant sur son territoire, de même que sur toute l'étendue de l'agglomération franco-valdo-genevoise, le canton de Genève se prête idéalement au développement de l'exploitation des ressources géothermiques, notamment de grande profondeur. En effet, le grand nombre de projets de développement urbain à l'étude permet d'envisager de façon réaliste l'utilisation de ces techniques en cas de conditions géologiques favorables.

Par ailleurs, la présence sur le canton d'un seul opérateur en charge de la distribution d'énergie (SIG), assure une vue d'ensemble du problème, avec les moyens d'investissement et les techniques nécessaires pour les développements énergétiques à grande échelle, notamment en ce qui concerne les réseaux de chauffage à distance (CAD), mode ouvert aux énergies renouvelables, déjà présents dans plusieurs quartiers et communes et dont plusieurs projets sont en cours. Actuellement surtout alimentés par le gaz naturel, les SIG prévoient à terme un approvisionnement des CAD (existants et en projet) majoritairement assuré par les énergies telles que le solaire thermique, la biomasse, la combustion des ordures ménagères et bien sûr la géothermie.

En ce qui concerne les modes d'exploitation de la géothermie à faible profondeur (sondes, géostructures énergétiques, nappes), le potentiel de consommation est donné par les caractéristiques du bâtiment ou de la construction. La consommation et/ou l'échange d'énergie se fait sur place et il n'y a donc pas de réseau de transport à distance à prévoir.

1.4 Orientation de la politique fédérale et cantonale en matière de géothermie

Notre pays a mené deux programmes de politique énergétique à grande échelle : Energie 2000 (1990 - 2000) et la première phase de SuisseEnergie (2000 - 2010). La deuxième phase de SuisseEnergie est sur le point de débuter (2011 - 2020). Ces programmes visent à augmenter l'efficacité énergétique et à élever la part des énergies renouvelables.

Le concept de SuisseEnergie repose sur une collaboration étroite et de nature partenariale entre la Confédération, les cantons, les communes et les nombreux partenaires issus de l'économie, de l'environnement, des associations de consommateurs, des agences publiques et de l'économie privée. Le programme SuisseEnergie, qui repose sur les objectifs officiels de la politique helvétique en matière d'énergie et de climat joue un rôle de catalyseur de développement de la politique énergétique en Suisse. Sa direction opérationnelle est assurée par l'Office fédéral de l'Energie (OFEN). Un des domaines clés de SuisseEnergie est représenté par le développement des énergies renouvelables.

Les cantons sont les principaux partenaires de SuisseEnergie dans le cadre de ces activités: ils sont chargés de l'application de la législation, doivent harmoniser les prescriptions cantonales, introduire et appliquer des standards d'efficacité novateurs dans le secteur du bâtiment. Enfin, grâce à leurs propres programmes d'encouragement et à leurs services de conseils, ils contribuent notablement à réduire la consommation d'énergie et à accroître la part des énergies renouvelables en Suisse.

Dans sa politique de l'énergie, le canton de Genève a adopté officiellement le principe de la société à 2000 Watts sans nucléaire. Dans les textes définissant les orientations et les objectifs de cette politique (Conception générale de l'énergie et Plan directeur cantonal de l'énergie), il apparaît clairement que l'une des priorités consiste à développer l'utilisation des énergies renouvelables, dont la géothermie.

Le Service cantonal de l'énergie (ScanE) a pour mission la mise en œuvre de cette politique. Son action est menée en collaboration avec divers partenaires, dont le plus important est les SIG, principal fournisseur d'énergie à Genève.

La présente étude, véritable état des lieux des potentialités de la géothermie à Genève s'inscrit parfaitement dans les objectifs définis par le Plan directeur cantonal.

1.5 Présentation du rapport

Le plan du rapport est organisé en trois parties principales.

Tout d'abord la présente introduction, suivie par trois chapitres présentant le canton de Genève dans son contexte géographique et climatique (chapitre 2) puis dans son contexte géologique (chapitre 3), ainsi que les paramètres thermiques et géothermiques à considérer dans le canton (chapitre 4).

Ensuite, quatre chapitres présentent les différentes techniques géothermiques de faible profondeur : le chapitre 5 traite des sondes géothermiques verticales, le chapitre 6 des géostructures énergétiques, le chapitre 7 de l'exploitation thermique des nappes phréatiques et le chapitre 8 du stockage saisonnier.

La géothermie de grande profondeur est abordée dans le chapitre 9 consacré aux ressources en aquifères profonds et aux systèmes géothermiques stimulés.

Chacun des six chapitres traitant des différentes techniques forme un tout, avec une brève présentation du fonctionnement des techniques et leurs conditions d'utilisation avant d'estimer leur potentiel dans le canton. On y trouvera également des conclusions et recommandations spécifiques.

Le chapitre 10 procède à la synthèse de cette étude et aux recommandations générales et finales.

Une partie des éléments du rapport (notamment certaines illustrations générales) a été reprise du rapport PGN - Neuchâtel, aimablement mis à disposition par les auteurs (CREGE).

Le rapport (vol. 1) est accompagné d'une annexe sous forme d'un volume séparé (vol. 2) qui contient les grands tableaux, ainsi que certaines cartes et figures mentionnées dans le texte.

1.6 Organisation de l'étude

Le projet PGG a été financé conjointement par le Service cantonal de l'énergie - ScanE (directeur : M. Olivier Epelly) et les SIG (directeur énergies : M. Pascal Abbet). Les personnes de contact au sein de ces entités ont été M. Roman Naegeli (ScanE) et M. Damien Sidler (SIG).

Les études ont été réalisées par le groupement PGG (Potentiel Géothermique du Canton de Genève) composé de :

- Géotechnique Appliquée Dériaz SA (GADZ), Genève (bureau pilote)
- Centre d'hydrogéologie et de géothermie (CHYN), Neuchâtel
- M. Jules Wilhelm, Ingénieur-conseil, Pully

Au sein du groupement, les tâches ont été réparties comme suit :

- Guillaume Cervera (GADZ), géologue - hydrogéologue : coordination et direction du projet
- Cécile Noverraz (GADZ), géologue dipl. : études pour les sondes géothermiques, les nappes de faible profondeur et le stockage saisonnier.
- Dr. François-D. Vuataz, hydrogéologue et Pierrick Altwegg, géologue (CHYN) : exploitation des aquifères profonds et systèmes géothermiques stimulés.
- Christophe Dériaz et Jean-François Hotellier, ingénieurs géotechniciens (GADZ) : appuis techniques et supervision
- Jules Wilhelm, ingénieur civil : géostructures énergétiques

Les personnes et organismes suivants ont permis d'obtenir des éléments essentiels pour le déroulement de l'étude :

- M. Gilbert Steinmann, ingénieur (Swiss Geo Testing et EPFL) qui a mis à disposition ses résultats de tests de réponse géothermique sur le canton de Genève.
- Le professeur Georges Gorin et Mme Sabrina Paolacci, géologues (Université de Genève - section des Sciences de la Terre) qui nous ont transmis des résultats en leur possession sur l'interprétation sismique des structures géologiques profondes du Bassin genevois.
- Le Service cantonal de géologie, sols et déchets (GESDEC), par l'intermédiaire de son directeur, M. Michel Meyer et de Gabriel de los Cobos, hydrogéologue, qui a mis à notre disposition toutes les informations et données géologiques et hydrogéologiques disponibles au Service.

Le bureau Bernard Matthey, ingénieurs-Conseils SA à Montezillon (NE), nous a également aimablement transmis des informations concernant plusieurs projets auxquels il a participé sur le canton de Genève.

On mentionnera par ailleurs la mise à profit de la base de données géoréférencée des essais de laboratoire de GADZ qui a permis une étude statistique des caractéristiques thermiques des différents sols genevois.

Au cours de l'étude (fin 2009 à fin 2010), des séances régulières ont eu lieu avec le ScanE, les SIG et le GESDEC afin de discuter de l'avancement des travaux et de s'assurer qu'ils correspondent à leurs attentes.

1.7 Bibliographie

EnergieSchweiz, 2008. Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz, 45 pp.

Groupe de travail PGN, 2008. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)*, CREGE 11-88/02, Neuchâtel, 206 pp.

Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC), 2007. *Le climat change – que faire ?* Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l'optique de la Suisse, 52 pp.

Parriaux A, 2006. *Géologie – Bases pour l'ingénieur*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

République et canton de Genève - Département du territoire - Service cantonal de l'Energie (ScanE) - Plan directeur cantonal de l'énergie 2005 – 2009.

Rybach L., Mongillo M., 2006. Geothermal Sustainability – A review with identified Research Needs, GRC Transactions 30, p.1083-1090.

Sites internet

Météo Suisse : <http://www.meteosuisse.admin.ch>

Statistiques cantonales : <http://www.geneve.ch/statistique/>

Energie-atlas (cartes énergies alternatives) : <http://www.energie-atlas.ch>

2. Cadre général du Canton de Genève

2.1 Géographie et Topographie

Le canton de Genève couvre une superficie relativement réduite de 282 km². Il forme une enclave dans le territoire français et partage 100 km de ses frontières avec les départements de l'Ain au Nord et celui de la Haute-Savoie au Sud pour seulement 4,5 km avec le Canton de Vaud. Il possède les deux petites enclaves de Céligny en territoire vaudois. La partie du Lac Léman qui relève du Canton occupe 38 km² (sur 580 km²).

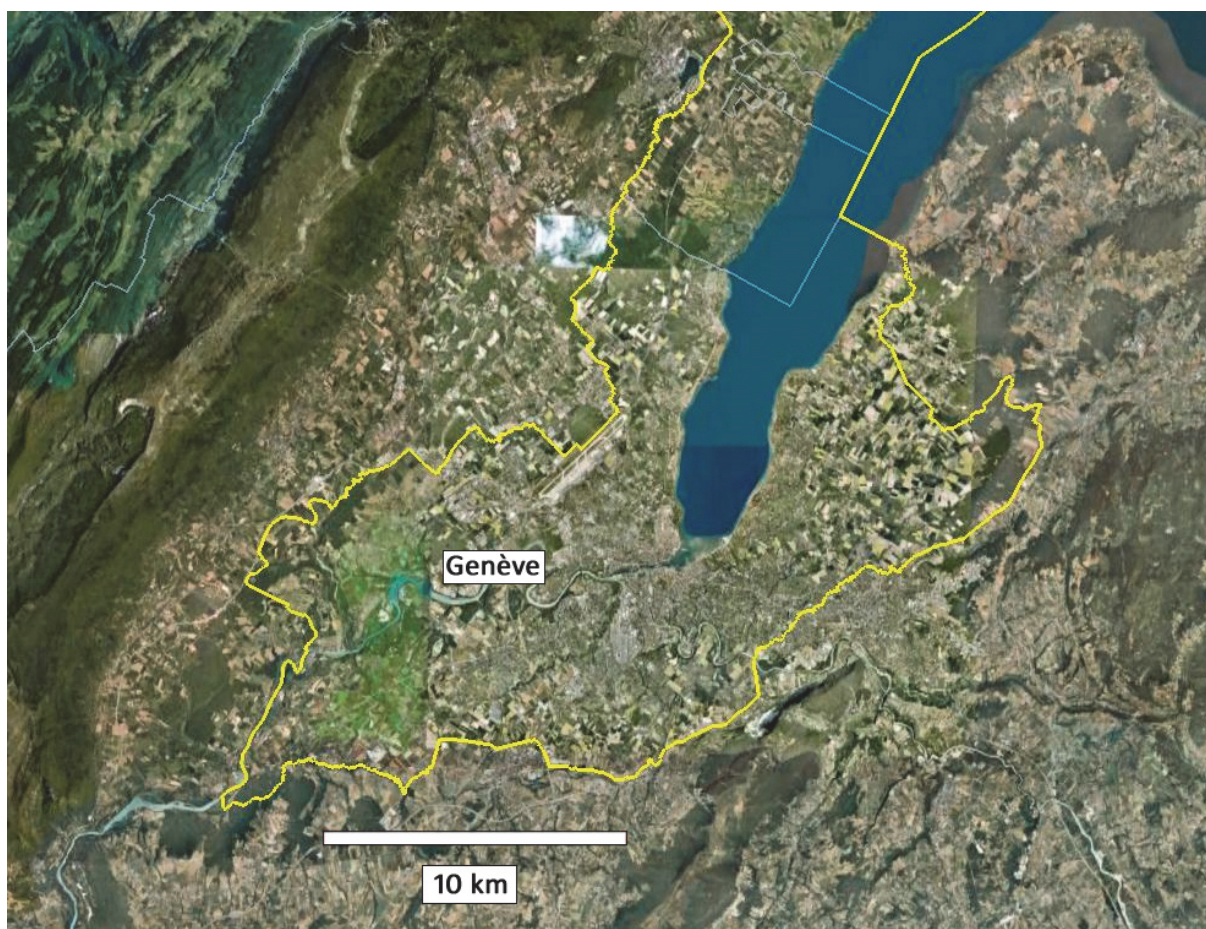


Figure 2-1. Image satellite du Canton de Genève (source : Google Earth)

Le canton est divisé en 45 communes et recense 464'857 habitants en juin 2011, ce qui en fait le canton le plus densément peuplé de Suisse (1648 hab./km²), à l'exception de Bâle-Ville.

On n'y trouve pas de reliefs très élevés, son point le plus haut culminant à 516 m sur la commune de Jussy, alors que son point le plus bas correspond au niveau du Rhône sur la commune de Chancy, à 332 m au-dessus du niveau de la mer. Cependant, Genève est ceinturée par des reliefs montagneux situés sur le territoire français : le Jura, le Salève et le Vuache.

2.2 Climat

Les données climatiques, notamment les mesures de températures, sont très importantes pour l'utilisation de la géothermie de faible profondeur. En effet, les températures extérieures influencent non seulement les températures du sol, mais également les besoins en chauffage.

Le climat genevois est celui du plateau suisse qui est un climat tempéré de transition influencé par les courants humides et tempérés provenant de l'Atlantique, le climat continental humide d'Europe centrale, le climat méditerranéen et le climat montagnard. Sur le plateau, les hivers sont plutôt doux et les étés relativement frais. Les Alpes font effet de barrière climatique, et limitent l'influence du climat méditerranéen dans leur versant nord

Les courants océaniques fournissent également des précipitations relativement abondantes durant toute l'année. Celles-ci se situent généralement entre 1000 et 1500 mm par an.

Le climat est influencé par les courants pouvant provenir de toutes les directions, et dont la fréquence varie suivant les années et les saisons.

Les températures et les précipitations sont mesurées de manière systématique par une station située à Genève-Cointrin depuis 1864, à une altitude de 420 m. Dans le cadre du climat, on utilise le plus fréquemment une norme sur 30 ans, afin d'atténuer l'effet des variations annuelles. La norme actuelle est la moyenne des années 1961-1990.

Selon cette norme, la température annuelle moyenne est de 9,6°C à Genève. Cependant, on peut constater une tendance au réchauffement durant les 20 dernières années (Figure 2-2), ce qui correspond à une tendance générale en Suisse. La moyenne des années 1981-2009 est de 10,5°C.

Du fait que le canton de Genève ne présente que des reliefs relativement peu élevés, on estime généralement que les températures mesurées à la station de Cointrin sont valables pour l'ensemble du canton.

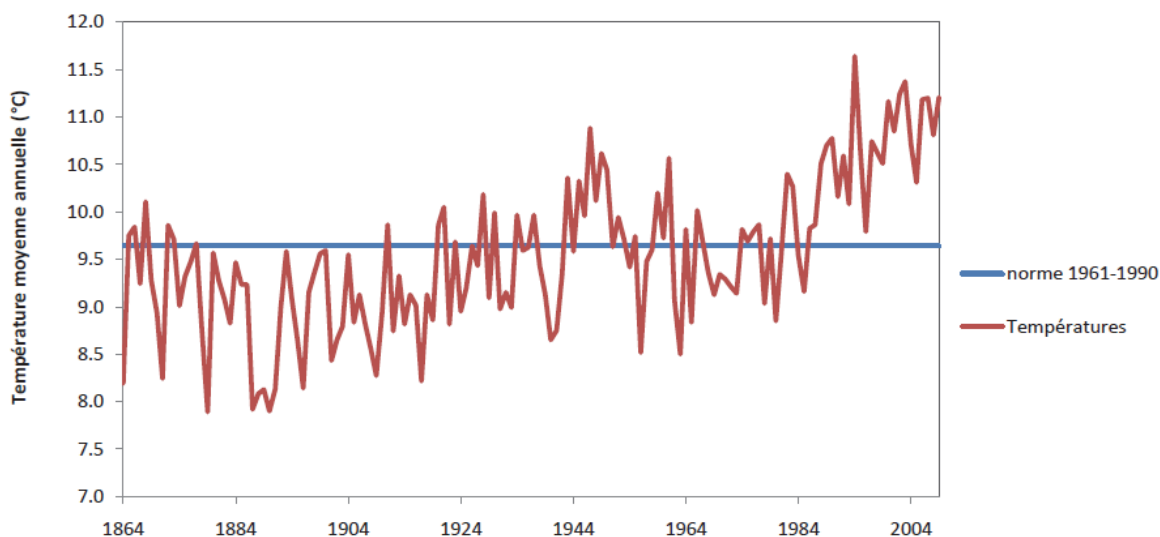


Figure 2-2. Evolution des températures annuelles moyennes à Genève de 1864 à 2009 en comparaison avec la norme 1961-1990 (météo suisse).

2.3 Développement de Genève

Genève connaît depuis plusieurs années une pénurie aiguë de logements : les appartements à louer sont devenus rares alors que la population continue d'augmenter de plus de 5'000 habitants par an.

Le plan directeur cantonal a identifié plusieurs types de mesures pour faire face à cette crise du logement:

- Densifier des terrains en zone villas
- Réaliser des grands projets d'extensions urbaines
- Urbaniser la couronne suburbaine
- Valoriser par renouvellement urbain d'autres secteurs en mutation (PAV, gares CEVA) et y réaliser des zones mixtes (activités et logement) et de pôles de développement.

Genève est en ce moment dans une phase de développement urbain considérable : en termes de potentiel de logement et d'activité, il existe actuellement environ 500 projets planifiés sur le canton.

Certains sites, particulièrement porteurs d'avenir pour l'ensemble du Bassin genevois font l'objet d'un périmètre d'aménagement coordonné (PAC) en vue d'y effectuer une planification particulièrement attentive, notamment en terme d'approvisionnement en énergie.

Treize PAC sont recensées dans le plan directeur cantonal. Quatre concernent des projets de restructuration urbaine, six portent sur des extensions urbaines en périphérie d'agglomération et enfin les quatre derniers nécessitent une coopération transfrontalière (Figure 2-3).

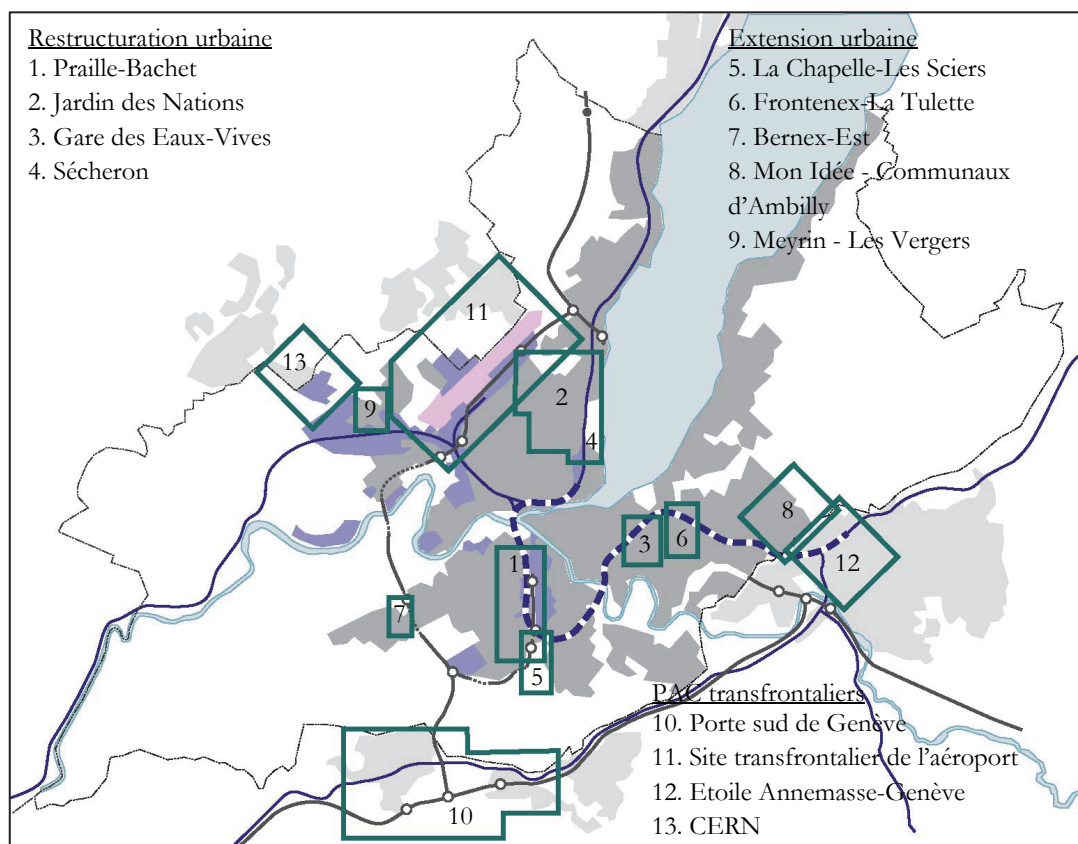


Figure 2-3 . Les périmètres d'aménagement coordonnés du canton de Genève

Comme le territoire genevois est contraint de manière importante par les frontières avec la France, le lac Léman et les reliefs qui l'entourent, il est important de planifier autant que possible les développements futurs afin d'utiliser de manière optimale l'espace limité.

Le projet d'agglomération franco-valdo-genevois se place dans ce contexte (www.projet-agglo.org) avec ses 50 000 travailleurs transfrontaliers et ses 208 communes soit près de 860 000 habitants (Figure 2-4).

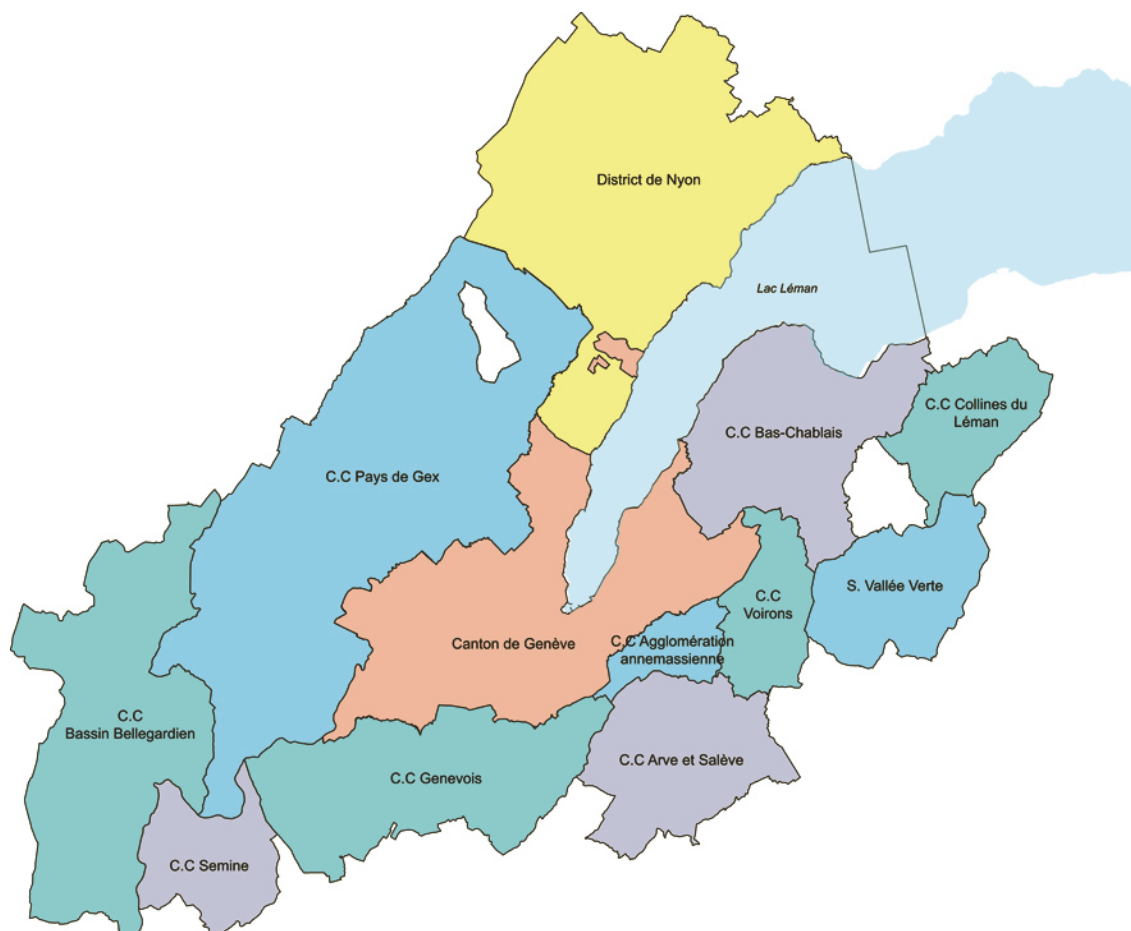


Figure 2-4 . Les territoires du Projet d'agglomération (DAT, Genève)

Dans ce contexte général, le canton est également en pleine phase de développement de son réseau de transport, notamment de l'extension de son réseau de tram. A l'échelle de l'agglomération, la liaison ferroviaire Cornavin - Eaux-Vives - Annemasse (CEVA) est sur le point de débiter. Au-delà de sa fonction de voie de communication, ce projet est également un moteur pour divers projets à proximité de ses futures gares.

2.4 Contraintes territoriales pour la géothermie

Le territoire genevois est limité dans sa superficie et la densité de population et d'habitations est souvent très importante. De ce fait les possibilités de réaliser des aménagements géothermiques sont en partie dépendantes du bâti existant.

En ce qui concerne la géothermie de faible profondeur, les contraintes territoriales peuvent néanmoins être considérées comme peu importantes pour tout ce qui concerne les projets de nouvelles constructions.

La phase de chantier permet en effet de disposer de l'espace suffisant pour procéder aux aménagements géothermiques.

Pour le bâti existant, la situation est plus contrastée. Dans les zones non urbaines ou périurbaines, où des espaces existent encore, une rénovation des systèmes énergétiques est en général possible, sans la reconstruction des bâtiments.

En zone urbaine, la transition vers l'utilisation de la géothermie de faible profondeur n'est possible, dans la plupart des cas, qu'en parallèle avec le renouvellement du bâti, en profitant de la phase de chantier.

Pour la géothermie de grande profondeur, la situation est différente avec notamment des chantiers de grande ampleur en termes de durée et d'impact sur le voisinage, impliquant la nécessité de bien étudier les sites potentiels d'implantation en surface (voir chap. 9).

Par ailleurs, les situations urbaines impliquent le plus souvent plusieurs exploitations du sous-sol qui ont la possibilité d'entrer en conflit les unes avec les autres. Il s'agit alors de trouver des compromis et de planifier avec soin les diverses installations et exploitations de celui-ci.

A titre d'exemple, on peut citer les conflits possibles suivants :

- Sondes géothermiques et constructions souterraines existantes ou en projet (galeries, tunnels, réseaux divers, etc.)
- Installations géothermiques et nappes d'eau potable
- Installations géothermiques et zones d'extraction (gravières inscrites au plan directeur)
- Influence thermique de champs de sondes voisins
- Influence hydrogéologique et hydrothermique de pompages et rejets voisins
- Influence hydrogéologique de pompages et rejets sur des bâtiments existants (variation des niveaux d'eau).

Cette problématique de la dimension souterraine de l'aménagement du territoire a été identifiée comme étant de plus en plus critique et fait l'objet d'un projet national de recherche (Deep City, EPFL).

Il est à noter que les éléments du développement souterrain du canton font l'objet d'un cadastre consultable en ligne sur le guichet cartographique du canton (cadastre technique du sous-sol). Certaines de ces données peuvent toutefois être d'accès limité devant alors faire l'objet d'une demande spécifique.

2.5 Prescriptions fédérales et cantonales pour la géothermie

Le présent chapitre concerne essentiellement les applications de la géothermie à faible profondeur. Pour la grande profondeur, les projets sont moins courants et chaque cas doit faire l'objet d'un examen détaillé.

Fin 2010, au niveau fédéral, l'exploitation de la chaleur tirée du sous-sol est régie uniquement par les lois et ordonnances sur la protection des eaux.

Constitution fédérale du 18 avril 1999

En vertu de son article 76, la Confédération fixe les principes applicables à la conservation et à la mise en valeur des ressources en eau, à l'utilisation de l'eau pour la production d'énergie et de refroidissement, et à d'autres interventions dans le cycle hydrologique ; en outre, elle légifère notamment sur la protection des eaux.

En revanche, en vertu de l'art.76, al.4, ce sont les cantons qui disposent des ressources en eau. Il leur incombe donc d'autoriser l'exploitation de celles-ci en concédant des droits d'utilisation.

Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux - 1991)

Elle définit les principes de base pour la protection des eaux, notamment :

- Elle comprend un devoir de diligence : chacun doit s'employer à empêcher toute atteinte nuisible aux eaux en y mettant la diligence qu'exigent les circonstances
- Elle définit la notion de « pollution » comme étant notamment une altération nuisible des propriétés physiques de l'eau
- Elle interdit de polluer les eaux
- Elle exige une autorisation cantonale pour les constructions, installations, fouilles, terrassements et autres travaux exécutés dans des secteurs particulièrement menacés, lorsqu'ils sont de nature à mettre en danger les eaux
- Elle interdit la création de communications permanentes entre des nappes souterraines si une telle intervention peut diminuer les réserves en eaux souterraines ou altérer leur qualité
- Elle fixe les principes de base pour les mesures d'aménagement du territoire liées à la protection des eaux (secteurs, zones et périmètres de protection).

Ordonnance fédérale sur la protection des eaux (OEaux, 1998)

Elle concrétise les principes énoncés dans la LEaux.

De plus, dans son annexe 2, ch. 21, elle pose les exigences générales concernant la qualité des eaux souterraines. Selon l'al. 3, l'apport ou le prélèvement de chaleur ne doit pas modifier la température des eaux souterraines de plus de 3°C par rapport à l'état naturel.

Aide à l'exécution de l'office fédéral de l'environnement (OFEV) : Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol (2009)

Comme souvent dans la législation environnementale, les articles juridiques ne permettent que partiellement leur application claire et surtout uniforme sur le terrain, les notions étant souvent générales et vagues.

Cette publication concrétise ainsi des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et favorise ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. Il s'agit donc d'un document de référence de très grande importance, fixant notamment les exigences de base et spécifiques pour la réalisation des différents types de systèmes géothermiques.

Législation cantonale

En premier lieu, on citera la Loi sur l'énergie (LEn ; L 2 30) qui fixe le cadre général de l'approvisionnement énergétique du canton et de son utilisation rationnelle. Elle vise notamment au développement prioritaire de l'exploitation des sources d'énergie renouvelables, dont la géothermie. Elle fait l'objet d'un règlement d'application (Règlement d'application de la Loi sur l'énergie ; REEn ; L 2 30.01).

En 2010, dans le canton de Genève, plusieurs textes législatifs s'appliquent, à divers titres, à la problématique de la réalisation de systèmes géothermiques, le plus souvent de faible profondeur :

- Loi sur les eaux (LEaux-GE ; L 2 05)
- Règlement d'exécution de la loi sur les eaux (REaux-GE ; L 2 05.01)
- Règlement sur l'utilisation des eaux superficielles et souterraines (RUESS ; L 2 05.04)
- Loi sur les constructions et les installations diverses (LCI - L5 05)
- Règlement d'application sur les constructions et les installations diverses (L 5 05.01)
- Règlement d'application de l'ordonnance fédérale relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (ROEIE).

En résumé, il ressort des textes cantonaux que les collecteurs de chaleur au sens large, sont des installations pour lesquelles il faut procéder à une requête en autorisation de construire auprès du Département des constructions et des technologies de l'information, conformément à la LCI. C'est dans le cadre de cette procédure que le Service cantonal de géologie, sols et déchets (GESDEC) sera amené à donner son préavis voire à émettre d'éventuelles réserves. Les réserves et interdictions concernent essentiellement le domaine de la protection des eaux.

Il est par ailleurs obligatoire d'assurer un suivi géologique des opérations avec un rapport à remettre au GESDEC.

Ces points seront repris de façon plus spécifique dans les chapitres traitant des différents systèmes géothermiques.

Pour ce qui concerne la géothermie de grande profondeur, les bases légales concernant le sous-sol sont lacunaires à Genève, comme d'ailleurs dans tous les cantons suisses.

Une adaptation de la loi sur les mines (LMines ; L 3 05) et de son règlement d'application (RMines ; L 3 05.01) est actuellement en discussion en vue de remédier à cette situation.

En résumé, pour la géothermie de faible profondeur, le cadre juridique est bien établi et permet de définir clairement les démarches et études nécessaires en vue des demandes d'autorisation.

Dans certains cas, ces opérations sont simples (sondes géothermiques, géostructures énergétiques), à moins de cas particuliers, la faisabilité juridique pouvant être validée rapidement sur la base de documents existants (cartes d'autorisation).

Dans d'autres cas, elles seront plus complexes (nappes phréatiques) car la faisabilité juridique sera dépendante des résultats des investigations préliminaires.

Pour la grande profondeur, le cadre juridique n'est pas encore suffisamment défini rendant la démarche plus complexe. Les demandes de concession sont appréciées au cas par cas.

Dans tous les cas, les installations géothermiques d'une puissance supérieure à 5 MW sont soumises à une étude d'impact sur l'environnement.

2.6 Bibliographie

Bader S., Kunz P., 1998. *Climat et risques naturels – La Suisse en mouvement*, Rapport Scientifique final PNR 31, PGeorg Editeur.

Blunier P., 2009. *Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain*, thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 258 pp.

Deep City : ressources du sous-sol et développement durable des zones urbaines ; PNR 54, cahier thématique n°2, août 2010, pp 30-32.

Statistique Genève, 2009. *Annuaire statistique du Canton de Genève*, Office cantonal de la statistique, Genève

Sites internet

Météo Suisse : <http://www.meteosuisse.admin.ch>

Ville de Genève : <http://www.ville-ge.ch>

Statistiques cantonales : <http://www.geneve.ch/statistique/>

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Genève

Canton de Genève, aménagement du territoire: <http://etat.geneve.ch/dt/amenagement/>

Projet d'agglomération franco-valdo-genevois : <http://www.projet-agglo.org/>

Législation cantonale : <http://www.gc.ch/legislation/>

Logiciels

Google Inc., 2009. Google Earth (Version 5.2.1.1588). Disponible sur <http://www.google.fr/intl/fr/earth/download/ge/>

3. Géologie du Canton de Genève

3.1 Introduction

L'évaluation d'un potentiel géothermique doit s'appuyer sur une bonne connaissance géologique du territoire concerné. En effet, la lithologie du sous-sol aura une influence sur les types d'installations qui pourront y être implantés (faisabilité technique) ainsi que sur leur dimensionnement.

Les terrains molassiques (tertiaire) et quaternaires (glaciaires et plus récents) auront une grande influence sur les installations géothermiques de faible profondeur (jusqu'à 400 m de profondeur), alors que la géothermie de grande profondeur (plusieurs milliers de mètres) exigera une connaissance particulière des roches plus anciennes primaires et secondaires, ainsi que de la tectonique régionale.

La géologie genevoise est principalement marquée par l'effet de l'orogénèse alpine et des glaciations quaternaires subséquentes. Le canton fait en effet partie du Bassin Molassique, qui s'étend de la France à l'Allemagne sur 800 km, limité au Nord par la chaîne du Jura et au Sud par les Alpes et les Préalpes. Ce Bassin est en fait le Bassin d'avant-pays alpin, formé par le poids de la chaîne alpine en progression, et rempli de sédiments qui sont le résultat de la fermeture de la Téthys¹ et de l'orogénèse alpine.

3.2 Le Soubassement rocheux

3.2.1 Les formations primaires et secondaires (paléozoïque et mésozoïque)

Le Bassin genevois est limité par des reliefs (Jura, Vuache et Salève) qui correspondent à des structures tectoniques élevées par plissement et chevauchement il y a environ 5 à 10 millions d'années, suite à la poussée alpine. Ces structures font apparaître des couches de calcaires et de marnes déposées sur une plate-forme marine au cours du Jurassique et du Crétacé (ère secondaire, entre -200 et -60 millions d'années). Cette plate-forme se situait sur la marge passive de la mer alpine, qui séparait l'Afrique de l'Europe (Wildi, 1997). Cette sédimentation s'est arrêtée il y a environ 70 millions d'années et une partie des couches du Crétacé supérieur a été érodée par la suite. Les formations Jurassiques reposent sur des roches évaporitiques du Trias qui ont agi comme zone de décollement lors de la formation de la chaîne jurassique (Sommaruga, 1997).

Les calcaires mésozoïques contiennent plusieurs formations aquifères, potentiellement intéressantes pour la géothermie de grande profondeur. Du moins profond au plus profond les formations aquifères potentielles se trouvent dans le Crétacé, le Malm, le Dogger, le Lias et le Trias (Baujard et al., 2006), (Figure 3-1).

¹ Téthys : Mer située, durant les ères secondaires et tertiaires entre l'Eurasie et l'Afrique, en partie à l'emplacement approximatif de l'actuelle Méditerranée.

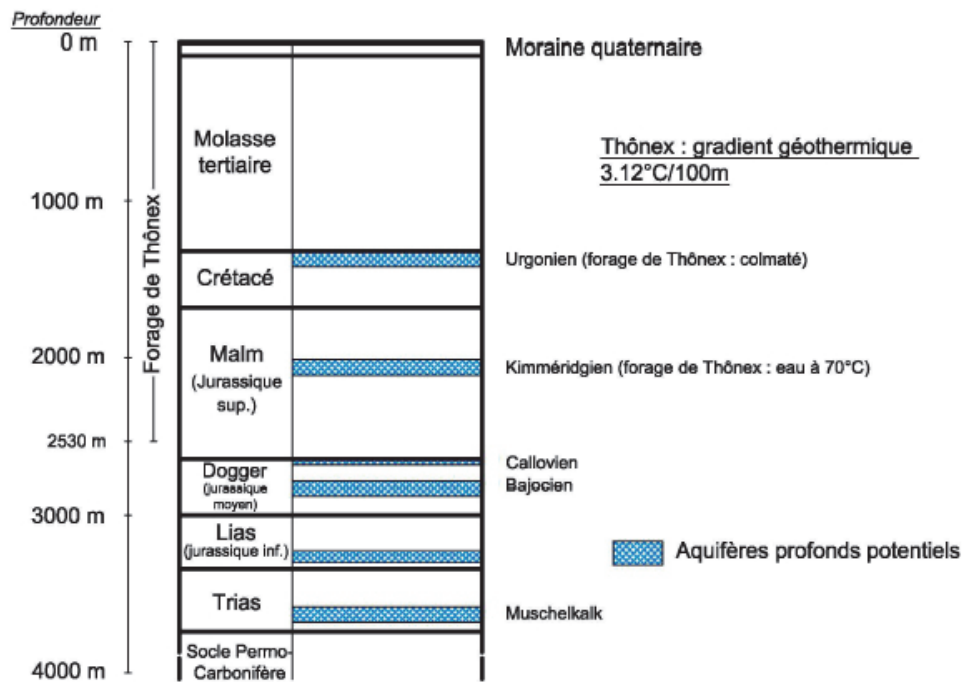


Figure 3-1. Stratigraphie profonde schématique (région de Thônex)

Les roches jurassiques et crétacées qui affleurent sur les reliefs entourant le Bassin genevois, se retrouvent en profondeur sous celui-ci et recouvrent avec une épaisseur de l'ordre de 2'500 à 3'000 m le socle (socle cristallin primaire s.s. et sédiments détritiques datant du Permo-Carbonifère), dont la profondeur est estimée entre 3.5 et 4 km. Ce socle, dont la température est supérieure à 100 °C, représente un potentiel géothermique très important (production de chaleur et d'électricité). Cependant, sa perméabilité en général faible à moyenne nécessite une stimulation du réservoir pour rendre le système économique.

Le sommet du Mésozoïque accuse un pendage vers le SE (Figure 3-2, Charollais et al., 2007). De par ce pendage, la profondeur à laquelle les rares sondages profonds l'ont atteint varie sur le canton de Genève de 300 m dans le secteur de La Plaine et sur le site du CERN, à plus de 1'300 m à Thônex.

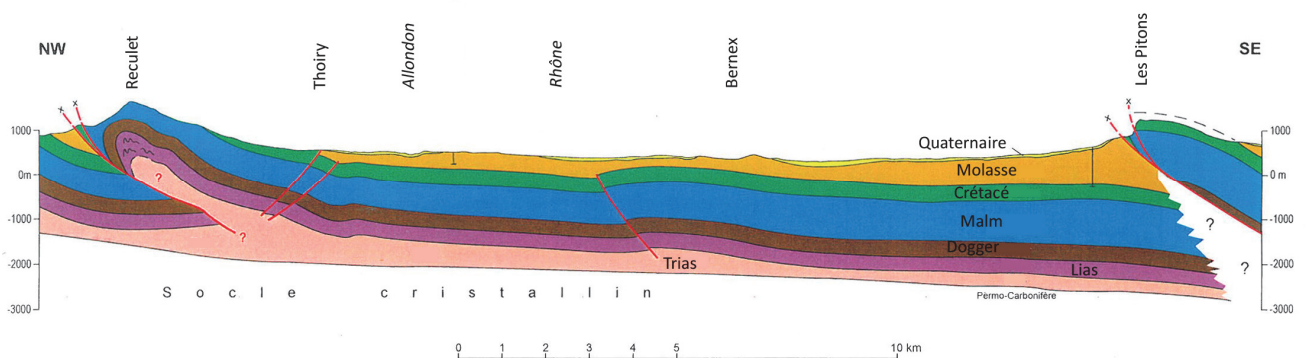


Figure 3-2. Coupe du Bassin genevois (Charollais, 2007)

3.2.2 La Molasse Tertiaire

Superposée aux couches mésozoïques se développe une épaisse formation sédimentaire détritique appelée la Molasse. Durant l'ère tertiaire, entre -65 et -2 millions d'années, les Alpes en formation ont été le siège d'une érosion très active et les produits de cette érosion, déposés dans le Bassin d'avant-pays suisse, ont formé la Molasse après diagenèse². Celle-ci est principalement constituée de grès à ciment calcaire ou argileux, de marnes et, plus rarement à Genève, de conglomérats. Ces roches sont généralement bien compactées et de faible porosité, pour une épaisseur d'environ 300 à 1'300 m dans le sous-sol genevois, avec un épaississement régulier en direction du Sud-est (Figure 3-2; Wildi, 1997, Charollais, 2007).

En Suisse, la Molasse peut être divisée en quatre niveaux selon le milieu et l'âge relatif de déposition : Molasse d'eau douce et Molasse marine (ou saumâtre) inférieures et Molasse d'eau douce et Molasse marine supérieures (Charollais, 2007). A Genève, on ne retrouve pratiquement que la Molasse d'eau douce inférieure car les éléments supérieurs ont été érodés par l'avancée glaciaire (Signer et Gorin, 1995 ; Charollais, 2007). Quant à la Molasse marine inférieure, qui lui est antérieure, on ne la rencontre que dans la Molasse subalpine (voir plus loin). Les formations molassiques dans le Bassin genevois sont, de bas en haut :

- Le Sidérolithique, des quartzarénites datant du Priabonien (40-33 Ma), la Gompholite (ou Poudingue de Mornex), conglomérats du Rupélien supérieur – Chattien inférieur, et les Calcaires d'eau douce inférieurs, du Chattien moyen. Ces 3 formations basales restent cependant anecdotiques, et bien que leur épaisseur puisse atteindre plusieurs dizaines de mètres, elles restent peu importantes comparées aux couches supérieures.
- Les Marnes et Grès bariolés, ou Molasse rouge genevoise, du Chattien moyen et supérieur ; composés essentiellement de marnes et de grès. Cette formation doit son nom à la fréquente prédominance de la couleur lie-de-vin. Son épaisseur est importante et varie entre 250 et 955 m. Dans la région de Dardagny - Satigny, ils contiennent des niveaux riches en hydrocarbures (grès bitumineux).
- Les Grès et Marnes gris à gypse du Chattien sommital – Aquitanien basal ; cette formation est caractérisée par une lithologie complexe comprenant des marnes grises, des calcaires et des grès déposés en milieu lacustres et palustres, des dolomies et évaporites (gypse, anhydrite) d'origine continentale avec parfois de minces couches de charbon. Cette formation est bien développée dans le Bassin genevois et atteint au moins 300 m d'épaisseur dans le forage de Thônex.
- La partie inférieure de « l'Aquitanién auct. » ou Molasse grise de Lausanne (Charollais et al., 2007). Cette formation n'apparaît que rarement (S-E du canton) et sur de faibles épaisseurs.

Compte tenu de la faible quantité de fossiles dans la Molasse, la datation de ces différentes formations est encore amenée à évoluer, au gré des études géologiques.

Par simplification, on ignore souvent les unités de faible épaisseur, et on subdivise la Molasse genevoise en « Molasse rouge », signifiant les Marnes et Grès bariolés et « Molasse grise », correspondant aux Grès et marnes gris à gypse.

Une partie de la Molasse a été remaniée en écaillés chevauchantes par l'avancée des Préalpes. On la nomme alors « Molasse subalpine ». Elle se retrouve principalement dans le SE du canton et est constituée de Molasse marine inférieure, de Marnes et grès bariolés, et de Molasse aquitanienne remaniées (Charollais, 2007).

D'un point de vue hydrogéologique, la Molasse est globalement considérée comme non aquifère. Des circulations d'eau peu importantes sont toutefois observées dans les niveaux de grès grossiers ou dans des

² Diagenèse : ensemble des processus qui affectent un dépôt sédimentaire et le transforment progressivement en roche sédimentaire solide.

niveaux de fractures. Elles peuvent être toutefois plus importantes dans les calcaires inférieurs s'ils sont fracturés ou karstifiés (Charollais, 2007).

La figure 3-3 donne une représentation géologique du toit de la Molasse dans le Bassin franco-genevois.

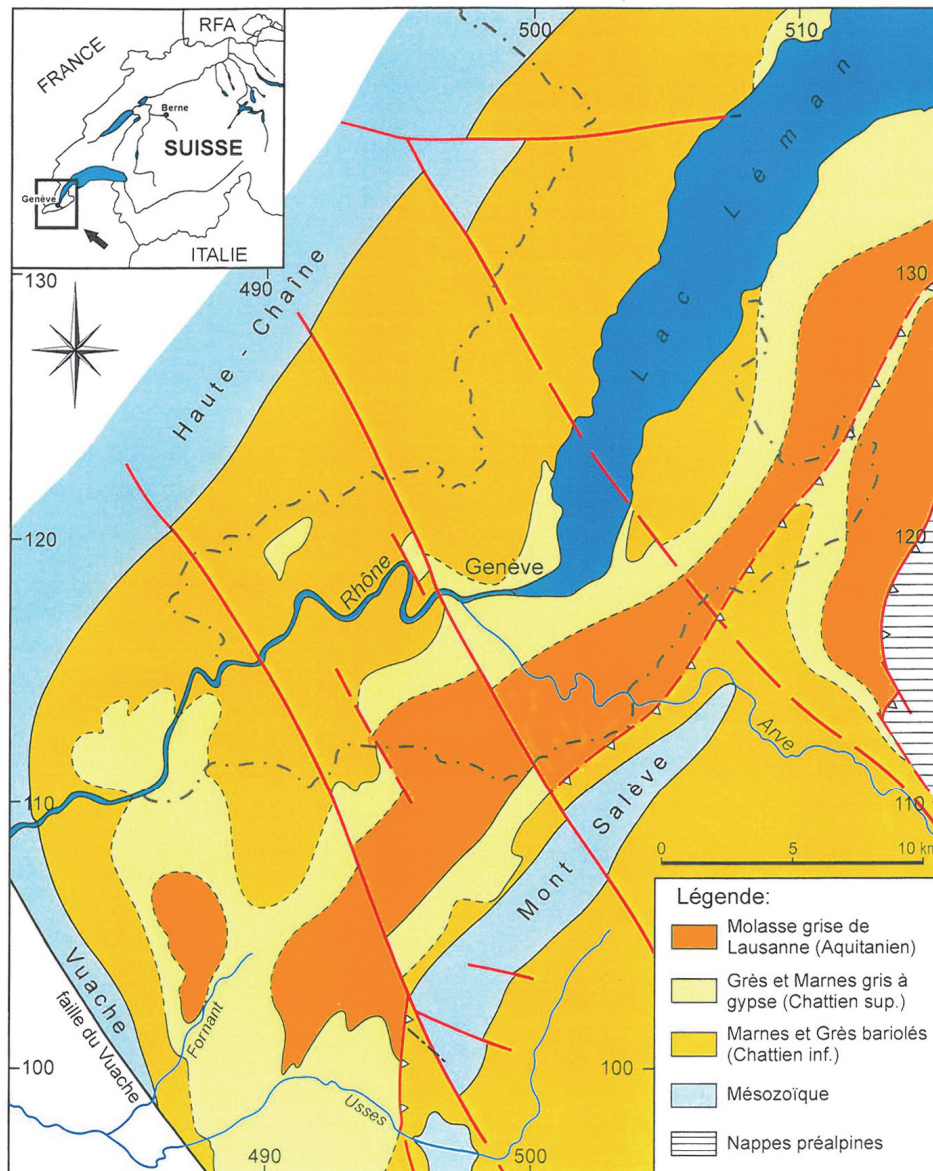


Figure 3-3. Carte géologique schématique (sans Quaternaire) du Bassin franco-genevois et des régions voisines (Charollais, 2007)

La topographie de la surface de la Molasse sous le Bassin genevois est caractérisée par des sillons et des buttes orientées SW-NE qui reflètent également la topographie du toit du Mésozoïque sous-jacent. Ces anticlinaux et synclinaux sont probablement dus à la phase tardive de plissement alpin (Miocène-Pliocène, il y a environ 20 millions d'années). Localement, cette ancienne topographie a été altérée et érodée par l'action des glaciers et des rivières (Signer et Gorin, 1995). A l'heure actuelle, ces reliefs sont recouverts et souvent estompés par les terrains du Quaternaire, d'abord du Pléistocène (glaciations), puis de l'Holocène (postglaciaire, depuis environ 10'000 ans ; Wildi, 1997). Deux phases glaciaires ont rempli les anciennes vallées de dépôt glaciaires, et leur épaisseur totale peut dépasser 150 m. Au sommet des anciennes collines, les reliquats glaciaires sont par contre beaucoup plus ténus ou même inexistantes et la Molasse y est affleurante, comme par exemple au coteau de Bernex (Amberger, 1971).

3.2.3 Tectonique genevoise

La tectonique de la région genevoise est déterminante pour la recherche de sites propices à la géothermie de grande profondeur. En effet la perméabilité des formations aquifères Jurassique est dépendante des fractures, et pour augmenter les chances de productivité d'un aquifère les forages doivent autant que possible se faire à proximité de failles.

La région genevoise est dominée par des linéaments tendant SW-NE et NW-SE, qui ont été réactivés à plusieurs reprises jusqu'à l'actuel (Figure 3-4).

Les linéaments SW-NE coïncident avec le front des massifs subalpins, les unités des Préalpes, et le front du Salève, et sont marqués par des demi-grabens permo-carbonifères. Des indices sédimentaires et tectoniques indiquent que ces structures ont été réactivées à plusieurs reprises, en particulier durant la fin de l'orogénèse alpine.

Les linéaments NW-SE relient le Jura au front alpin : longtemps cartographiés comme failles décrochantes dans les affleurements mésozoïques autour de Genève, on peut les retrouver avec certitude en subsurface, en particulier les décrochements du Vuache, de Cruseilles du Coin et de l'Arve. Actifs depuis le Permo-Carbonifère jusqu'à l'actuel, ils s'expriment le plus souvent par des culminations liées à des structures « en fleur » au niveau du sommet du Mésozoïque.

A part ces linéaments liés au socle, on observe également des flexures anticlinales et synclinales dans la série mésozoïque-cénozoïque du Bassin genevois. Celles-ci sont orientées SW-NE et de faible amplitude, et semblent liées à la fin de l'orogénèse alpine. Les coteaux molassiques typiques de la cuvette genevoise correspondent à ces structures anticlinales (Signer et Gorin, 1995).

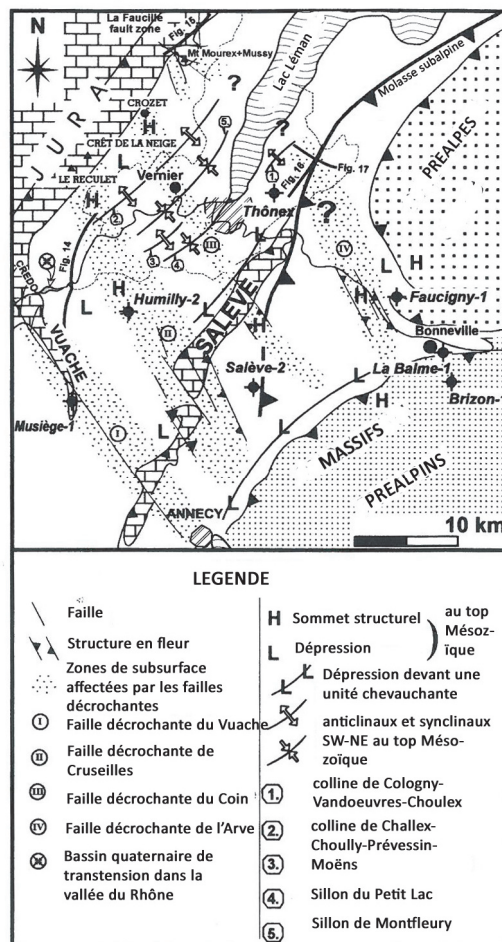


Figure 3-4. Principales failles et décrochements du Bassin genevois (d'après Signer et Gorin, 1995)

3.3 Le Quaternaire

Le Quaternaire à Genève est marqué par les avancées et reculs des glaciers, qui ont recouvert en grande partie le Bassin molassique jusqu'à une altitude de plus de 1200m (Moscariello et al., 1998). Ceux-ci ont pris leur origine dans les Alpes et sur les crêtes du Jura. Les températures étant très inférieures à celles qui règnent actuellement, la zone d'accumulation s'étendait à basse altitude et les langues de glace s'avançaient jusqu'à la région de Lyon (Wildi, 1997, Moscariello, 1997).

Le Bassin genevois présente les dépôts d'au moins deux cycles glaciaires, que l'on attribue au Riss et au Würm, deux périodes glaciaires dont les maximums sont généralement datés respectivement à -200'000 et -18'000 ans. Des témoins de cycles antérieurs pourraient néanmoins être présents dans certains sillons (Wegmüller et al., 1995). A l'opposé, dans le Petit Lac, le long de l'axe de la cuvette genevoise jusqu'à Laconnex, les sédiments d'un seul cycle sont préservés et reposent par un contact érosif sur les termes antérieurs (Moscariello et al., 1998).

Dans le Bassin genevois, on peut diviser les terrains quaternaires en plusieurs unités en fonction de l'avancée et du retrait des glaciers (Figure 3-5 ; Amberger, 1971). On distingue ainsi, de bas en haut :

- La moraine rissienne comporte à sa base des sédiments graveleux et sableux, comparables à la formation de l'Alluvion ancienne, sur une plus faible épaisseur. La moraine rissienne sensu stricto est composée de limons peu ou moyennement argileux à blocs et cailloux. Quelques lentilles non caillouteuses, semi-stratifiées, se retrouvent également. Au sommet de la série on trouve par endroit des chenaux graveleux, probablement dus à la présence de glace morte.
- Le retrait rissien est le plus souvent composé de limons peu argileux, plus ou moins sableux, à rares petits cailloux. Il se termine par un niveau graveleux très semblable à l'Alluvion ancienne : seule la présence d'une phase interglaciaire permet de les distinguer si les deux sont en contact. Il est possible qu'une partie de la formation « Alluvion ancienne » soit en fait attribuable au retrait rissien.
- Les formations rissiennes se retrouvent principalement dans les sillons molassiques profonds de Montfleury, ainsi que dans la région autour de Troinex et dans celle d'Anières (Figure 3-5)
- La formation interglaciaire riss-würm : cette période correspond à une phase d'érosion et de remaniement des moraines en place, et à la déposition de terrains très hétérogènes, avec accumulation de gros blocs. Ces formations sont surmontées par des sables et limons à lignite, eux-mêmes surmontés par des niveaux de limons argileux rubanés.
- L'« Alluvion ancienne » représente le terme basal de la moraine Wurmienne. Elle est formée d'une grande épaisseur de graviers, sables et graviers sableux. Elle constitue par exemple les falaises de Champel au bord de l'Arve ou les falaises de St-Jean au bord du Rhône.
- La moraine würmienne à proprement parler présente des faciès extrêmement variés. Elle est composée de limons argileux à cailloux et à blocs avec beaucoup de variations lithologiques. Des lentilles d'argiles limoneuses feuilletées et d'argiles limoneuses massives sans cailloux recourent régulièrement cette moraine.
- Le retrait würmien commence en général par une formation argilo-limoneuse stratifiée ou varvée puis s'épaissit en passant à des limons et des sables et finalement à des graviers.
- Les formations récentes comprennent les dépôts lacustres, les alluvions récentes, les dépôts de ruissellement et enfin la couverture végétale et les remblais. Elles ne dépassent généralement pas quelques mètres d'épaisseur et sont peu consolidées.

L'épaisseur totale des formations quaternaires est très variable, oscillant entre 0 et 180 m.

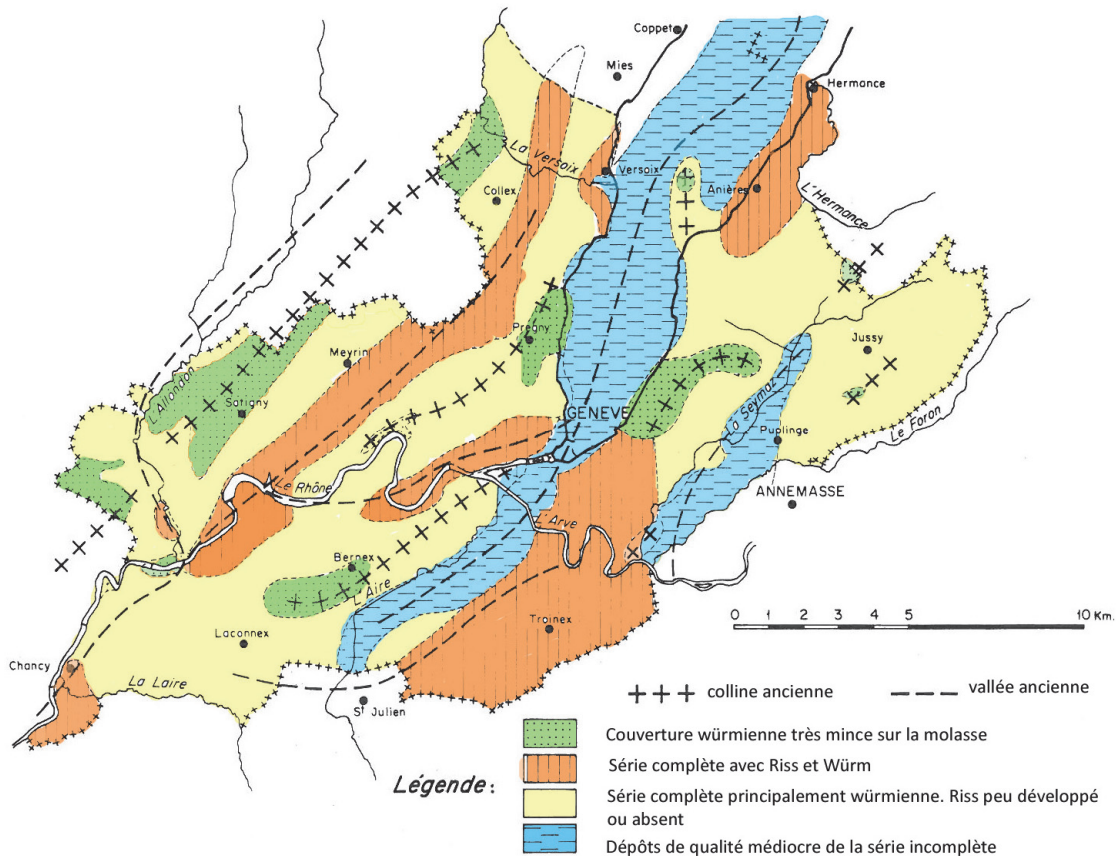


Figure 3-5. Carte schématique des formations quaternaires sur la Molasse (d'après Amberger, 1971)

De façon générale, l'étendue latérale de ces formations est relativement limitée. La moraine würmienne est la seule formation que l'on retrouve pratiquement sur toute la surface du canton. La formation graveleuse de l'Alluvion ancienne contient les principaux aquifères du canton, limités par les formations molassiques et morainiques et les terrains de retrait qui sont très peu perméables.

3.4 Classification genevoise des sols

Une classification systématique pour les sols genevois s'est développée dans la deuxième moitié des années 1960, avec un profil type de la cuvette genevoise, afin d'uniformiser l'appellation des sols. A ce jour, ce sont près de 15'000 sondages de reconnaissance qui ont été réalisés sur Genève et qui s'y réfèrent. Ce classement constitue une description pratique des sols que l'on retrouve dans le Bassin genevois.

Le classement des différents terrains est basé sur la subdivision en phases granulométriques des principaux horizons géologiques. Il repose sur l'analyse statistique des résultats de plusieurs milliers d'essais de laboratoire et de près de 50 ans de pratique. La classification permet d'identifier clairement un sol, de prévoir son comportement sous l'effet des sollicitations qui lui seront appliquées et propose un mode de classement unifié utilisable par chacun (Fontana, 1973).

La classification est ainsi composée d'un numéro définissant la couche géologique, d'une lettre précisant la granulométrie, et d'un numéro final qui indique la compacité ou la consistance du sol. Pour les terrains molassiques, seule la couche géologique est donnée.

Les sols genevois sont ainsi répartis en 15 couches (2 appartenant au substratum rocheux molassique) selon la figure suivante :

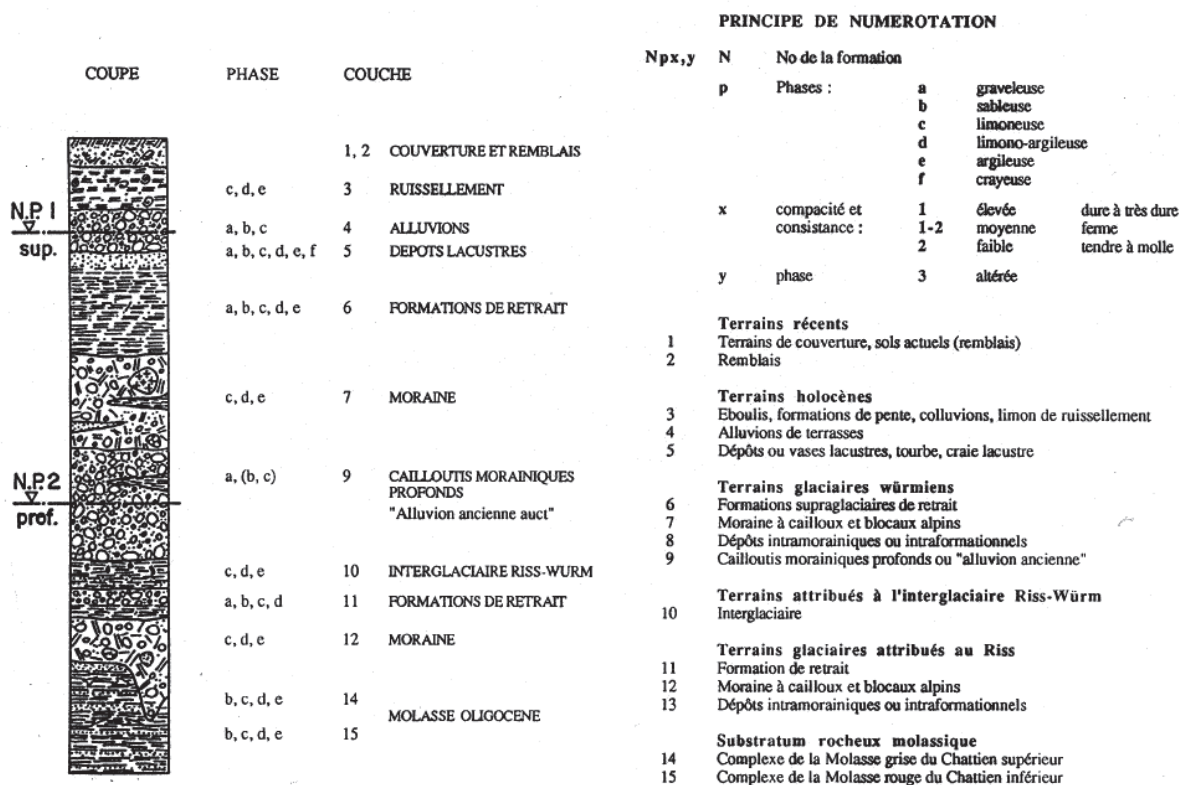


Figure 3-6. Classification des sols genevois et profil type de la cuvette genevoise (dès 1973)

Il est à noter qu'il est exceptionnel de rencontrer dans un sondage ou dans une coupe de terrain une succession de dépôts aussi complète que celle décrite ici, avec comme toujours quelques exceptions (village de Cartigny, par exemple ; Fontana, 1973).

Du fait de leur divers mode de déposition (dépôts sous-glaciaires, moraine basale ou latérale, formations de retrait, lacs sous ou périglaciaires) et de l'érosion engendrée par les avancées et retrait des glaciers, les formations quaternaires genevoises possèdent de manière générale une extraordinaire variabilité et souvent une extension latérale ou verticale limitée.

Pour les sondes géothermiques, une grande partie des terrains quaternaires ne va avoir qu'une influence négligeable, de par leur faible épaisseur ou extension latérale. Seuls les sols genevois suivants seront en contact sur des longueurs conséquentes avec les sondes dans le canton et vont par conséquent intéresser plus particulièrement cette étude :

- Formations de retrait Würmien (6)
- Moraine Würmienne (7)
- Alluvion Ancienne (9)
- Molasse (14 - 15)

Les géostructures énergétiques (pieux énergétiques principalement), seront surtout confrontés aux formations argileuses de retrait (6c, d, e).

Enfin, les possibilités d'utiliser l'eau des nappes phréatiques seront liées aux aquifères présents dans l'Alluvion ancienne (9) ainsi que dans les formations de retrait et les alluvion graveleuses et sableuses (6a, b et 4a, b).

3.5 Autres classifications des sols

Le canton de Genève, avec une classification existante et appliquée depuis près de 40 ans représente une exception. Au niveau suisse, la VSS précise la terminologie des terrains meubles (SN 670 009b). Celle-ci est basée sur la terminologie USCS (Unified Soil Classification System).

Le canton de Vaud a récemment mené une réflexion sur une classification unifiée qui a conduit l'EPFL à proposer des géotypes, qu'elle essaye actuellement de proposer comme classification unifiée. Les géotypes sont une méthode de classification des roches et des sols permettant de simplifier et d'homogénéiser des données géologiques, et ainsi de faciliter leur utilisation par tous. La description des terrains meubles est basée sur leur parenté génétique (par exemple « fluvioglacière »), et celle des roches sur la lithologie (par exemple « marne avec grès »). Ils ne sont donc pas dépendants d'une définition locale et peuvent être utilisés dans toute une région ou un pays. Ces définitions ne dépendent pas non plus d'une seule époque géologique, et il est donc possible de retrouver plusieurs fois le même géotype dans un seul profil (Parriaux et Turberg, 2007).

Pour la présente étude, la classification genevoise, largement éprouvée, sera utilisée.

3.6 Hydrogéologie

Dans la plupart des cas, les dépôts meubles sableux et graveleux d'origine glaciaire et alluviale constituent le siège de circulations d'eau à travers leurs interstices. Ils deviennent des réserves intéressantes lorsqu'ils reposent sur des structures géologiques imperméables et que l'épaisseur des couches perméables est conséquente.

A Genève, les plus importantes accumulations de sables et graviers dans le sous-sol sont constituées par les terrains fluvio-glaciaires de l'Alluvion ancienne. Ceux-ci sont logiquement le siège des plus importantes nappes du canton de Genève. Ces nappes, dites nappes principales, s'étendent en général dans une direction du Nord-Est vers le Sud-Ouest et se trouvent entre 15 et 60 mètres de profondeur. Leur épaisseur peut atteindre 40 à 50 mètres. Ces nappes d'eau souterraine appartiennent au domaine public et sont protégées. On en dénombre quatre (Figure 3-7) :

- Nappe du Genevois (Frontenex, Vessy, Carouge, Troinex, Perly, Soral, Veigy et Athenaz).
- Nappe de Montfleury (Versoix, aéroport, Vernier)
- Nappe du Rhône (Perle du Lac, St-Georges, Verbois, Avully, Chancy)
- Nappe de l'Allondon (Malval, La Plaine)

Les nappes du Genevois et de l'Allondon sont exploitées pour l'alimentation en eau potable du canton (20% du total distribué, le reste provenant du lac) et de la France voisine. La nappe de Montfleury l'a été mais ce n'est plus le cas actuellement. La nappe du Rhône ne l'est pas. Une nappe du même type a été mise en évidence récemment entre Collonge et Hermance et son étendue est encore incertaine. Cette nappe a été exploitée au début du 20^{ème} siècle. Elle était mise en bouteille et vendue sous appellation « Eau d'Hermance ».

Il existe également une seconde série de nappes d'eau souterraines, appelées nappes superficielles qui sont situées entre 2 et 10 mètres de profondeur, avec des épaisseurs réduites (moins de 10 mètres) et des capacités moindres que les nappes principales. Elles ont pour siège les sables et graviers issus des derniers retraits du glacier du Rhône (SCG, 2001) ou correspondant à d'anciennes terrasses alluviales. Ces nappes de faible profondeur ont rarement une protection naturelle efficace, et par conséquent sont le plus souvent polluées. Elles font partie du domaine privé et ne font pas l'objet de secteurs de protection des eaux. Les plus importantes sont la nappe de la Champagne, la nappe de l'Aire, la nappe de Puplinge, la nappe de Carouge-La Praille, la nappe de Plainpalais et la nappe de Versoix.

On trouve aussi souvent de l'eau dans le sous-sol genevois dans des terrains moins perméables (limons de retrait ou niveaux intra-morainiques). Ces circulations d'eau ont souvent un caractère temporaire et il ne s'agit alors pas de vraies nappes d'eau souterraines caractérisées. Ces corps sont décrits comme nappes temporaires ou à écoulements laminaires sur la carte hydrogéologique du canton (Figure 3-7, SCG, 2001).

Sur l'ensemble de ces nappes, plusieurs offriront des potentialités pour l'utilisation géothermique, pour autant qu'elle soit admise (conflit avec l'exploitation pour l'eau potable) et que les caractéristiques hydrogéologiques le permettent.

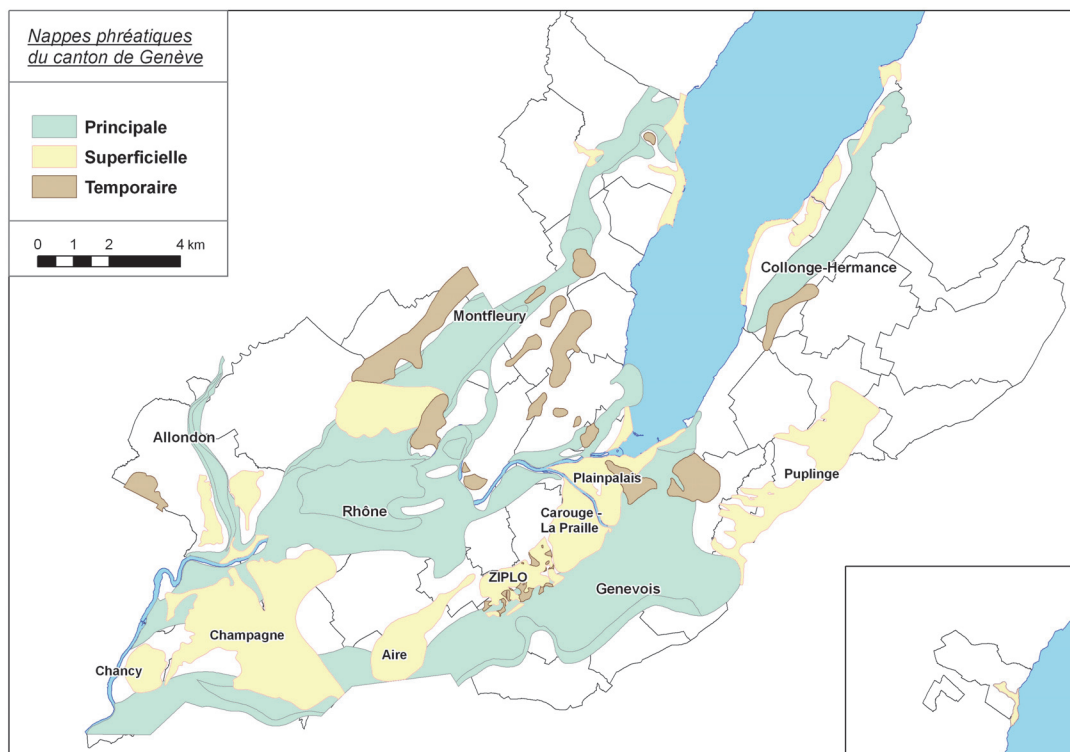


Figure 3-7. Carte hydrogéologique du canton de Genève

3.7 Contraintes législatives liées à la géologie pour la géothermie

Au-delà des critères géologiques de faisabilité – par exemple un pompage ne pourra avoir lieu que dans des zones où existent des nappes souterraines - il existe également des contraintes législatives en rapport avec la géologie limitant ou interdisant la réalisation de projets géothermiques, essentiellement liées à la protection des eaux souterraines utilisées pour l'alimentation en eau potable de la collectivité.

La protection des nappes est concrétisée dans la législation par des secteurs et des zones de protection des eaux. Dans le canton on distingue trois types de secteurs de protection des eaux (Figure 3-8) :

- Le secteur A_U de protection des eaux souterraines s'applique aux eaux souterraines exploitées ainsi que les zones attenantes nécessaire à leur protection. Les installations géothermiques n'y sont en principe pas admises, sauf pour les corbeilles et les circuits enterrés à faible profondeur, qui doivent dans tous les cas être situés à 2 mètres en-dessus du niveau maximum de la nappe phréatique.
- Le secteur A₀ de protection des eaux concerne les eaux superficielles et leur zone littorale, dans la mesure où cela est nécessaire pour garantir une utilisation particulière. Dans le canton ce secteur couvre par exemple les rives du lac, qui est une source importante d'eau potable (80% de l'eau potable du canton) et quelques bassins versants de rivières (Allondon, Versoix, etc.). Le secteur A₀ n'entraîne en principe pas de limitation pour l'utilisation de la géothermie de faible profondeur.

- Le secteur B de protection est une particularité cantonale : comme le secteur Au, il protège les eaux souterraines exploitables pour l'eau potable, mais dans les zones où il est estimé que celles-ci bénéficient déjà d'une protection naturelle conséquente (épaisseur suffisante de couverture étanche). Il s'applique également pour des nappes non exploitables mais qui pourraient potentiellement être en contact hydrauliques avec elles (nappe du Rhône p. ex.). Les limitations pour les ouvrages de surface y sont peu importantes alors qu'elles le deviennent bien plus pour les installations plus profondes, comme par exemple les sondes géothermiques.

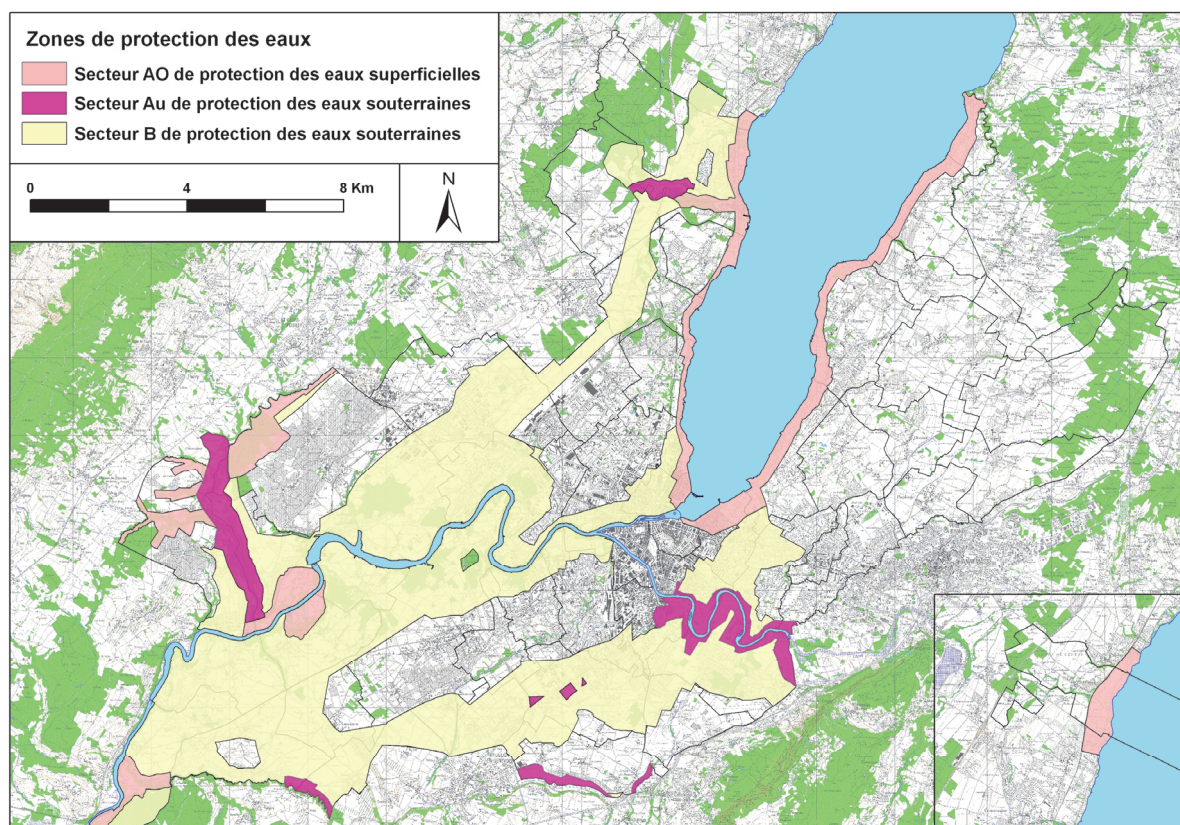


Figure 3-8. Secteurs de protection des eaux sur le canton de Genève

Dans le cas des sondes géothermiques verticales, pour clarifier la situation, des zones d'autorisation ont été spécialement définies par l'autorité (Figure 3-9).

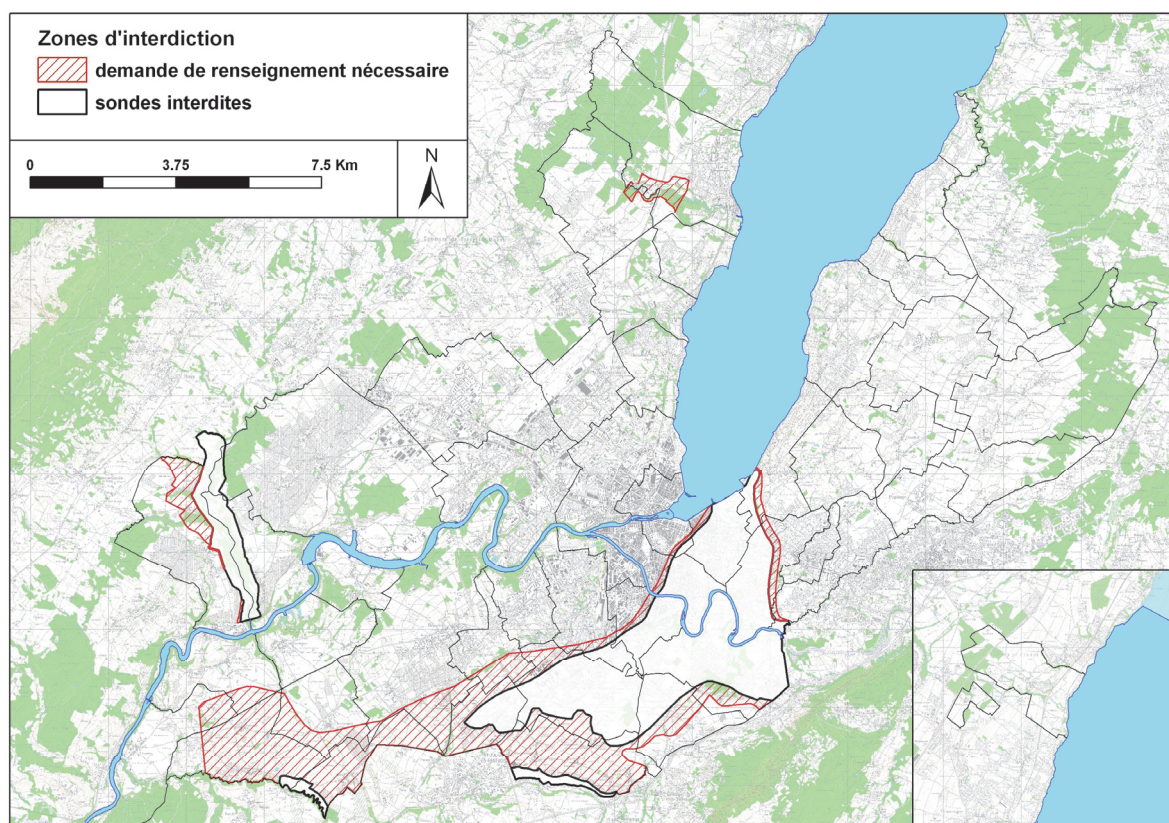


Figure 3-9. Zones d'interdiction d'installation des sondes géothermiques

Une autre catégorie de protection des eaux est celle des puits de captage pour l'eau potable : ces zones sont également réparties en 3 catégories :

- La zone de captage (zone S1) : cette zone comprend les alentours immédiats d'un captage ou d'une installation de réalimentation de la nappe
- La zone de protection rapprochée (zone S2)
- La zone de protection éloignée (zone S3)

Ces trois zones couvrent des surfaces beaucoup moins étendues que les secteurs de protection des eaux. Toutes les installations géothermiques sont interdites en zone S1 et S2. Dans la zone S3, des dérogations peuvent être accordées pour les circuits enterrés à faible profondeur, les corbeilles et les géostructures (OFEV, 2009).

Par ailleurs, il existe une autre contrainte hydrogéologique d'importance : lors de l'utilisation directe des eaux souterraines à des fins géothermiques, l'apport ou le prélèvement de chaleur ne doit pas modifier globalement (donc pour l'ensemble des installations comprises dans la zone considérée) la température naturelle des eaux du sous-sol de plus de 3°C (OEaux, Annexe 2, chapitre 21). La variation peut être plus importante à proximité de l'ouvrage de restitution, mais pas au-delà de 100 m.

3.8 Commentaires et conclusions

La géologie genevoise est dominée à faible profondeur (quelques centaines de mètres) par des dépôts quaternaires et la Molasse tertiaire, et à plus grande profondeur par les formations mésozoïques (secondaires) que l'on retrouve dans les reliefs du Jura et du Salève. Les installations géothermiques de faible profondeur (sondes verticales, géostructures, pompage dans les nappes principales et superficielles) seront donc principalement influencées par l'épaisseur et la nature du Quaternaire, ainsi que de la Molasse, alors que les installations de grande profondeur concerneront les couches mésozoïques et éventuellement le socle cristallin, et seront fortement influencés par la tectonique régionale.

De très nombreux forages (plus de 15'000) ont été relevés et synthétisés à l'heure actuelle, ce qui permet une bonne connaissance du Quaternaire ainsi que de la Molasse du Bassin genevois. De plus, des modèles numériques récents ont été élaborés (O. Kaufmann, 2010) en lien avec le Service de géologie, sols et déchets (GESDEC) pour cartographier le sommet de la Molasse et des principales couches du Quaternaire. Par ailleurs, il existe à Genève une classification systématique des terrains quaternaires et de la Molasse depuis une quarantaine d'années, ce qui permet d'homogénéiser l'information géologique.

Par la force des choses - la répartition des forages et leur profondeur étant principalement liées aux projets de constructions ou à des études particulières - la connaissance géologique du canton n'est pas homogène géographiquement et perd également de sa précision avec l'augmentation de la profondeur. Il n'en reste pas moins que l'état de connaissance du sous-sol peut être considéré comme remarquable à Genève.

Les données à disposition permettent ainsi d'affirmer que le contexte géologique est favorable pour la géothermie de faible profondeur avec des contraintes relativement peu importantes, principalement liées à la protection des eaux souterraines.

Pour la géothermie de grande profondeur, si le contexte général est connu, celui-ci reste toutefois très imprécis dans le détail. Les structures géologiques profondes présentent toutefois des caractéristiques suffisamment intéressantes pour justifier leur étude.

3.9 Bibliographie

Amberger G.F., 1971. *Géologie du Canton de Genève*. Publications de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, N°82, Session de printemps, Genève.

Baujard C., Signorelli S., Kohl T., 2006. *Evaluation du potentiel géothermique suisse, rapport 2006*, Commission Suisse de Géophysique CSG, Rapport Annuel 2006, 18 pp.

Charollais J., Weidmann M., Berger J.-P., Engesser B., Hotellier J.-F., Gorin G., Reichenbacher et Schäfer P., 2007. *La Molasse du Bassin Franco-genevois et son Substratum*. Archives des Sciences, Volume 60, fascicule 2-3, Novembre 2007, Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève.

Fontana A., 1973. *Caractéristiques géotechniques de sols genevois*. Bulletin Technique de la Suisse Romande, N°16.

Géotechnique appliquée Deriaz S.A. (GADZ), 1997, révisé 2009. *Sols Genevois ; Etude statistique des sols de la cuvette genevoise ; rapport de synthèse*. 51 pp.

Jenny J., Burri J.-P., Murlat R., Pugin A., Schegg R., Ungemacht P., Vuataz F.-D., Wernli R., 1995. *Le forage géothermique de Thônex (Canton de Genève) : Aspects stratigraphiques, tectoniques, diagénétiques, géophysiques et hydrogéologiques*. Eclogae geol. Helv. 88/2, p. 365-396.

Moscariello A., Pugin A., Wildi W., Beck C., Chapron E., de Batist M., Girardelos S., Ochs S. I., Rachoud-Schneider A.-M., Signer C. et Van Clauwenberghe T., 1998. *Déglaciation Würmienne dans des Conditions Lacustres à la Terminaison Occidentale du Bassin Lémanique*, Eclogae geol. Helv 91, p. 185-201.

Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEPF), 2004. *Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines*, Berne, 133 pp.

Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2009. *Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol*, Berne, 51 pp.

Parriaux A., Turberg P., 2007. *Les géotypes, pour une représentation géologique du territoire*. TRACES 15/16, p. 11-17

SCG - Service Cantonal de Géologie – Genève, 2001. *L'Eau Souterraine du Canton de Genève*. Dossier d'information, 6 pp.

Signer C. et Gorin G., 1995. *New geological observations between the Jura and the Alps in the Geneva area, as derived from reflection seismic data*, *Eclogae geol. Helv.* 88/2, p. 235-265.

Wegmüller S., Amberger G. et Vernet J.-P., 1995. *La formation de Montfleury près de Genève : Etude palynologique et sédimentologique d'une séquence du Pléistocène moyen*. *Eclogae geol. Helv.* 88/3, p. 595-614.

Wildi W., 1997. *Géographie Historique du Plan d'Eau et des Rives : le Site Naturel de Genève*. Les Monuments d'Art et d'Histoire du Canton de Genève, Tome I, La Genève sur l'Eau, Editions Wiese SA, Bâle.

4. Paramètres thermiques et géothermiques à Genève

4.1 Rappels théoriques pour les sols

Une partie importante du dimensionnement de toute installation géothermique concerne les paramètres géothermiques du sous-sol. Ces paramètres englobent non seulement la température initiale du sol, mais également sa capacité à se recharger en chaleur et à transmettre celle-ci.

Sur le plan thermique, un corps (ou un matériau) est caractérisé par sa conductivité thermique, sa capacité thermique et sa chaleur latente lors d'un changement de phase (passage de l'état solide à l'état liquide par exemple). Dans le cas de la géothermie, la conductivité et la capacité thermique du sol seront les paramètres les plus importants, car ils définissent la propension d'un corps à transmettre et à stocker la chaleur.

4.1.1 Conductivité thermique

La **conductivité thermique (ou conductibilité thermique) k (ou λ)** exprimé en $[W/(mK)]$ est la vitesse d'écoulement de la chaleur à travers un corps, sous un gradient thermique égal à l'unité ; elle est directement tirée de l'équation de Fourier :

$$k = \frac{q}{gradT}$$

Avec : q = flux de chaleur $[W/m^2]$
 T = température $[K \text{ ou } ^\circ C]$
 $gradT = \Delta T / l = (T_1 - T_2) / l$ $[K/m]$

On peut constater que les écoulements thermiques sont modélisés par le même type d'équation que les écoulements hydrauliques. k serait donc analogue à la perméabilité. Le tableau 4-1 résume les conductivités des principaux types de roches et sols, ainsi que de quelques types de liquide et de gaz.

Corps	k [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	c [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	C [kJ · m ⁻³ · K ⁻¹]	α [10 ⁻⁶ · K ⁻¹]
Air 20° C + pression atm.	0,026	1,00	1,2	
Eau, glace:				
Eau 0° C + pression atm.	0,552	4,22	4217	540
Eau 20° C "	0,598	4,18	4174	660
Glace -0° C	2,24	2,11	1935	54
Glace -10° C	2,32	2,03	1865	52
Glace -20° C	2,43	1,96	1800	50
Neige 0,1 t · m ⁻³	0,059	0,21	210	
Neige 0,5 t · m ⁻³	0,59	1,05	1050	
Minéraux:				
Quartz	4,8-7,7	env. 0,75	env. 2000	11
Plagioclase (Feldspath)	1,9			4,3
Orthose (Feldspath)				5
Biotite (mica blanc)	2,0			7
Muscovite (mica noire)	2,3			7
Roches:				
Granite	2,9-4,1	env. 0,80	env. 2100	7-10
Gneiss	2,7-4,6	env. 0,85	env. 2200	env. 10
Quartzite	5,4-8,1	env. 0,85	env. 2100	11
Dolomie	3,4-4,0	env. 0,75	env. 2000	
Calcaire	1,5-3,3	0,85-2,20	2000-5200	6-9
Grès	2,3-6,5	0,90-2,00	2200-5000	env. 10
Schiste	1,5-3,5	1,00-2,20	2100-4600	
Sols:				
(non gelés, saturés)				
Argile CH	0,9-1,8	1,4-2,1	2600-3400	
Limon argileux CL	1,2-1,8	1,2-1,6	2600-3000	
Limon ML	1,2-2,4	1,2-1,8	2500-3100	
Gravier sableux (grave)	1,2-3,0	1,1-1,8	2400-3000	
Tourbe	env. 0,6	env. 3,0	env. 4000	
Autres matériaux:				
Acier	70	0,48	3800	12
Aluminium	220	0,95	2600	24
Cuivre	400	0,39	3500	17
Verre	0,8	0,9	2400	6-9
Béton armé	1,8	1,10	2600	10
Bois, sapin	0,14	2,20	1050	3-9 fibres
Polystyrène extrudé	0,03-0,04	1,40	40	60-80
PVC	0,22	1,50	2000	50-180
Asphalte	env. 0,6	env. 1,0	2000	240
Béton bitumineux	env. 1,5	1,0	2300	14

Tableau 4-1. Conductivité thermique k , capacités thermiques massique c et volumique C et coefficient de dilatation thermique linéaire α de quelques solides, liquides et gaz (Dysli, 1991)

La manière la plus précise de déterminer la conductivité thermique k est de procéder à des essais de laboratoire ou à un test de réponse géothermique. Cependant, en l'absence de ceux-ci, la conductivité peut être estimée grâce aux formules de Kersten (1949 ; Côté et Konrad, 2005) à partir de la densité et du contenu en eau d'un sol. Kersten proposa ces formules empiriques afin de calculer la conductivité des sols sableux et argileux, après avoir effectué plus de 1000 mesures sur 19 types de sol différents.

Les formules de Kersten sont les suivantes :

Argile et limon non gelés :

$$k = 0.1442 \cdot (0.9 \log_{10} w - 0.2) \cdot 10^{0.6243 \rho_d}$$

Sable non gelé :

$$k = 0.1142 \cdot (0.7 \log_{10} w + 0.4) \cdot 10^{0.6243 \rho_d}$$

Avec : k = conductivité thermique [W/(m K)]
 w = teneur en eau [%]
 ρ_d = masse volumique sèche [t/m³]

Des équations existent également pour les sols gelés. Cependant, dans le canton de Genève les sols gèlent rarement, et jamais à une profondeur plus grande que 0.8 m. Par ailleurs, lors de l'exploitation d'une installation géothermique on évitera absolument de geler le sol. Les sols gelés n'ont donc pas été pris en compte dans ce rapport. La plupart des sols ont des conductivités thermiques comprises entre 1.5 et 3.5 W/(mK).

Les principaux facteurs influençant la conductivité thermique k sont la masse volumique du matériau à sec, sa teneur en eau et sa teneur en quartz. La figure 4-1 illustre l'influence du contenu en eau et de la densité. On voit que ces deux facteurs ont un effet positif sur la conductivité. Cependant on peut également constater que l'influence de la masse volumique sèche est plus importante que celle de la teneur en eau : un limon très riche en eau aura une conductivité moindre que celle d'un gravier non saturé.

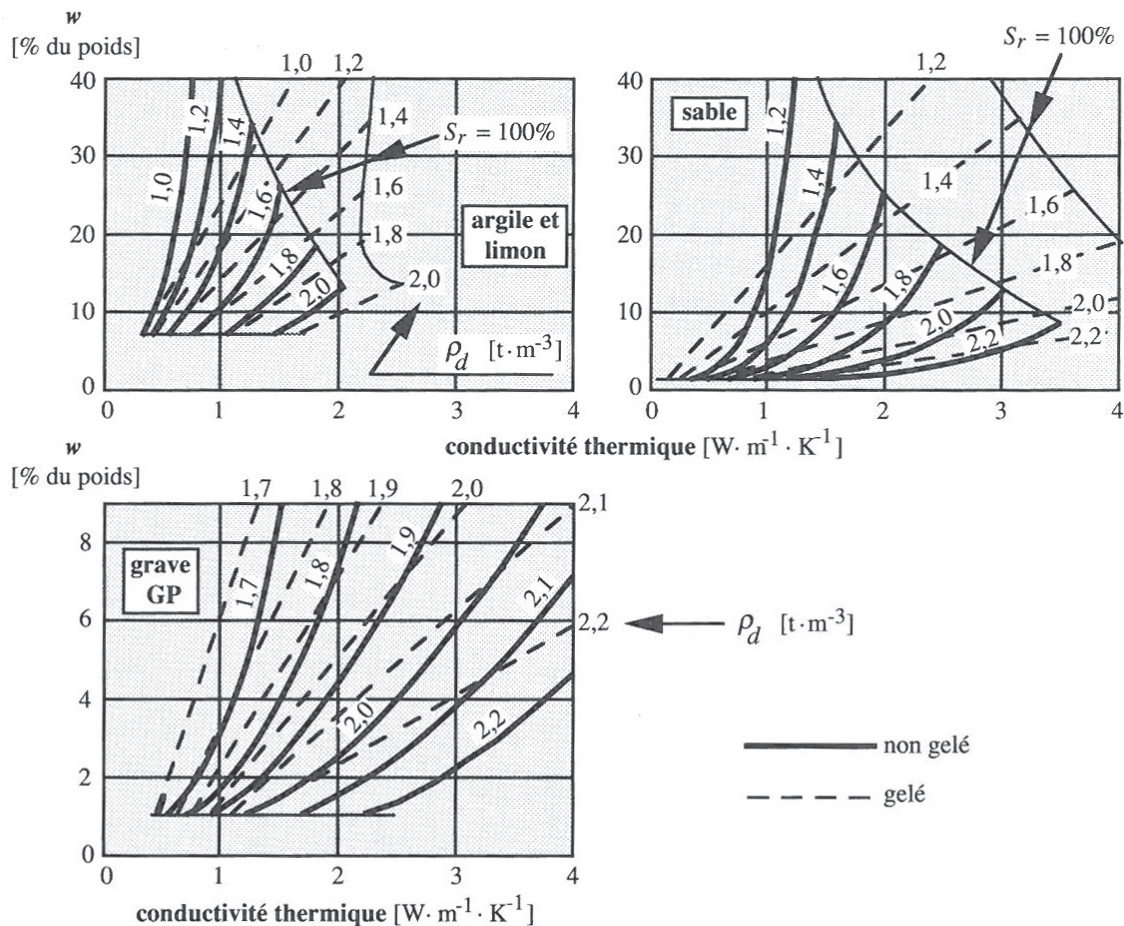


Figure 4-1. Conductivité thermique des sols argileux, sableux et graveleux en fonction de leur teneur en eau (w) et de leur masse volumique sèche (ρ_d) (Dysli, 1991, adapté de Kersten).

Le contenu en quartz aura également une grande influence sur la conductivité, car il s'agit d'un des minéraux les plus efficaces pour la transmission de chaleur (Figure 4-2; Tableau 4-1). La température du sol influence également sa conductivité, mais cette influence reste négligeable pour des températures

comprises entre 0°C et 30°C, elle n'a donc pas besoin d'être prise en compte pour des installations de géothermie de faible profondeur (Dysli, 1991).

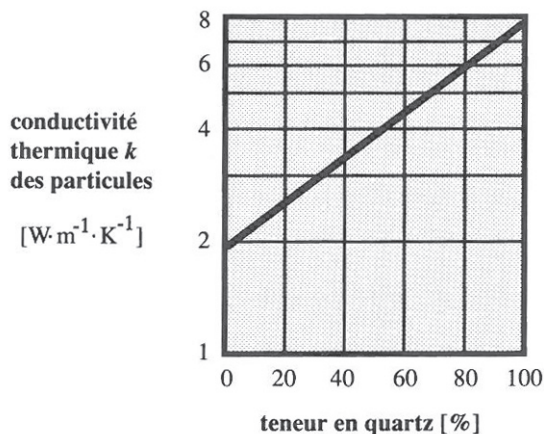


Figure 4-2. Rôle du quartz dans la conductivité thermique des sols (Dysli, 1991)

4.1.2 La capacité thermique ou calorifique

La **capacité thermique massique** c [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$] (ou chaleur massique) ou la **capacité thermique volumique** C (ou chaleur volumique) [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] ($C = \rho \cdot c$) est la quantité d'énergie nécessaire à fournir à un corps pour élever respectivement 1 kg ou 1 m³ de ce corps de 1 degré Kelvin. La capacité thermique d'un sol est mesurée à partir de la capacité thermique des particules solides qui le constituent et de son contenu en eau. On considère la capacité thermique de l'air comme négligeable car très faible. Dans le cadre de la géothermie on considère en général la capacité thermique volumique (C).

La capacité thermique (C) des sols non gelés est calculée à l'aide de la formule suivante (Dysli, 1991):

$$C = c_s \cdot \rho_d + \frac{w}{100} \cdot c_w \cdot \rho_d$$

c_s = capacité thermique massique des sols secs (dépendante de la température ; une valeur moyenne de 780 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] a été utilisée dans les calculs qui suivent, correspondant à une température de 10°C)

c_w = capacité thermique massique de l'eau (valeur moyenne de 4180 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] pour des températures entre 5° et 30°C)

ρ_d = masse volumique sèche [t/m^3]

w = teneur en eau [%]

Le tableau 4-1 fournit les capacités thermiques volumiques et massiques de plusieurs types de matériaux.

Dans la figure 4-3 on constate que, au contraire de la conductivité, la teneur en eau influence la capacité de manière plus importante que la masse volumique sèche : des terrains de masse volumique moindre mais plus riches en eau atteignent ainsi des valeurs de capacité plus élevées que des terrains plus denses, mais plus secs.

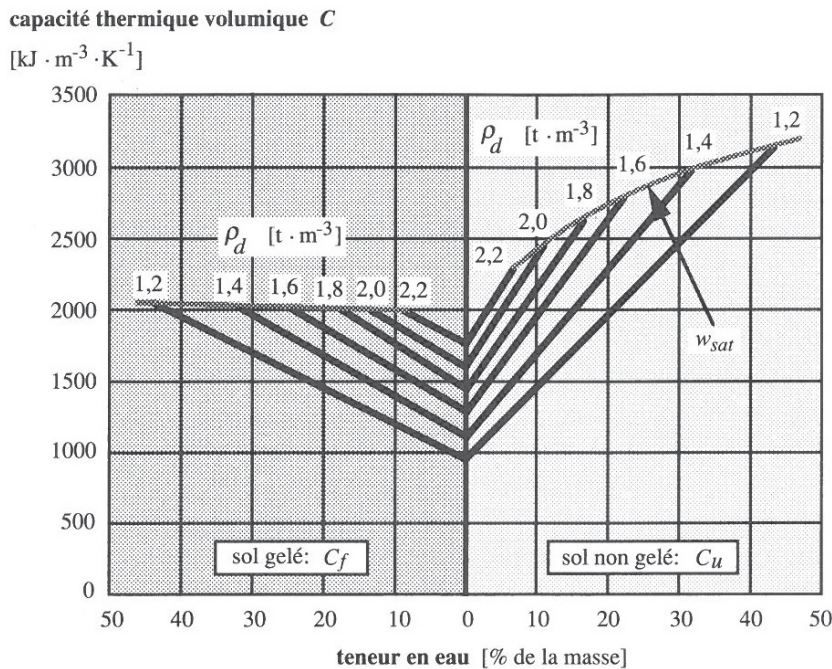


Figure 4-3. Capacité thermique volumique des sols gelés et non gelés en fonction de la teneur en eau et de la masse volumique du sol sec (ρ_d) (Dysli, 1991)

4.2 Les paramètres géothermiques des sols genevois

Dans le cadre de la présente étude, nous avons pu disposer de données d'essais sur de très nombreux échantillons de sols genevois (base de données GADZ et étude statistique des sols genevois, GADZ, 1996). Ces données ont été utilisées pour calculer les paramètres géothermiques les plus importants de ces sols, c'est-à-dire la conductivité thermique k , qui va réguler la puissance pouvant être tirée du sol et la capacité calorifique volumique C qui dimensionne l'inertie thermique du terrain.

Afin de déterminer la conductivité thermique, nous avons utilisé les formules de Kersten qui prennent en compte la masse volumique sèche (ρ_d) et le teneur en eau ($w\%$) des échantillons (voir point 4.1.1).

Comme nous l'avons précédemment mentionné (chap. 3.4), l'accent sera surtout porté sur la caractérisation des formations de retrait (6 et 11 de la classification genevoise), de la moraine (7 et 12), des cailloutis morainiques profonds (ou Alluvion ancienne : 9) et de la Molasse, du fait de leur extension verticale bien plus importante que les autres terrains. Une étude paramétrique a par ailleurs montré que d'un point de vue géothermique il n'est pas nécessaire de différencier les différentes phases d'une unité géologique (graviers, sables, limons, argiles).

Les résultats des calculs de conductivité thermique sur les terrains quaternaires correspondent globalement aux intervalles préconisés par Dysli (1991) et à la norme SIA 384/6. Comme nous pouvons le voir dans le tableau 4-2, les formations de retrait montrent des valeurs de conductivité thermique (k), relativement basses (1.4 – 1.9 $\text{W}/(\text{mK})$), conformément à leur composition plus argileuse. Leur teneur en eau est élevée, mais cela tend à diminuer leur masse volumique, et de ce fait, leur conductivité (Figure 4-4). De

plus, la conductivité de l'eau est inférieure à celle de la roche. De façon générale la moraine (7, 12) présente des valeurs de conductivité plus élevée (1.8 – 2.4 W/(mK)), du fait de sa plus grande densité. Les valeurs les plus élevées sont celles de l'Alluvion ancienne (2.4 - 3.7 W/(mK)), ce qui découle de la composition sablo-graveleuse de cette formation et de sa plus grande masse volumique sèche.

Type de sol (classification genevoise)	Masse volumique sèche [t/m ³]	Teneur en eau [w%]	Conductivité thermique [W/(mK)]	Capacité calorifique volumique [kJ]/(m ³ K)]
Colluvions (3)	1.55 – 1.75	17 - 24	1.4-1.7	2600-2900
Dépôts lacustres (5)	1.15 - 1.7	17 - 51	1-1.6	2700-3300
Dépôts de retrait würmien (6)	1.5 - 1.8	18 - 30	1.4-1.9	2800-3100
Moraine würmienne (7)	1.9 - 2.2	8.5 - 17	1.8-2.4	2500-2900
Interglaciaire (8)	1.6 - 2	13 - 28	1.4-2.2	2600-3000
Alluvion ancienne (9)	2 - 2.4	6 - 13	2.4-3.7	2000-2500
Dépôts de retrait rissien (11)	1.8 - 2	12 - 17.5	1.8-2.1	2600-2800
Moraine rissienne (12)	2 - 2.3	8 - 14	1.9-2.4	2450-2700

Tableau 4-2. Valeurs statistiques de la masse volumique sèche et de la teneur en eau, complétées par les valeurs calculées selon Kersten de la conductivité thermique et de la capacité calorifique volumique des différents types de sols quaternaires genevois

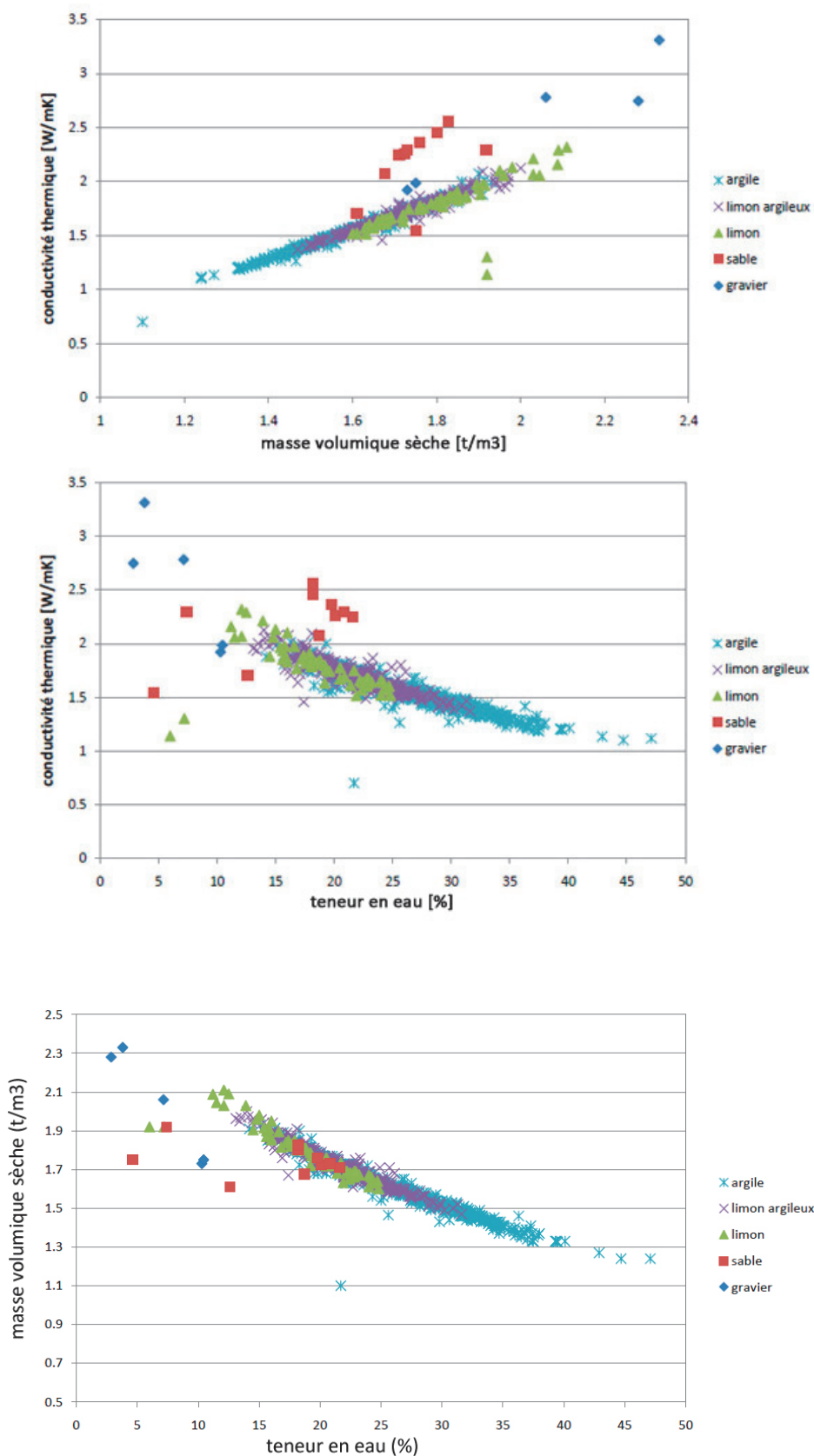


Figure 4-4. Conductivité thermique des terrains de retrait würmiens (formation 6) en fonction de la masse volumique sèche et de la teneur en eau des échantillons. Le graphique du bas montre la relation entre la teneur en eau et la masse volumique sèche

La capacité calorifique volumique a été calculée pour les mêmes terrains. Les résultats sont également reportés dans le tableau 4-2.

De façon générale, on constate que la capacité calorifique évolue à l'inverse de la conductivité : les terrains avec la granulométrie la plus élevée (Alluvion ancienne) sont ceux avec les plus basses capacités tandis que les terrains fins (argiles de retrait) montrent des valeurs élevées, les valeurs les plus basses étant celles de la Molasse. Cela est principalement lié à la teneur en eau : en effet la capacité thermique de l'eau (4180 J/(kgK)) est plus élevée que celle des sols secs (780 J/(kgK)), et les argiles peuvent contenir des quantités importantes d'eau (25% pour les formations de retrait genevoises), alors que la teneur en eau des terrains molassiques ne dépasse généralement pas 5%.

Les terrains molassiques quand à eux présentent généralement des valeurs de conductivité thermique plus élevées que celles des sols meubles. Selon des analyses thermodynamiques de la Molasse (Hotellier et Griessen, GADZ 2001), la valeur moyenne de conductivité de ces terrains serait d'environ 3,2 W/(mK). Cependant, les tests de réponse géothermique effectués dans des terrains essentiellement molassiques montrent des valeurs moyennes bien plus basses (2.6 W/(mK)), qui correspondent à la valeur moyenne recommandée dans la norme SIA 384/6 (Tableau 4-3). Ce résultat laisse à penser que les tests de conductivité effectués sur des échantillons rocheux en laboratoire ne sont pas directement utilisables pour estimer la conductivité sur une grande épaisseur du même terrain. Voici les valeurs-types telles que données dans la norme SIA 384/6 (Tableau 4-3) pour la Molasse d'eau douce inférieure présente à Genève :

Type de roche	Conductivité type [W/(mK)]	Valeur recommandée [W/(mK)]
Argilite-marne	2.2 – 2.7	2.3
Marnes	2.3 – 2.8	2.4
Grès fins	2.4 - 2.8	2.5
Grès moyens	2.7 – 3.2	2.9
Grès grossier et conglomérats	2.2 – 3.1	2.4
Moyenne	2.5	2.5

Tableau 4-3. Valeurs types et valeurs recommandées de conductivité pour la Molasse, selon la norme SIA 384/6

Le tableau suivant indique les valeurs de capacité calorifique volumique recommandées par la norme SIA 384/6 pour la Molasse, et les compare avec des résultats calculés à partir de valeurs de masse volumique sèche et de teneur en eau obtenues sur les échantillons utilisés lors de tests thermodynamiques (Hotellier et Griessen, GADZ 2001).

Type de roche	Capacité calorifique [kJ/(m³K)] (SIA 384/6)	Valeur recommandée (SIA 384/6)	Capacité calorifique calculée (GADZ) Selon chap. 4.1.2	Moyenne calculée (GADZ)
Molasse	1800 – 2600	2100	2200 - 2700	2300

Tableau 4-4. Valeurs types et recommandées de la capacité calorifique de la Molasse

Compte tenu de la géologie genevoise, le soubassement molassique est le terrain le plus traversé par les sondes géothermiques verticales. Ses caractéristiques thermiques vont donc jouer un rôle important pour ce type de technique.

Pour tester la fiabilité des valeurs obtenues par calculs (selon chap. 4.1), et afin de savoir quelles sont les valeurs correspondant le mieux aux sols genevois, des comparaisons ont été faites avec des tests de réponse géothermique, qui sont pour l'instant une des manières les plus précises de déterminer la conductivité thermique moyenne de l'ensemble des couches traversées par un forage, en conditions

réelles. Ces tests consistent à introduire une sonde en double U dans un forage d'essai et à relever les températures du fluide à l'entrée et à la sortie de celle-ci au moyen d'un module de chauffage de taille réduite muni d'un système de mesures et d'acquisition de données.

Ce système doit rester en place pendant plusieurs jours pour donner à la sonde le temps de s'équilibrer avec le terrain. La relation entre la température et le log du temps est linéaire et inversement proportionnelle à la conductivité thermique effective (K_{eff}) :

$$K_{eff} = \frac{q}{4\pi k}$$

où q est la puissance d'injection de chaleur (ou de froid) (W/m) et k la pente de la droite de la température en fonction du log de temps (Steinmann et Laloui, 2009).

En se basant sur les relevés de forages faits lors de ces tests (données mises à disposition par l'EPFL et Swiss Geotesting), nous avons recalculé une conductivité thermique probable en prenant pour base les résultats statistiques de l'étude des sols genevois. En effet, il est possible d'estimer la conductivité thermique équivalente d'un forage si sa stratigraphie est connue, ainsi que les conductivités spécifiques à chaque couche grâce à une moyenne pondérée (Figure 4-5).

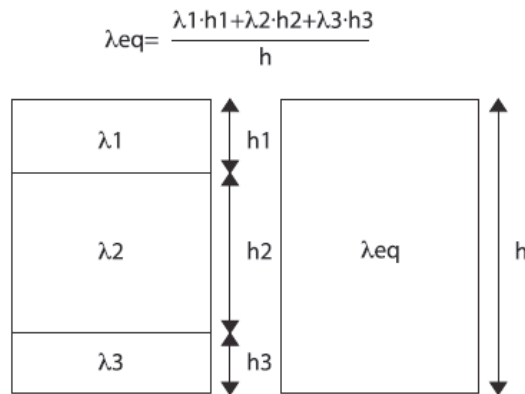


Figure 4-5 . Calcul de la conductivité thermique équivalente K_{eq} ou Λ_{eq} (Blunier, 2009).

Plusieurs valeurs standard de conductivité (documentation et norme suisses SIA 1988, 2010) et de la littérature (Dysli, 1991) ont été prises en compte afin de déterminer lesquelles refléteraient au plus proche la réalité du terrain. Nous avons pu constater que l'on s'approche au plus près des valeurs mesurées lors des tests de réponse géothermique en combinant les résultats de notre étude des sols (calculs selon Kersten, chap. 4.1.1) avec une valeur moyenne de conductivité de 2.6 W/(mK) pour les terrains molassiques.

La figure 4-6 montre que la correspondance entre les paramètres mesurés et les paramètres calculés de cette manière est très satisfaisante.

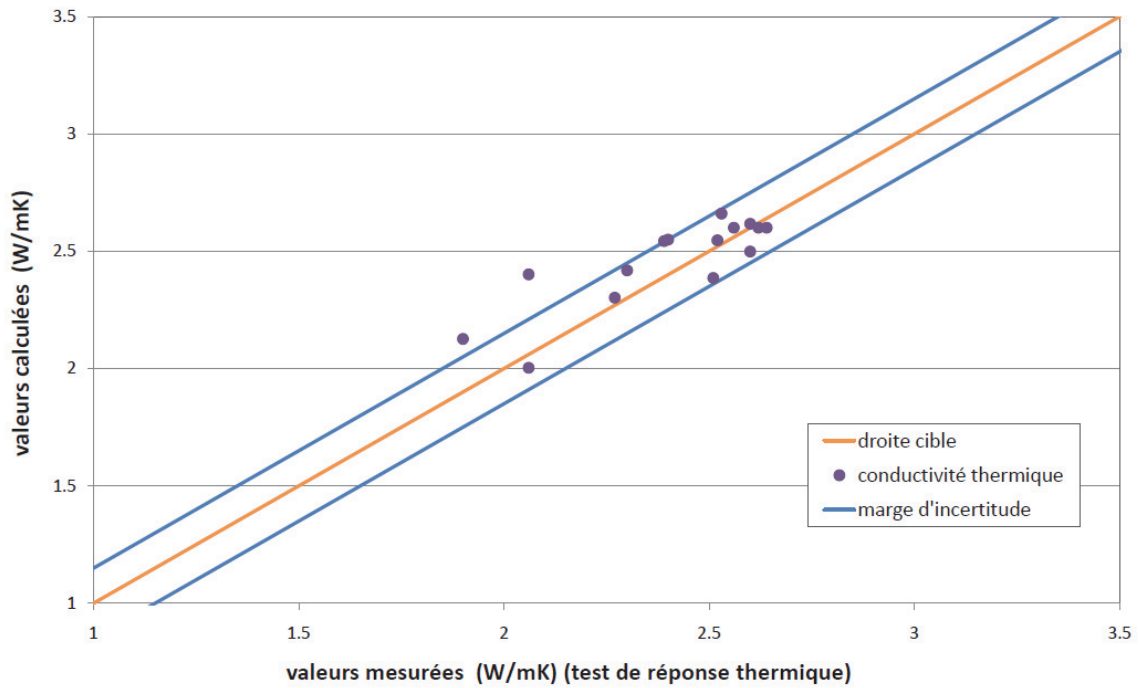


Figure 4-6. Comparaison des résultats des tests de réponse thermique et des valeurs calculées (selon Kersten pour les sols quaternaires, valeur fixe de 2.6 W/(mK) pour la Molasse)

La figure 4-7 résume l'ensemble des valeurs de conductivité thermique et la figure 4-8 celles de capacité calorifique des sols genevois (y.c. la Molasse), calculés selon le chapitre 4.1.

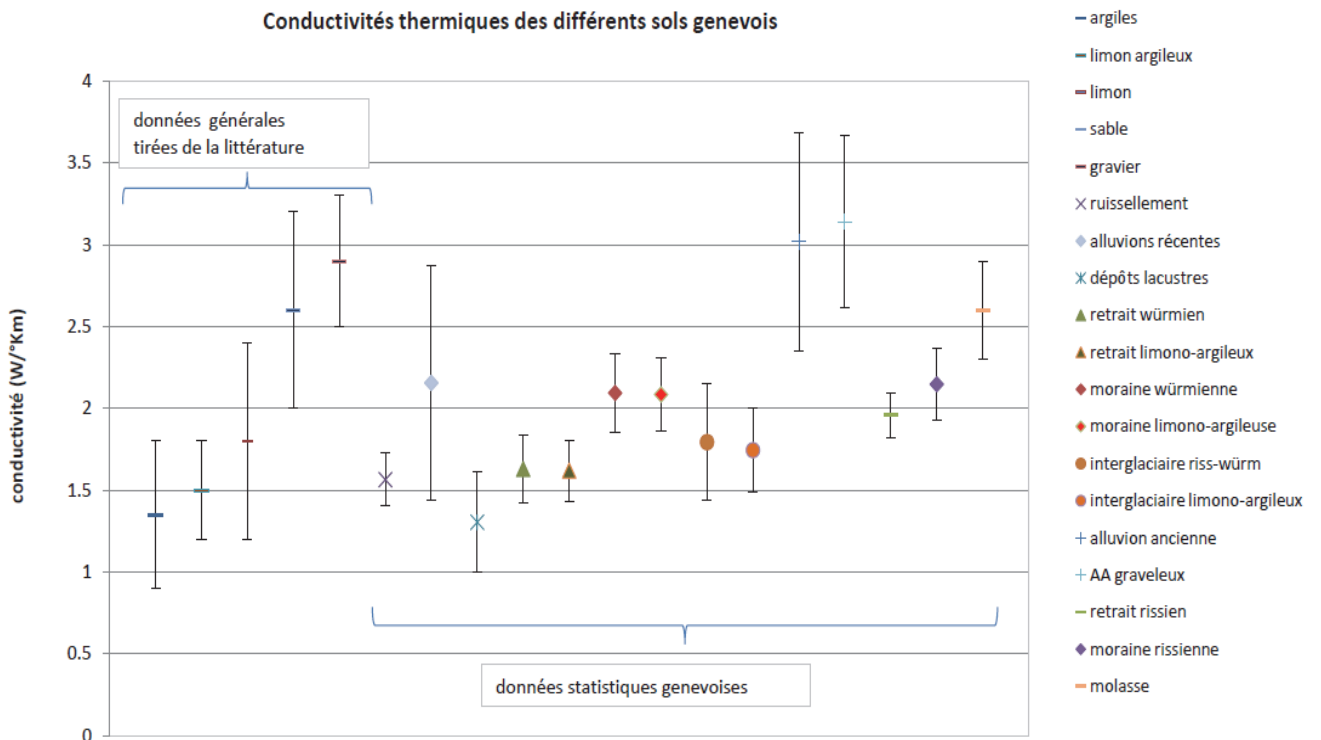


Figure 4-7. Conductivité thermique des différents sols genevois et de la Molasse

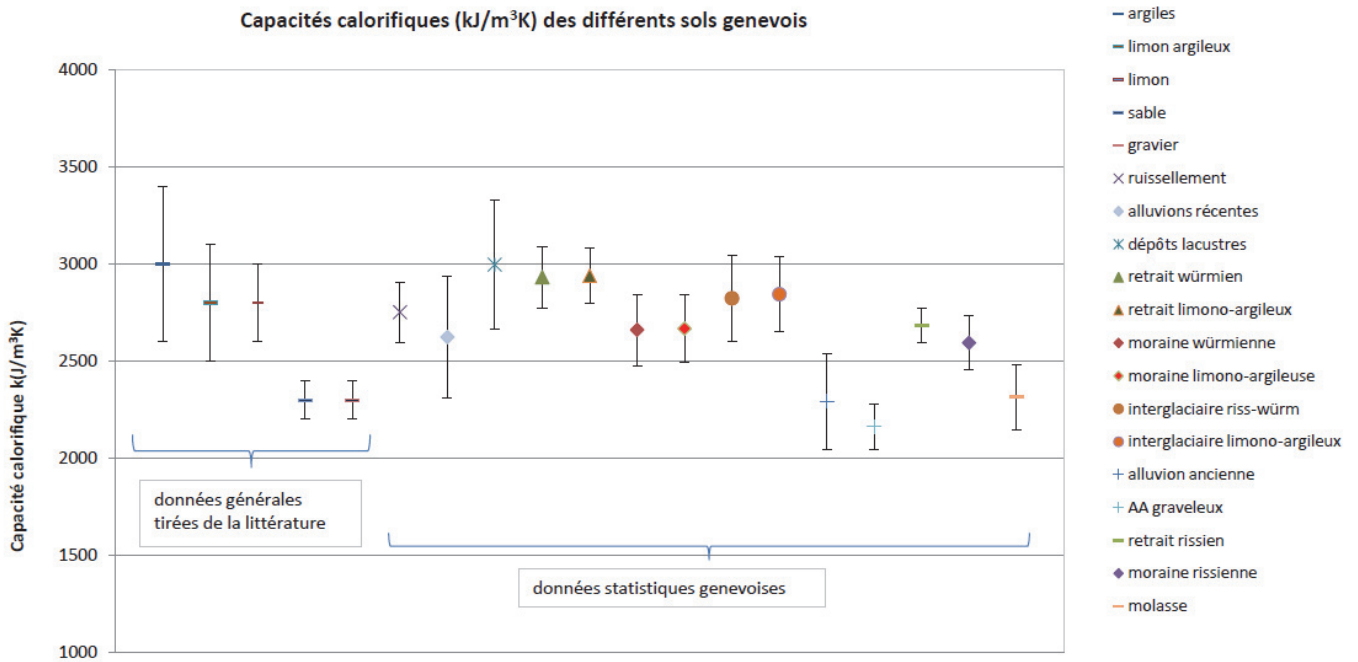


Figure 4-8. Capacité thermique volumique des différentes catégories de sols genevois

4.3 Gradient géothermique et température du sol

Le gradient géothermique est l'augmentation naturelle de la température dans le sol avec la profondeur (chap. 1.1.2). Il est en moyenne de 3 °C/100 m (ou 30 °C/km). C'est également la moyenne observée sur le Plateau suisse. La figure 4-9 en donne un aperçu dans la région vaudoise.

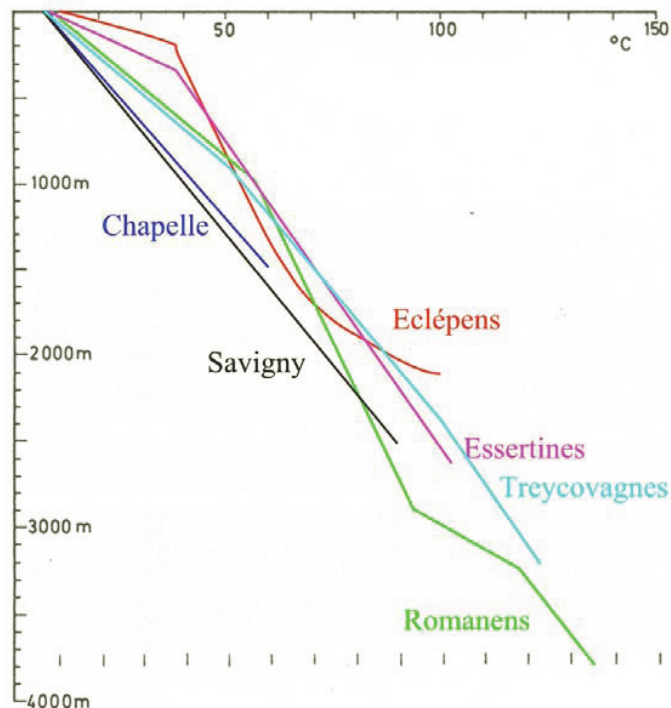


Figure 4-9. Profils de température dans les forages profonds situés sur le territoire vaudois et régions limitrophes (PGV, 2003)

Lors du forage géothermique de Thônex, le gradient thermique a été calculé à 31,2°C par km (Jenny et al., 1995), ce qui confirme cette estimation générale. Le canton de Genève étant situé dans une zone relativement stable tectoniquement, le gradient géothermique ne devrait pas subir de grandes variations sur l'ensemble du canton. Toutefois, dans les zones de grandes failles perméables, les circulations d'eaux profondes pourraient augmenter, localement mais significativement, le gradient géothermique régional. Cela a été observé dans les forages des zones d'Eclépens et d'Yverdon-les-Bains (Groupement PGV, 2003).

La température annuelle moyenne de surface joue un rôle important pour les faibles profondeurs. En effet, l'augmentation de température vers la profondeur se fait à partir de celle-ci. La température du sol dépend de la température annuelle moyenne de l'air, et, en Suisse, celle-ci est principalement tributaire de l'altitude.

A Genève, une seule station de mesure de la température existe à Cointrin. Afin de confirmer que ces valeurs sont valables pour tout le canton, nous avons utilisé les méthodes de Signorelli et Kohl (2004) afin d'estimer la température annuelle moyenne de l'air (Surface air temperature ou SAT) ainsi que la température annuelle moyenne du sol (Ground surface temperature ou GST) directement selon l'altitude d'après une formule polynomiale du troisième ordre

$$SAT \text{ ou } GST = a_0 + a_1Z + a_2Z^2 + a_3Z^3 \quad Z \text{ étant l'altitude en m/mer}$$

Où $a_0 = 12.05$, $a_1 = 3.69 \times 10^{-4}$, $a_2 = -6.18 \times 10^{-6}$, $a_3 = 2.3 \times 10^{-9}$ pour GST

Et $a_0 = 13.47$, $a_1 = -1.07 \times 10^{-2}$, $a_2 = 6.88 \times 10^{-6}$, $a_3 = -2.9 \times 10^{-9}$ pour SAT

En appliquant cette formule sur l'ensemble du Canton, on obtient des températures situées entre 9.4 et 10.8°C pour la température annuelle moyenne de l'air, et entre 10.9 et 11.7°C pour la température du sol (Figure 4-10). La différence entre le maximum et le minimum étant plus petite que la marge d'erreur de la formule (0.81 K), il est donc possible d'ignorer l'effet de l'altitude sur les températures du sol. Les températures peuvent donc être estimées sur la base des températures moyennes annuelles de l'air mesurées à Cointrin, en leur ajoutant 1.6 K (Signorelli et Kohl, 2004). La norme SIA 384/6 propose, pour sa part, d'ajouter 1.55 K et d'ajouter (ou soustraire) une valeur de tolérance de 1 K pour le chauffage (ou le refroidissement), en raison des incertitudes locales (influence de l'exposition par exemple.).

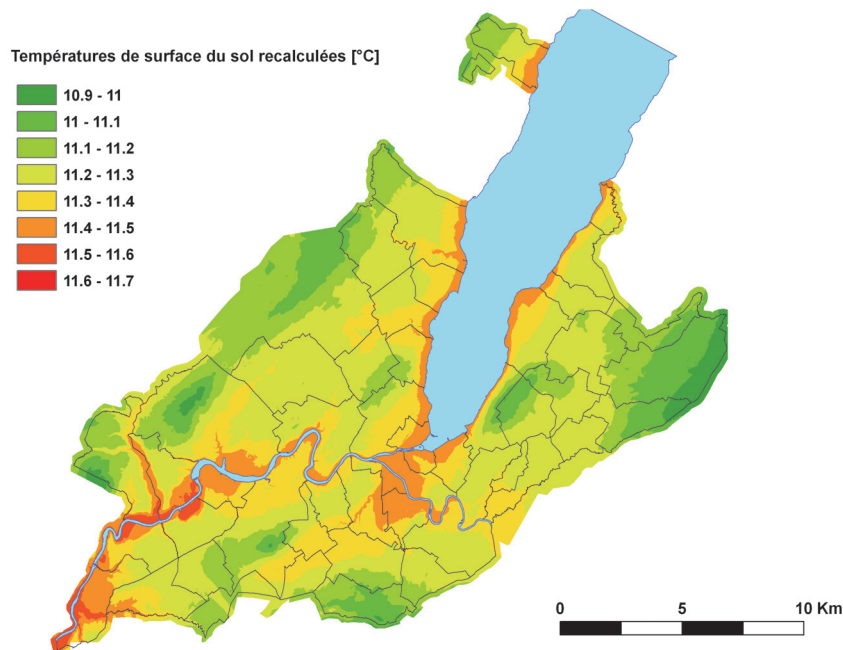


Figure 4-10. Températures moyennes annuelles du sol (en surface) recalculées pour l'ensemble du canton selon les formules de Signorelli et Kohl (2004).

D'après les données de la station de mesure de Cointrin, il est possible d'estimer la température annuelle moyenne de l'air du canton à 9.6°C (qui correspond à la norme 1961 – 1990, voir chapitre 2.2). On peut donc estimer la température moyenne du sol à environ 11.2°C, ce qui correspond bien aux résultats de l'expression polynomiale.

4.4 Flux et recharges géothermiques

Le flux géothermique est variable sur l'ensemble de la Suisse. Sur le canton de Genève, on considère qu'il oscille entre 60 et 70 mW/m². (Figure 4-11)

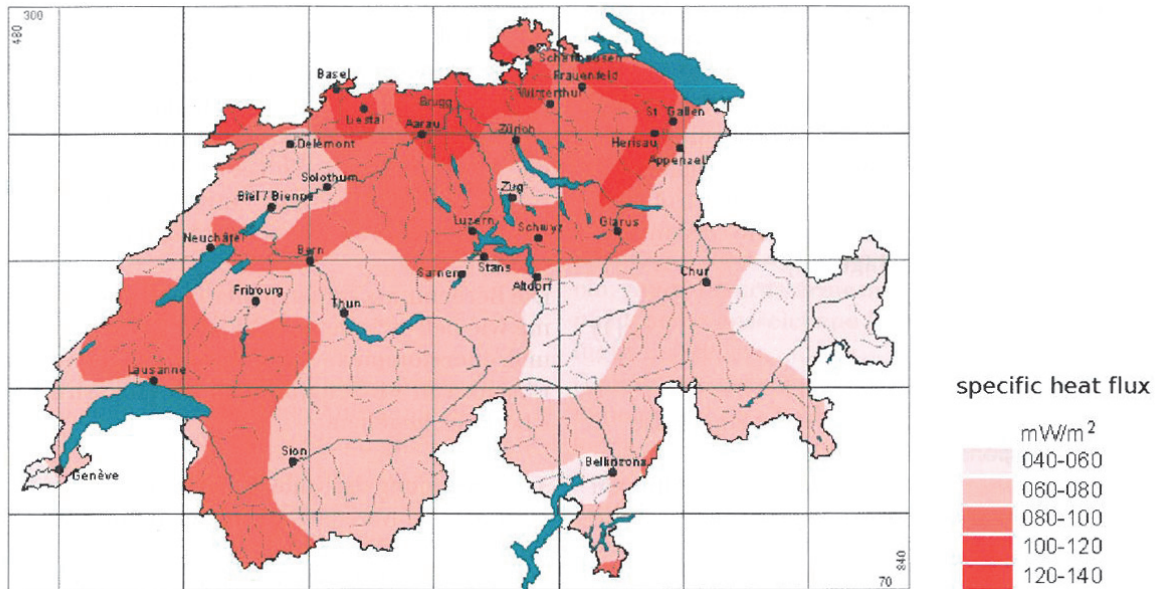


Figure 4-11. Flux géothermique de la Suisse (Medici et Rybach, 1995)

La chaleur géothermique est une source d'énergie renouvelable, ce qui implique que l'énergie prélevée dans le sol est constamment remplacée dans une échelle de temps similaire à celle de l'extraction. En effet l'exploitation d'un système géothermique engendre un « puits de chaleur » avec un gradient élevé de température. Ces gradients thermiques génèrent un flux de chaleur vers la dépression. Après l'arrêt de l'exploitation de la ressource, ce flux tend à régénérer les températures à leurs niveaux initiaux (Figure 4-12). Lors de pompages, on peut constater le même phénomène, mais la dépression est hydraulique, provoquant un flux de fluide vers celle-ci.

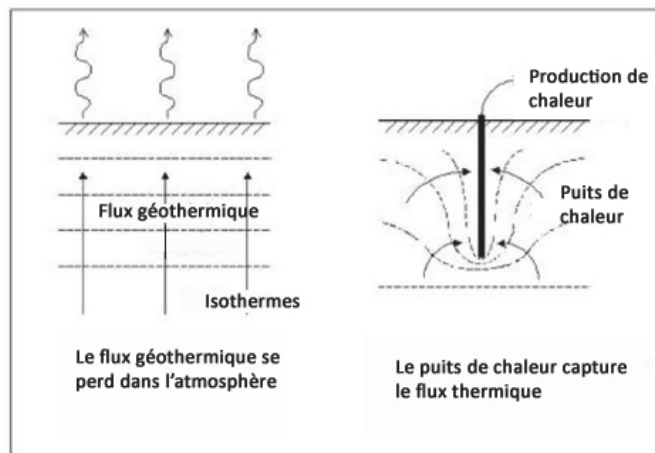


Figure 4-12. Formation d'un puits de chaleur lors de l'exploitation géothermique (Rybach et Mongillo, 2006)

La recharge des réservoirs géothermiques dépend de nombreux facteurs : taille et type du système d'exploitation, taux de production et caractéristiques de la ressource. Des simulations ont été faites pour les systèmes avec une pompe à chaleur, l'utilisation d'un doublet géothermique dans un aquifère, la génération d'électricité dans un réservoir à haute enthalpie et les systèmes géothermiques stimulés (EGS). Les résultats montrent qu'après l'arrêt de la production, la recharge présente une forme asymptotique, avec un début de recharge très rapide qui se ralentit ensuite nettement (Figure 4-13) ; Rybach et Mongillo, 2006).

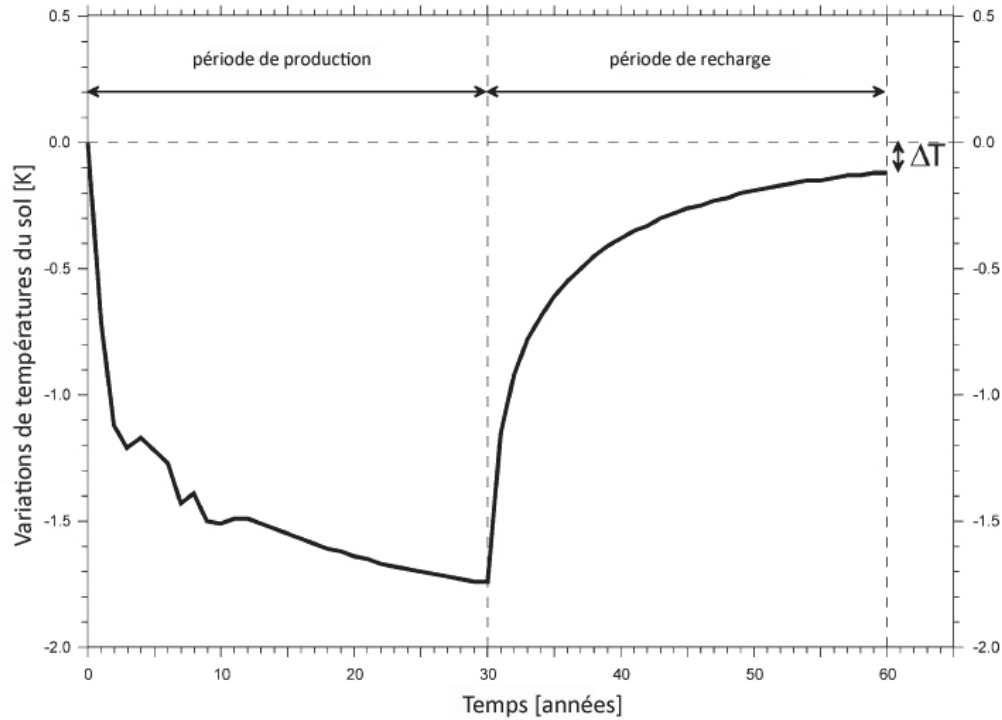


Figure 4-13. Modélisation du changement de la température du sol à une profondeur de 50 m et une distance d'1 m d'une sonde de 105 m de profondeur pour une période de production et de récupération de 30 ans chacune (Rybach et Mongillo, 2006)

En théorie une recharge complète du terrain prendrait un temps infini, cependant on estime qu'une recharge de l'ordre de 95% se produirait généralement dans un intervalle équivalent à la durée du temps d'exploitation.

Cette énergie peut être utilisée de manière « durable », ce qui implique que la production est dimensionnée de manière à pouvoir utiliser cette ressource sur le long terme. Il est cependant fréquent que ces systèmes soient surexploités (par exemple « the Geysers » aux Etats-Unis), ce qui implique que ces systèmes seront finalement épuisés. Si un équilibre entre production et recharge est trouvé une source de chaleur peut être quasiment indéfiniment opérationnelle.

Dans le cas de l'utilisation d'aquifères souterrains profonds, la principale diminution de température est celle du fluide, la matrice rocheuse conservant en général sa chaleur. Dans ce cas, la réinjection de fluide permet d'allonger considérablement la durée d'exploitation. Cependant cette technique peut également créer un puits thermique plus grand dans le réservoir.

4.5 Commentaires

Compte tenu de son contexte géographique et géologique, les caractéristiques géothermiques générales du canton peuvent être facilement déterminées (T° moyenne du sol, flux et gradient géothermique).

Une étude beaucoup plus détaillée a été réalisée afin de caractériser plus finement les paramètres géothermiques des différents terrains quaternaires et de la Molasse du canton de Genève. Cette étude a été basée sur les très nombreuses données d'essais géotechniques existantes et à leur structuration selon la classification genevoise des sols.

Il s'agit là d'une base essentielle pour l'estimation du potentiel énergétique lié aux sondes géothermiques (chap. 5) et aux géostructures énergétiques (chap. 6), mais également aux autres techniques exploitant la chaleur du sol, non traitées ici (corbeilles géothermiques, p. ex.).

Les résultats des calculs montrent une bonne concordance avec ceux des tests de réponse thermique de terrain in situ.

4.6 Bibliographie

Baujard C., Signorelli S., Kohl T., 2006. *Evaluation du potentiel géothermique suisse, rapport 2006*, Commission Suisse de Géophysique CSG, Rapport Annuel 2006, 18 pp.

Côté J. et Konrad J.-M., 2005. *Thermal conductivity of base-course materials*, Can. Geotech. J. 42, pp. 61-78.

Dysli M., 1991. *Le gel et son action sur les sols et fondations*, Complément au Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique de Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes

Fontana A., 1973. *Caractéristiques géotechniques de sols genevois*. Bulletin Technique de la Suisse Romande, N°16.

Géotechnique appliquée Dériaz S.A. (GADZ), 1997, révisé 2009. Sols Genevois ; Etude statistique des sols de la cuvette genevoise ; rapport de synthèse. 51 pp.

Groupement PGV, 2003. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud, Rapport final pour le Service de l'environnement et de l'énergie, Vaud.

Hotellier J.F., Griessen J.C., 2001. *Propriétés thermomécaniques de la molasse*, rapport de Géotechnique appliquée Dériaz S.A. (GADZ), 8 pp.

SIA 384/6, 2010. *Sondes géothermiques*, 76 pp.

SIA D 025, 1988. *Base de Dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température*, 110 pp.

Signorelli S., Kohl T., 2004. *Regional ground surface temperature mapping from meteorological data*, Global and Planetary Change 40, pp. 267-284

Steinmann G. et Laloui L., 2009. *Pompes à chaleur géothermique avec sondes verticales : le test de réponse thermique*, présentation du 2^{ème} rendez-vous annuel des pompes à chaleur, 21 pp.

Sites internet

Site planète Terre de l'ENS de Lyon : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/>

5. Sondes Géothermiques verticales

5.1 Introduction

En Suisse, l'essor de la géothermie de basse énergie est important. Il s'agit notamment du pays où la densité de sondes géothermiques verticales est la plus forte (1 sonde par km² pour un total de plus de 40'000 sondes) avec un taux de croissance important.

Les sondes géothermiques verticales sont à l'heure actuelle le système le plus fréquemment utilisé en Suisse pour l'exploitation de la chaleur du sous-sol. Elles sont situées en majorité sur le Plateau molassique où les conditions lithologiques et climatiques sont favorables. Ces installations produisent près de 75% de l'énergie géothermique annuelle du pays (OFEN, 2009 ; Figure 5-1).

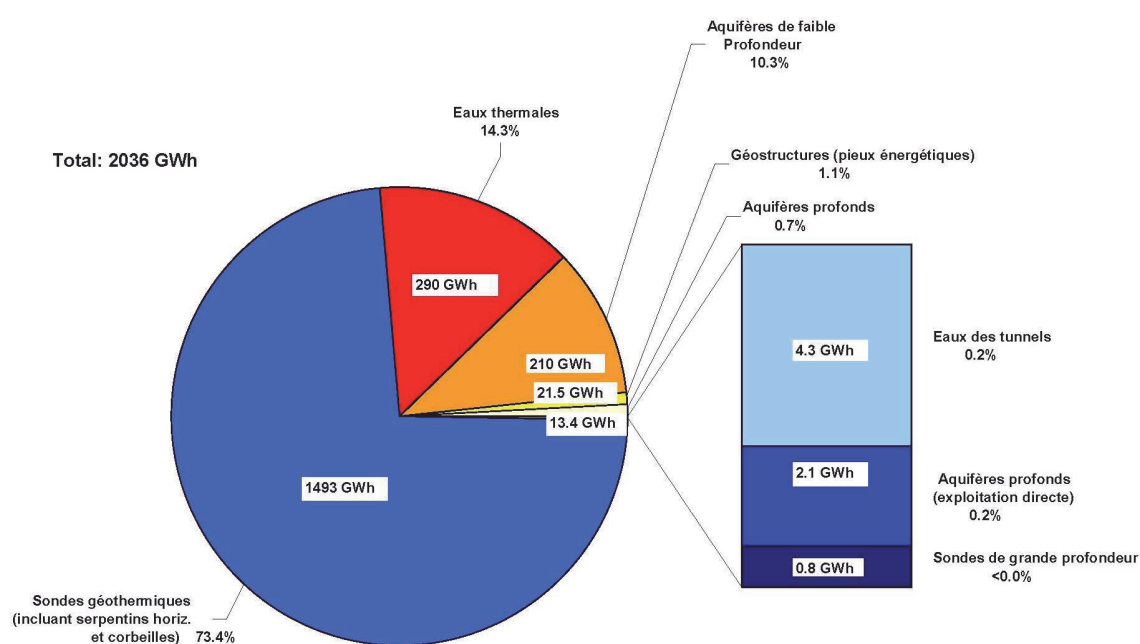


Figure 5-1 . Répartition de la production des différentes formes de géothermie en Suisse en 2008 (OFEN, 2009)

Le canton de Genève se prête bien à l'utilisation de ces sondes sur pratiquement tout son territoire, le sous-sol présentant de bonnes conditions géologiques : les terrains molassiques sont de bons conducteurs, et les terrains quaternaires du canton, à priori moins favorables pour l'utilisation des sondes géothermiques que la Molasse, sont souvent saturés en eau, ce qui assure une conductivité suffisante et les rend propre à l'exploitation. Pour l'instant, environ un millier de sondes sont répertoriées sur le canton (état 2010).

Leur répartition est présentée sur la figure 5-2.

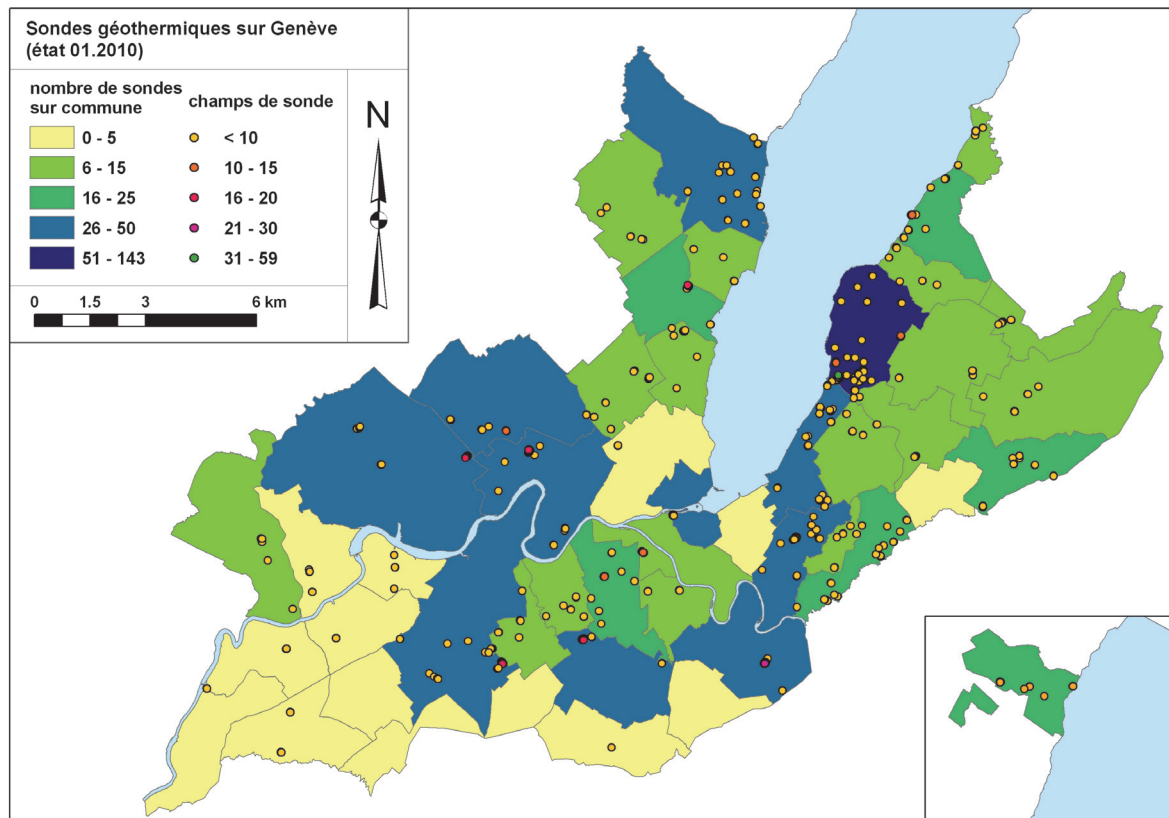


Figure 5-2. Répartition des sondes géothermiques verticales sur le canton de Genève

L'intérêt et l'utilisation de ce type d'installation étant déjà largement reconnu sur le canton, le but de ce chapitre est de synthétiser les données à disposition et de clarifier les conditions de mise en œuvre des sondes, en tenant compte des caractéristiques cantonales (géologie, législation, procédures administratives) mais également des récents développements techniques et normatifs. Ces mises au point devraient permettre d'homogénéiser mieux qu'actuellement les approches pour ce type de projet.

Par ailleurs, la présente approche à l'échelle cantonale permet également d'évaluer le potentiel géothermique global de ce type d'installations, représentant dès lors un outil d'aide à la gestion énergétique du canton.

5.2 Description des systèmes

Les sondes géothermiques verticales (SGV) sont des échangeurs de chaleur, permettant d'extraire la chaleur du sous-sol. Elles sont composées d'une ou plusieurs sondes en polyéthylène (PE), en forme de U (ou de tuyaux concentriques dans le cas d'une sonde coaxiale), dans lesquelles un fluide caloporteur circule en boucle, le plus souvent de l'eau additionnée ou non d'antigel. Le fluide se réchauffe en descendant en profondeur et ramène la chaleur du sous-sol ainsi prélevée au système de chauffage situé en surface.

Actuellement, les sondes les plus utilisées sont de type double-U, composées de deux tubes en U, d'un diamètre de 32 ou de 40 mm suivant la profondeur du système. La sonde est installée dans un forage d'un diamètre de 10 à 15 cm et l'espace entre la sonde et les parois du forage est rempli à l'aide d'un coulis constitué la plupart du temps d'un mélange de ciment et de bentonite, afin de favoriser les échanges thermiques avec la roche ou le sol environnant.

Les SGV exploitent une source de chaleur à faible température, et le plus souvent ne dépassent pas 300 à 400 m de profondeur. La grande majorité des sondes atteint des profondeurs situées entre 100 et 200 m, ce qui représente des températures allant de 12 à 15°C au fond du forage.

Les sondes sont ensuite reliées à une pompe à chaleur (PAC), qui permet, avec un apport modéré d'énergie électrique, d'augmenter la température du fluide jusqu'à 35 à 45°C pour la transmettre à un système de chauffage de basse température (chauffage par le sol), ou jusqu'à 60°C pour produire de l'eau chaude sanitaire ou si, dans le cadre d'une rénovation, les radiateurs nécessitent des températures élevées (Figure 5-3).

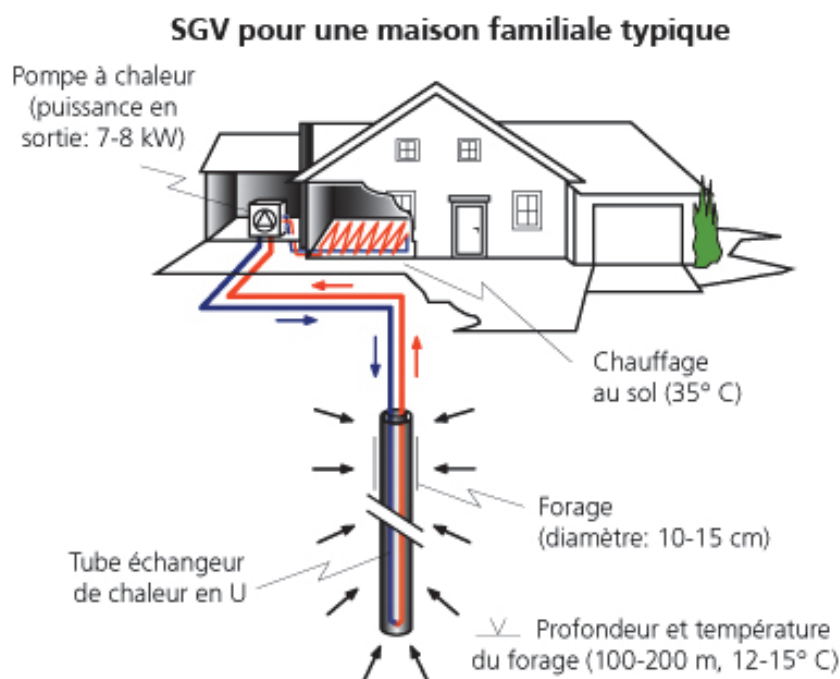


Figure 5-3 . Illustration schématique d'une sonde verticale pour une habitation standard (SSG)

La longueur de la sonde dépend des caractéristiques thermiques du sous-sol et de la demande en énergie du bâtiment. Pour une habitation neuve de petite taille (villa, petite maison locative), un système à 1 ou 3 sondes suffit généralement. Pour un bâtiment de plus grande taille, ou avec une grande demande en chaleur, on peut implanter un champ de sondes géothermiques (Figure 5-4). Ces champs peuvent compter de 10 à 100 sondes, en général espacées de 5 à 10 m. Les sondes les plus profondes peuvent atteindre 400 m de profondeur, avec des températures de 20 à 25°C.

Pour fonctionner, un chauffage par SGV nécessite un apport d'énergie externe (électricité le plus souvent) essentiellement pour la PAC, mais également subsidiairement pour alimenter une pompe de circulation utilisée pour faire circuler le fluide caloporteur dans la sonde.

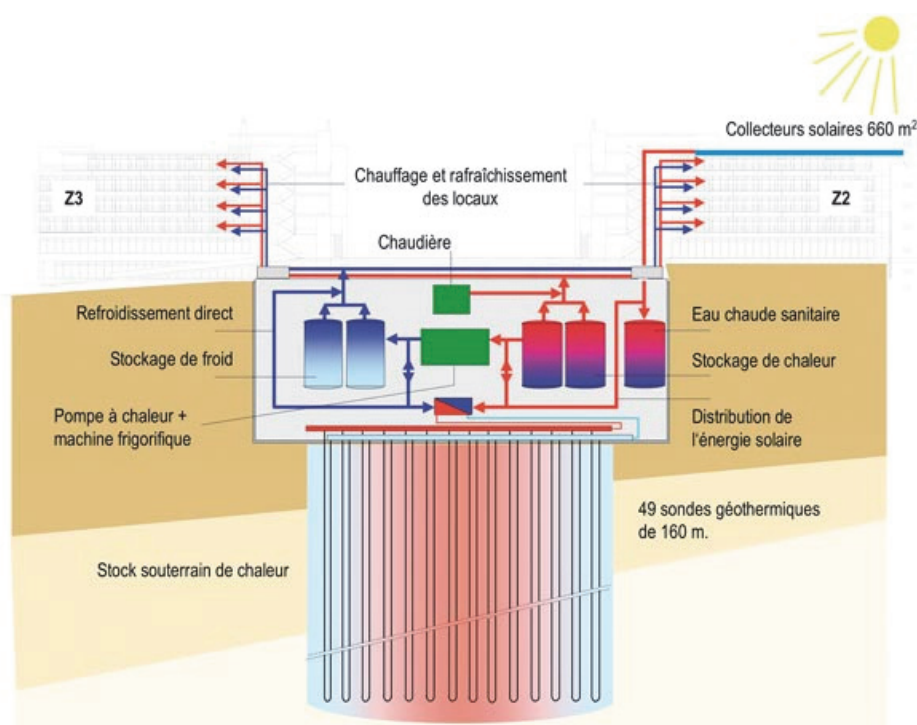


Figure 5-4 . Illustration schématique d'un champ de sondes avec stockage sous un bâtiment (SSG)

Les SGV peuvent également être utilisées pour produire du froid en été. Le fluide caloporteur évacue alors l'excès de chaleur du bâtiment dans le sous-sol, rechargeant le terrain refroidi lors de la saison de chauffage. Le rafraîchissement peut se faire soit directement, soit via la PAC qui fonctionne alors comme machine frigorifique. Dans le premier cas, cette technique de rafraîchissement naturelle est doublement avantageuse car elle permet d'éviter une consommation importante d'énergie électrique (climatiseur) et de recharger le terrain en chaleur pendant l'été, ce qui favorise l'utilisation à long terme de l'installation. Ce type de rafraîchissement appelé « geocooling » (ou « freecooling ») est utilisé principalement pour les grands bâtiments vitrés ou contenant des sources de chaleur parasite (ordinateurs, machines, ateliers). Le freecooling a toutefois une puissance limitée du fait que le sol est relativement chaud par rapport aux températures de rafraîchissement. L'utilisation d'une PAC sera ainsi souvent nécessaire pour obtenir les températures de rafraîchissement souhaitées.

D'une manière générale, plus l'on arrivera à satisfaire la demande de chaud par des températures basses, et de froid par des températures élevées, meilleur sera le rendement. Pour pouvoir être efficaces pour du refroidissement, les sondes ne devraient pas dépasser un ordre de grandeur de 200 m de profondeur.

Dans les champs de sondes, il est indispensable d'équilibrer la température du terrain sur l'année en combinant demande de chaud en hiver (qui refroidit le terrain) et demande de froid en été (qui réchauffe le terrain). En effet, l'énergie naturelle ne permet plus de satisfaire la demande sans déséquilibre qui s'accroît donc au cours du temps.

5.3 Exemples et projets de réalisation à Genève

Comme mentionné en introduction, le recours à des sondes géothermiques est désormais largement répandu dans le canton, pour tout type de bâtiment (villas, bâtiments locatifs, entreprises, centres commerciaux).

Parmi les projets les plus importants, on citera le récent quartier « Vésenaz Sud-Ouest » comprenant des bureaux, des logements PPE (label MINERGIE), un centre commercial (MANOR) et un groupe de

maisons villageoises. La production d'énergie nécessaire pour le chauffage, la production de l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement de l'ensemble du quartier, est produite par des pompes à chaleur raccordées à un réseau de 60 sondes géothermiques de 260 m de profondeur et totalisant une longueur de 15 km. Les sondes ont été réalisées sous le radier du 2^{ème} sous-sol du parking du centre commercial. Les puissances en jeu sont de l'ordre de 610 kW pour la production de froid et de 820 kW pour la production de chaleur. L'évaluation économique du projet a démontré qu'en comparaison avec une installation traditionnelle au mazout, le retour sur investissement sera effectif au bout de 13 ans environ (1.3 millions CHF d'investissement supplémentaire à la base et 100'000.- CHF d'économie annuelle sur le fonctionnement) (E.C.M. SA, 2009).

Sur le canton, il existe une quinzaine d'installations comportant au moins 10 sondes géothermiques. La plus récente étant celle du nouveau centre commercial IKEA à Vernier.

5.4 Normes et directives

Une nouvelle norme SIA (n° 384/6) concernant le dimensionnement et l'installation des sondes géothermiques est entrée en vigueur le 1er janvier 2010. Elle comprend tous les aspects techniques relevant de l'étude, du calcul, du dimensionnement, de l'exécution, de l'exploitation et de l'entretien des SGV jusqu'à une profondeur de 400 m sous la surface du terrain.

Elle définit notamment deux grands types d'installations :

- les installations à sondes géothermiques simples comprenant au maximum 4 sondes et pour lesquelles des calculs de procédés simplifiés peuvent être appliqués
- les installations à sondes géothermiques complexes comptant plus de 4 sondes géothermiques nécessitant un dimensionnement détaillé.

D'autre part, sous l'égide de l'office fédéral de l'environnement, une directive sur l'exploitation de la chaleur du sol et du sous-sol a été rédigée (OFEV, 2009). Il s'agit principalement des recommandations légales vis-à-vis de la protection du sous-sol et des eaux souterraines lors de la construction d'installations de géothermie à faible profondeur.

Ces documents sont à considérer désormais comme incontournables et représentent les règles de l'art en matière technique et environnementale.

5.5 Avantages

Les SGV sont, à la base, des systèmes de relativement petite ampleur pour une production modérée de chaud et de froid et conviennent bien pour les installations de chauffage décentralisées, telles que les maisons familiales, les groupes de villas, les écoles ou les salles polyvalentes.

Les coûts d'exploitation sont faibles car les sondes ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne consomment pas de combustible. De ce fait, même si les coûts d'investissement sont plus importants que pour des installations « classiques » (mazout, gaz), les systèmes utilisant des SGV sont rentabilisés au bout de quelques années seulement.

Des sondes peuvent également être installées dans le cadre d'une rénovation d'habitation.

Les SGV se révèlent également adaptées dans le cadre de projets plus importants (centres commerciaux par exemple) sous la forme de champs de sondes, utilisables tant pour le chauffage en hiver que pour le rafraîchissement en été.

D'un point de vue géologique, ces systèmes sont très adaptables : en effets ils ne nécessitent pas la présence d'aquifère (bien que la saturation du terrain soit souhaitable) et peuvent être installés sur une grande partie du territoire genevois si l'on exclut certaines zones d'interdiction (chapitre 3.7 ; Figure 5-5).

Il faut également souligner l'importance du peu de pollution que produisent ces systèmes : en effet ils contribuent à diminuer l'utilisation d'énergies fossiles et produisent comparativement très peu de CO₂. En revanche, ils nécessitent l'apport d'énergie électrique pour le fonctionnement des pompes à chaleur. Le bilan environnemental doit bien évidemment inclure ce facteur.

Leur durée de vie atteint en théorie 50 ans, voire plus (~20 ans pour la pompe à chaleur).

5.6 Risques et contraintes associées

5.6.1 Risques environnementaux

Les risques principaux que les sondes géothermiques peuvent poser à l'environnement sont les suivants:

- Une fuite de fluide caloporteur suite à un défaut ou à un dommage de la sonde (relevons toutefois que les fluides sont légalement contrôlés afin de minimiser leur effet environnemental - voir plus bas).
- La mise en connexion de deux aquifères auparavant séparés par une couche imperméable, en cas de défaut d'exécution.
- L'infiltration d'eau de surface ou de contaminants le long d'une sonde à cause d'un défaut de remplissage ou lors du forage.

Les contraintes générales pour la protection de l'environnement sont données dans la directive de l'OFEV (2009) :

- Les sondes géothermiques sont interdites en zone S1, S2 et S3 de protection des eaux.
- Il en est de même en secteur A_U de protection des eaux, sauf dérogation de l'autorité (en principe, pas de dérogation à Genève).
- Dans les périmètres comportant plusieurs aquifères superposés, des eaux souterraines artésiennes ou des nappes souterraines très minéralisées, l'implantation de sondes géothermiques n'est généralement pas indiquée, ou doit faire l'objet de précautions particulières.
- Dans le cas d'installation de sondes dans un site pollué, des mesures doivent être prises pour éviter que les polluants ne pénètrent dans les eaux souterraines.
- Les sondes géothermiques ne sont pas admises dans les zones en glissement (risque de rupture).
- Seuls les liquides caloporteurs sans danger pour les eaux sont admis (propylène glycol, éthylène glycol, polyéthylène glycol, alcool éthylique (éthanol), alcool méthylique (méthanol), chlorure de calcium, chlorure de magnésium, chlorure de potassium, carbonate de potassium, acétate de potassium, formiate de potassium, chlorure de sodium et carbonate de sodium). Les installations doivent être équipées de dispositifs automatiques de surveillance de fuites. En cas de fuite, un dysfonctionnement du système apparaîtra rapidement.

Selon les cas, les cantons peuvent définir des obligations supplémentaires.

A cet égard, le canton de Genève a établi une carte d'implantation des sondes géothermiques qui définit les secteurs dans lesquels les sondes sont en principe admises, ceux où elles sont interdites et enfin ceux qui demandent un examen au cas par cas des projets (Figure 5-5). L'interdiction ou la restriction de

construction des sondes est liée aux secteurs sensibles des nappes exploitées pour l'eau potable. Cette carte peut être consultée en ligne sur le site du Service de géologie, sols et déchets (GESDEC) avec les directives associées pour les demandes de renseignements.

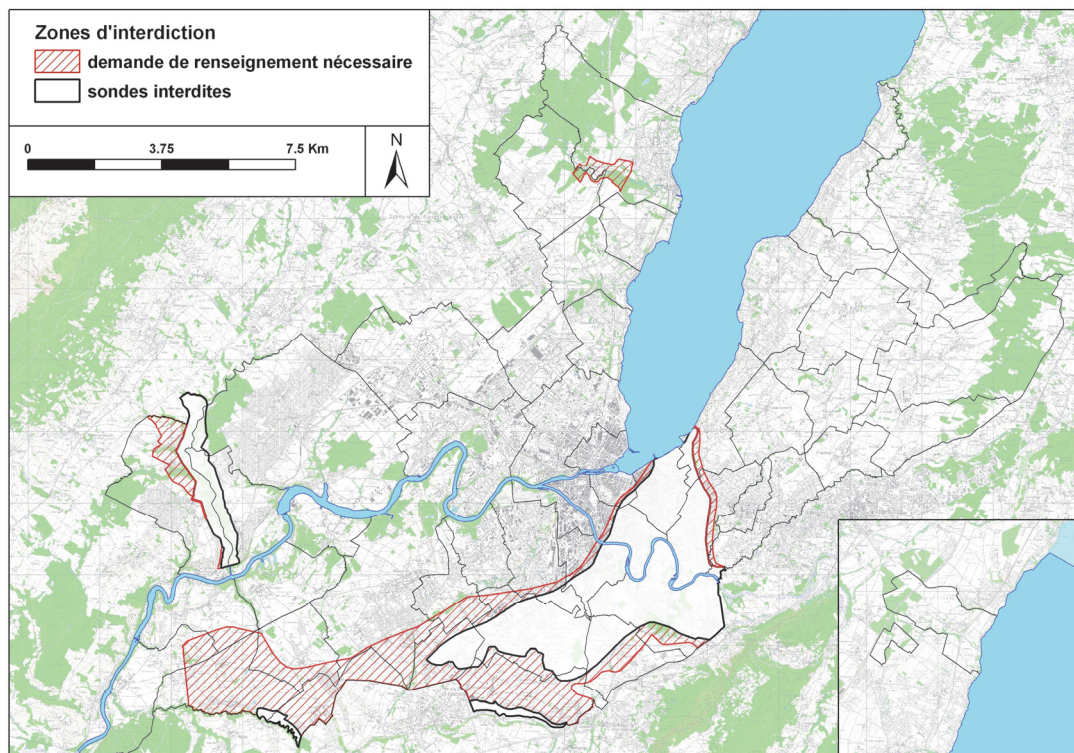


Figure 5-5. Zones d'interdiction des sondes géothermiques. Partout ailleurs elles sont en principe autorisées

Dans les zones où les sondes sont autorisées d'un point de vue de la protection des eaux, d'autres facteurs peuvent limiter ou empêcher leur implantation (voir point 5.6.3).

5.6.2 Risques géologiques et géotechniques

Si les sondes sont implantées sous les bâtiments, le risque d'afflux de gaz provenant du sous-sol doit être considéré et les équipements adaptés pour assurer la sécurité de l'installation et des personnes. Des échappements de gaz naturel lors de forage dans la Molasse peuvent notamment se produire (Sachs et Eberhard, 2010). A Genève, ce risque est faible, mais il est possible de rencontrer des formations de Molasse bitumineuse qui peuvent perturber le forage, et nécessiter des filières d'évacuation particulières pour les terrains excavés.

L'arrivée d'eau artésienne est également un risque pouvant impliquer l'abandon du projet si les pressions sont trop élevées. A Genève ce risque est faible mais pas inexistant.

Les sondes peuvent également présenter des risques indirects comme l'effet de barrage d'un champ de sondes sur l'écoulement d'un aquifère, et le gel du sol en cas de surexploitation de l'installation (Blunier, 2009). Au cas où de tels risques seraient présents sur un site, leurs effets devraient être soigneusement étudiés afin d'éviter un désordre durable et potentiellement néfaste dans le sous-sol.

5.6.3 Conflits avec le bâti existant et futur

L'utilisation des sondes géothermiques comme source d'énergie présente l'avantage d'utiliser la ressource d'énergie localement, ce qui évite notamment des transports de carburant et des risques de pollution (fuites de citernes, accidents). En zone urbanisée, le sous-sol est toutefois fortement mis à contribution, nécessitant alors une coordination pour éviter des conflits.

Les problèmes liés au bâti existant sont relativement simples à appréhender. Il s'agit en effet d'éviter d'endommager des équipements souterrains existants. Ceux-ci peuvent être de types très différents : conduites d'eau potable ou usée, réseaux électriques ou téléphoniques, télé-réseau, fibre optique, gazoduc, galeries, tunnels routiers ou ferroviaires, sous-sols de bâtiments, puits de pompage, ouvrages géothermiques, etc.

A Genève, il est relativement facile d'obtenir des informations sur les infrastructures souterraines, en consultant soit le Système d'Information du Territoire à Genève (SITG), soit certains acteurs spécifiques (services industriels, opérateurs téléphoniques, etc.). Les données sur les ouvrages anciens ou sur certaines parcelles privées peuvent néanmoins s'avérer lacunaires.

Des cas plus compliqués à gérer peuvent néanmoins exister, comme celui de l'existence d'un dispositif géothermique à proximité immédiate d'un nouveau projet. L'influence mutuelle (perte de rendement) des deux entités doit alors être prise en compte (voir 5.8.3).

En ce qui concerne le bâti futur, il faut rappeler le fait que l'emprise des sondes dépasse en profondeur la limite normale d'utilisation du sous-sol sous une propriété privée. Les sondes n'ont donc pas la priorité sur de futurs travaux souterrains d'utilité publique (ex : tunnels) qui les recouperaient. Il convient donc de s'informer de l'existence d'un tel projet et, le cas échéant, d'évaluer si le système est viable dans sa durée de vie limitée (Meyer, 2009).

Un exemple potentiel concret de ce type de conflit existe dans le canton de Genève dans le secteur du projet MICA (Mon Idée - Communaux d'Ambilly). En effet, ce projet de développement comportant un potentiel de 2300 logements prévoit la possibilité de réaliser un champ de sondes géothermiques d'au moins 100 mètres de profondeur. Sa réalisation est prévue entre 2014 et 2023. Par ailleurs, un projet de contournement « Est » de Genève est à l'étude (réalisation au plus tôt à l'horizon 2030) dont une des variantes passerait en tunnel sous le projet MICA. Les sondes seraient donc réalisées avant le tunnel mais c'est ce dernier qui aura la priorité sur l'usage du sous-sol.

Ce conflit, bien qu'encore potentiel, illustre toutefois très clairement les problèmes du futur et l'importance d'une coordination de l'utilisation du sous-sol. Cette problématique de la dimension souterraine de l'aménagement du territoire a été identifiée comme étant de plus en plus critique et fait l'objet d'un projet national de recherche (Deep City, EPFL).

5.7 Procédure d'autorisation et contraintes légales

Pour procéder à une installation dans le canton de Genève, si on se trouve en dehors du secteur de restriction d'utilisation, il faut directement procéder à une requête en autorisation de construire auprès du Département des constructions et des technologies de l'information (DCTI), conformément à la loi sur les constructions et les installations (LCI). Le Service cantonal de géologie, sols et déchets (GESDEC) donnera alors son préavis, et émettra d'éventuelles réserves.

En vue du chantier, un formulaire d'annonce de forage doit être faxé au GESDEC au moins 48 heures avant le début des travaux. Dans la mesure du possible, l'entreprise de forage devra pouvoir répondre au label de qualité pour sondes géothermiques établi par la Commission du label de qualité du Groupement suisse des pompes à chaleur.

Les installations et leur mise en œuvre doivent être conformes aux directives de l'Office fédéral de l'énergie sur l'exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol. En particulier, sur la base de ces directives, la législation cantonale prévoit qu'un rapport géologique de suivi du forage décrivant les terrains traversés devra être établi et transmis au GESDEC au plus tard un mois après la fin des travaux (Règlement sur l'utilisation des eaux superficielles et souterraines - L2 05.04 art. 8). Cette prestation est souvent proposée par l'entreprise de forage mais il est préférable qu'elle soit réalisée par un géologue exerçant sur le canton, connaissant mieux la géologie locale et les enjeux pouvant exister dans certains secteurs, ce qui permet un meilleur dialogue avec l'entreprise de forage et l'autorité compétente (GESDEC).

Les déchets d'excavation du forage devront être mis en décharge selon la législation en vigueur. Dans le cas d'imprégnations par des hydrocarbures géogènes, comme cela peut parfois arriver dans la Molasse (par exemple dans la région de Meyrin, Satigny, Dardagny), les déblais devront être acheminés vers une filière d'évacuation appropriée en fonction de leur degré de pollution.

5.8 Dimensionnement des sondes

5.8.1 Principes

Lors de son fonctionnement la sonde crée un « puits thermique », dont le volume dépend de la longueur de la sonde et de la conductivité thermique du terrain. Plus la sonde est profonde, plus son influence latérale augmente. Par ailleurs, si la conductivité du terrain est faible, le volume influencé sera plus faible, mais la température changera de manière plus intense (Figure 5-6).

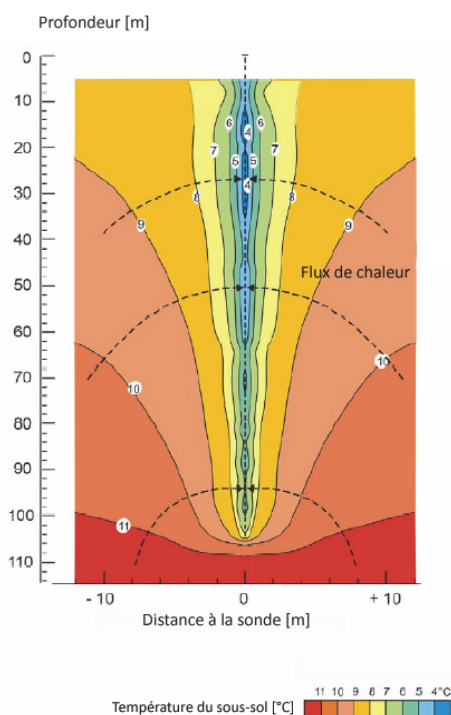


Figure 5-6 . Déviation du flux de chaleur normalement vertical dans le sous-sol, liée à la présence d'une sonde géothermique verticale de 100 m (Huber, 2005)

Un prédimensionnement doit au minimum être réalisé avant la demande d'autorisation d'un forage, afin de préciser la profondeur et le nombre des sondes.

Les facteurs qui influencent le rendement des sondes et l'énergie que l'on peut en tirer sont nombreux et comprennent les paramètres généraux du site ainsi que les paramètres techniques (notamment le mode de fonctionnement, température, durée d'utilisation, recharge) et géométriques de l'installation.

La norme SIA 384/6 sur les sondes géothermiques (2010), définit deux cas de figure pour le dimensionnement :

Les **systèmes simples**, avec au maximum 4 sondes et un profil de besoins énergétiques normal dans le cas d'une habitation. Le dimensionnement de ces installations peut être calculé au moyen des méthodes présentées dans la norme. Les besoins énergétiques de l'habitation devront être estimés en se basant sur la norme SIA 384.201, et les besoins en eau chaude sanitaire selon SIA 2024.

Les **systèmes complexes** sont ceux qui comprennent plus de 4 sondes, des besoins spécifiques de refroidissement ou encore des besoins énergétiques spéciaux. Dans ce cas un calcul détaillé du dimensionnement devra être fait pour l'installation en particulier. Il faut prendre en considération la charge effective dans le temps et effectuer des simulations pour vérifier notamment l'équilibre thermique dans le sous-sol à long terme. Cette démarche doit être effectuée en étroite collaboration entre les spécialistes de la thermique des bâtiments et ceux du sous-sol ce qui, dans la réalité n'est pas toujours facile (« Géologues : apprenez le chauffage ; Chauffagistes : apprenez la géologie » - Matthey, 2003).

Il est à relever qu'une optimisation d'une exploitation géothermique nécessite une très bonne connaissance des besoins thermiques des bâtiments à équiper. Il conviendra donc d'étudier ces besoins avec un soin particulier.

5.8.2 Paramètres généraux du site

CONDUCTIVITE THERMIQUE k [W/(mK)] et CAPACITE CALORIFIQUE VOLUMIQUE C_v [kJ/(m³K)] DU TERRAIN

La conductivité thermique du terrain (chapitre 4.1.1) est le facteur prépondérant de dimensionnement pour un site donné. La capacité calorifique volumique a également une influence sur le dimensionnement mais son importance est moindre. Lorsque la conductivité et la capacité augmentent, la longueur de sonde nécessaire diminue, puisque les conditions sont plus favorables.

Des simulations (PGN, 2008) montrent que la longueur de sonde nécessaire diminue de 20% lorsque la conductivité k monte de 2.0 à 3.0 W/(mK). En revanche elle ne diminue que de 4% lorsque la capacité calorifique C_v monte de 2'000 à 3'000 kJ/(m³K).

Pour les deux paramètres, la relation avec la longueur de sonde est de type logarithmique. Par conséquent, leur influence est importante surtout lorsque leur valeur est faible (mauvaises propriétés thermiques du terrain) - (PGN, 2008).

L'importance relative de ces deux paramètres implique que si la capacité calorifique peut être estimée grossièrement, il est préférable d'utiliser la valeur la plus précise possible de la conductivité thermique afin d'éviter des erreurs de dimensionnement, surtout pour des terrains aux mauvaises propriétés thermiques.

Dans le cas de petites installations, on peut estimer la conductivité thermique à partir de la géologie du sous-sol. Pour de grands champs de sondes, il devient économiquement possible de la déterminer plus précisément à l'aide d'un test de réponse thermique.

Rappelons également que les calculs de ces valeurs selon chapitre 4.1.1 donnent une bonne approximation pour les sols genevois, pouvant amener, pour la conductivité thermique, à utiliser une marge de tolérance moins sévère que celle préconisée par la norme 384/6 (-15% sur le calcul pondéré à partir des données géologiques et de la littérature).

TEMPERATURE ANNUELLE MOYENNE DE L'AIR

La température annuelle moyenne de l'air a une influence importante sur le dimensionnement des sondes. En effet, la température du sol en surface dépend de celle-ci puis augmente ensuite en profondeur en fonction du gradient géothermique. La consommation thermique annuelle est également plus grande si la température moyenne est basse.

La température annuelle moyenne dépend principalement de l'altitude, mais également de la morphologie locale du terrain (exposition et climat local). Cependant, comme nous l'avons évoqué dans les premiers chapitres, le canton de Genève présente de faibles variations d'altitude et on estime généralement que la température reste la même sur l'ensemble du canton. Il est donc possible de se baser sur les mesures de la station météorologique de Cointrin pour les températures moyennes sur tout le territoire genevois (T° air = 9.6°C (norme 1961-1990); T° sol = 11.2°C).

FLUX GEOTHERMIQUE [W/m^2]

Dans certaines régions de la Suisse, de grandes variations peuvent être observées dans le flux géothermique. Dans le cas du canton de Genève, cependant, on peut estimer que le flux géothermique est stable à $\sim 60\text{-}70 \text{ mW}/\text{m}^2$ sur l'ensemble du canton (chapitre 4.4).

5.8.3 Paramètres techniques et géométriques de la sonde

Les résultats de l'extraction thermique seront influencés par de nombreux paramètres techniques et géométriques de la sonde. Les variables sont :

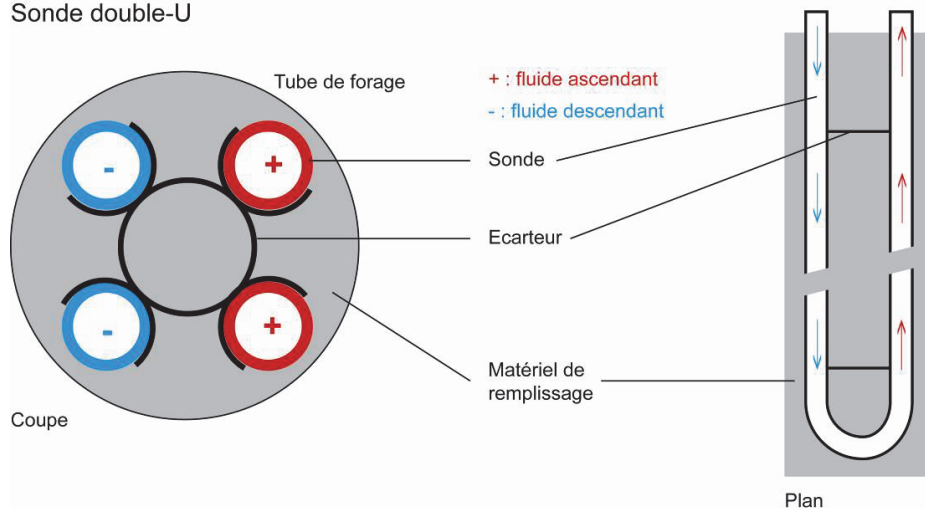
- Le type de sonde
- La longueur de la sonde
- Le diamètre du forage
- Espace entre les tubes de la sonde
- Le type de remplissage du forage
- Le type de fluide caloporteur
- Le débit à travers les tubes
- Le nombre de forages
- L'espacement entre les forages et leur configuration géométrique.

L'influence de ces différents paramètres a été étudiée en détail par modélisation dans le cadre de l'étude du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN). Nous en reprenons ici les résultats.

TYPES DE SONDES

Il existe actuellement quatre types de sondes : sonde en U, double-U, triple-U ou coaxiale. La figure 5-7 présente le schéma d'une sonde double-U et d'une sonde co-axiale.

Sonde double-U



Sonde coaxiale

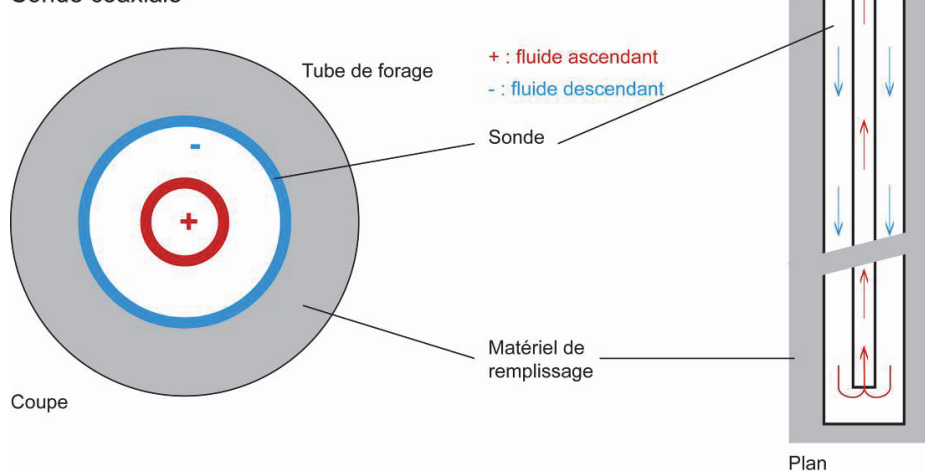


Figure 5-7. Schéma d'une sonde en double-U et d'une sonde coaxiale (PGN, 2008). Les écarteurs dessinés sur la sonde double-U servent à maintenir un écart maximal entre les tubes de la sonde, ce qui favorise le rendement thermique de l'installation.

La sonde double-U est de loin la plus fréquemment utilisée, car elle est relativement facile à mettre en place, moins coûteuse qu'une sonde en triple-U pour une efficacité comparable, et beaucoup plus efficace qu'une sonde coaxiale ou en simple-U, de l'ordre de 10 à 20 % (PGN, 2008).

LONGUEUR DE LA SONDE

La longueur de sonde est généralement dimensionnée en fonction des besoins thermiques et des éventuelles restrictions posées par le terrain (aquifères, type de sol).

DIAMETRE DU FORAGE

Le diamètre du forage a une influence sur la résistance thermique de l'échangeur, car il détermine l'épaisseur du remplissage annulaire. Il détermine également la largeur maximale de la sonde et l'espacement maximal qu'il peut y avoir entre les branches de U de la sonde. Actuellement, les forages pour les SGV ont généralement un diamètre standard de 13 cm jusqu'à 150 m de profondeur et 15 cm pour des forages plus profonds.

ESPACE ENTRE LES TUBES DE LA SONDE

Ce paramètre (qui n'existe pas pour les sondes coaxiales), définit la distance entre les tubes « froids » et les tubes « chauds » d'une sonde. La valeur maximale dépend du diamètre du forage, et la valeur minimale du diamètre du tube. Cet écartement devrait être le plus important possible afin d'éviter les interactions thermiques entre les tubes. Dans la pratique, la valeur maximale ne peut être atteinte qu'en posant des écarteurs à intervalles réguliers (tous les 8 à 10 m) lors de l'installation de la sonde.

La pose d'écarteurs entraîne cependant un surcoût qui n'est pas forcément compensé par la diminution de la longueur nécessaire de la sonde. La pose d'écarteurs est cependant recommandée, car elle assure un meilleur rendement thermique de la sonde, ce qui permet de limiter la consommation de la PAC. Les simulations de l'effet d'un espacement minimal et maximal sur la longueur d'une sonde indiquent un gain potentiel maximal de l'ordre de 5 à 10 % (PGN, 2008).

REPLISSAGE DU FORAGE

La conductivité thermique du remplissage dépend du matériau utilisé pour colmater le vide entre la sonde et le terrain. Le plus souvent il s'agit d'un mélange de bentonite (1/3) et de ciment (2/3), avec une conductivité thermique comprise entre 0.8 et 1 W/(mK), ce qui est faible en comparaison d'autres mélanges à base de ciment atteignant des conductivités de 2 W/(mK). Le choix du mélange devrait dépendre de ses caractéristiques thermiques, de son coût et des exigences d'étanchéité du système vis-à-vis des eaux souterraines. Dans les faits, les entreprises de forage utilisent des produits standards moyens.

Les simulations montrent que ce paramètre est celui qui aura le plus d'influence sur la température du fluide. Il est donc important de choisir un remplissage de meilleure qualité, car le surcoût engendré est nettement compensé par la diminution de la longueur nécessaire de sonde. Un meilleur conducteur utilisable est un mélange de sable de quartz saturé d'eau (3 W/(mK)), mais celui-ci présente l'inconvénient de ne pas être étanche, ce qui renforce les risques de pollution des eaux souterraines par ruissellement le long du forage ou de mise en contact de deux aquifères. Pour ces raisons, son utilisation à Genève n'est généralement pas autorisée.

La résistance du contact entre la sonde et le remplissage est déterminée par la façon dont le remplissage a été fait. Si celui-ci a été correctement effectué et comble entièrement l'espace entre la sonde et le forage, la résistance devrait être nulle, mais elle peut atteindre 0.03 K/(W/m) s'il existe des vides entre la sonde et le terrain. Cependant l'influence de ce paramètre sur le rendement thermique total reste très faible, de l'ordre de 2 à 3 % (PGN, 2008).

TYPE DE FLUIDE CALOPORTEUR

Il existe plusieurs types de fluides caloporteurs, avec différentes conductivités (W/(mK)), capacité calorifique (J/m³/K), densité (kg/m³) et viscosité (kg/m/s) et températures de solidification (°C). Le type du fluide influencera le rendement thermique de la sonde par ses propriétés physiques (conductivité thermique et capacité calorifique), mais aussi et surtout par son régime d'écoulement en fonction du débit fixé qui dépend de sa densité et de sa viscosité. On rappellera que la liste des agents caloporteurs est réglementée (chapitre 5.6.1).

Le fluide le plus fréquemment utilisé est le monopropylène glycol 33%, notamment parce que sa température de solidification (gel) est très basse (-17°C), qu'il est relativement inerte, peu polluant et peu coûteux.

DEBIT A TRAVERS LES TUBES ET REGIME D'ECOULEMENT

Le débit est fixé par la puissance thermique de la PAC et par la différence de température du fluide entre l'entrée et la sortie de la PAC selon cette formule :

$$Q = \frac{P_{sol}}{\Delta T \cdot C_{V(fluide)}} \quad (\text{éq. 4.1})$$

$C_{V(fluide)}$ est la capacité calorifique volumique du fluide et ΔT la différence de température entre l'entrée et la sortie de la PAC. Pour un rendement thermique idéal, cette valeur est généralement fixée à 3°C. P_{sol} est la puissance thermique extraite du terrain qui dépend de la puissance thermique de la PAC P_{th} et de son coefficient de performance (COP) :

$$P_{sol} = P_{th} \frac{(COP - 1)}{COP}$$

Le débit permet de calculer le nombre de Reynolds (R_e) du fluide dans la sonde avec la formule ci-dessous :

$$R_e = \frac{\rho Q d}{A \eta}$$

où ρ est la densité du fluide [kg/m^3], Q le débit du fluide [m^3/s], d le diamètre de la sonde [m], A la surface de la sonde [m^2] et η la viscosité du fluide [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$].

Le nombre de Reynolds définit le régime d'écoulement du fluide. S'il est inférieur à 2300, l'écoulement est laminaire, alors que s'il est supérieur à 2300, l'écoulement devient turbulent. Le régime d'écoulement du fluide a une influence importante sur les échanges thermiques qui ont lieu avec le sous-sol. Les flux de chaleur entre le fluide et le sous-sol sont décrits par la relation suivante :

$$W = h(T_s - T_\infty)$$

où T_s est la température du solide et T_∞ la température du fluide non influencée par la présence du solide ; h est appelé coefficient d'échange thermique et dépend des propriétés thermiques du fluide et de la géométrie du milieu, mais surtout du régime d'écoulement du fluide. Lorsque le régime d'écoulement est laminaire, les échanges de chaleur à l'intérieur du fluide ainsi qu'entre le fluide et le solide sont uniquement de type conductif. Lorsque le régime devient turbulent, une partie des échanges thermiques est de type convectif et par conséquent plus efficace. Ainsi les échanges entre le sous-sol et le fluide sont nettement améliorés si le régime du fluide est turbulent ($R_e > 2300$).

Les analyses de sensibilité réalisées dans le cadre de PGN montrent que l'influence du régime d'écoulement peut atteindre 15 % sur la longueur nécessaire d'une sonde.

D'un autre côté les pertes de charge liées à la circulation du fluide dans la sonde augmentent fortement lorsque le régime d'écoulement passe de laminaire à turbulent puisqu'elles sont proportionnelles à la vitesse dans le premier cas et proportionnelles au carré de la vitesse dans le second. Il faut par conséquent plus d'énergie pour faire circuler le fluide dans la sonde si son régime est turbulent.

Dans l'idéal, il faudrait donc optimiser le débit dans les sondes pour que R_e soit proche de 2300. Dans la pratique le débit étant imposé par l'équation 4.1, il est possible d'avoir une influence sur R_e uniquement en changeant le diamètre de la sonde ou le type de fluide, ce qui se fait rarement, principalement pour des raisons techniques.

L'ensemble des propriétés de l'échangeur thermique se combinent en un facteur qui est la **résistance thermique de la sonde ($K/(W/m)$)**. Pour les sondes en double-U, les paramètres qui ont le plus d'influence sont le matériel de remplissage, l'écartement entre les tubes et le débit dans les sondes (Matthey et al 1996).

NOMBRE DE FORAGES

Pour un projet donné, la longueur totale de sonde nécessaire peut être répartie de différentes manières : peu de sondes longues ou plusieurs sondes courtes, la première solution étant généralement préférable.

Le choix peut être imposé si les profondeurs maximales de sondes sont limitées. A Genève, c'est en principe le cas dans les zones où les projets doivent faire l'objet d'un examen particulier, au droit des nappes exploitées (zones hachurées – voir chapitre 5.6.1). Il pourra donc être nécessaire d'effectuer plusieurs sondes courtes pour alimenter une maison familiale plutôt qu'une seule longue, interdite si elle doit pénétrer dans un aquifère protégé.

Le choix peut être libre dans la mesure où il se poserait dans une zone à haute densité d'habitation, où il peut être utile de construire une grande installation dimensionnée pour plusieurs bâtiments, plutôt que de multiplier les systèmes individuels.

Pour une longueur totale de sonde identique, les performances et les coûts des sondes longues et des sondes courtes ne sont toutefois pas les mêmes.

En effet, la longueur combinée de sondes courtes multiples devra être plus grande que celle d'une sonde longue unique, non seulement car la température atteinte en fond de forage sera moindre, mais également parce que le refroidissement du terrain occasionné par une installation de ce type sera plus important (Figure 5-8; Signorelli, 2004 ; Signorelli et al., 2004 ; PGN, 2008). La puissance thermique de la PAC joue également un rôle : à partir d'une puissance supérieure à 20 kW, le régime d'écoulement dans une sonde unique passe de laminaire à turbulent, ce qui augmente fortement son rendement. En revanche, dans le cas de sondes multiples, le régime d'écoulement peut rester laminaire. Dans ce dernier cas, la longueur totale de sonde sera bien plus importante.

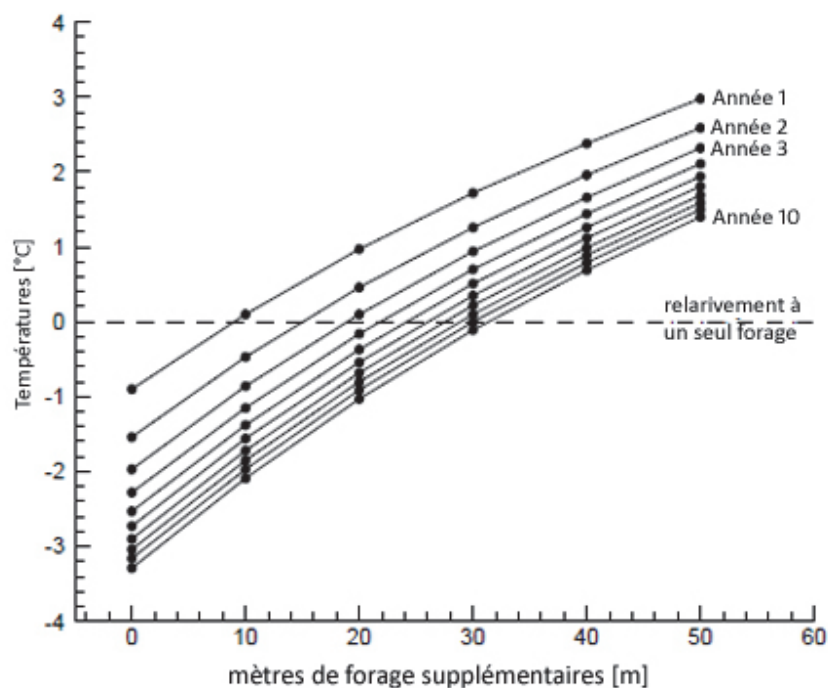


Figure 5-8 . Différence entre la température de production du fluide d'une seule sonde et celle d'un champ de 6 sondes espacées de 7.5 m au cours de 10 années de production, en fonction de la longueur de sonde supplémentaire (longueur de sondes pour la simulation : 100 m). On constate que pour atteindre les mêmes températures de fluide qu'une sonde unique avec un champ de sonde, il faut prévoir 30% de forage supplémentaires, soit, pour la simulation présentée ici, 30 m pour des sondes de 100 m (d'après Signorelli, 2004)

Au niveau des puissances extraites du terrain, les analyses montrent que la différence entre une petite installation avec une sonde unique et une petite installation à plusieurs sondes est relativement faible (5%). En revanche, lorsque la demande thermique augmente, cette différence devient très importante (25 à 40%) (PGN, 2008).

A cause de cette baisse de rendement thermique, la longueur totale nécessaire et par conséquent le prix de l'échangeur augmentent très rapidement avec le nombre de sondes. Les installations comprenant plusieurs sondes sont également plus coûteuses à cause du prix des raccords supplémentaires nécessaires pour connecter les sondes.

Il est donc économiquement recommandé, si possible, d'installer un nombre minimal de sondes pour alimenter une installation (PGN, 2008).

A partir de quatre sondes, il est recommandé, voire indispensable de procéder à une recharge thermique du terrain en été pour ne pas surexploiter la réserve thermique du sous-sol. Cette recharge peut se faire en rafraîchissant les bâtiments à l'aide des sondes, ou en injectant dans le sous-sol de la chaleur captée par des panneaux solaires thermiques. La norme SIA 384/6 impose qu'une durée d'utilisation d'au moins 50 ans doit être garantie en regard de l'équilibre thermique du sous-sol.

ESPACEMENT ET CONFIGURATION, INFLUENCES MUTUELLES ENTRE LES SONDES

Lors du dimensionnement d'un groupe de sondes, l'espacement entre celles-ci joue un rôle primordial, et il est recommandé d'éloigner autant que possible les sondes les unes des autres. En effet, des sondes très rapprochées vont abaisser rapidement la température du terrain et la température du fluide s'abaissera en

conséquence (Figure 5-9). Une distance minimale entre les sondes doit être respectée pour éviter une surexploitation qui pourrait entraîner un mauvais fonctionnement de l'installation, se traduisant par une diminution du COP de la pompe à chaleur et une surconsommation d'électricité, voire un gel du terrain autour de l'installation et une panne de l'installation.

Une distance minimale de 5 m est indispensable, mais un espacement de 7 à 8 m est préférable. Dans le cas de nombreuses sondes, il est judicieux d'utiliser tout l'espace à disposition en écartant les sondes le plus possible. Dans le cas d'un champ de sondes, il faudra prévoir une recharge thermique afin d'éviter à plus ou moins long terme le gel du terrain. La distance minimale doit également être respectée afin d'éviter les incidents techniques : en effet, lors du forage, une déviation de la verticalité de 1% à 2% est sans autre possible et il existe un risque d'interférence ou même de recoupement si les forages sont trop rapprochés.

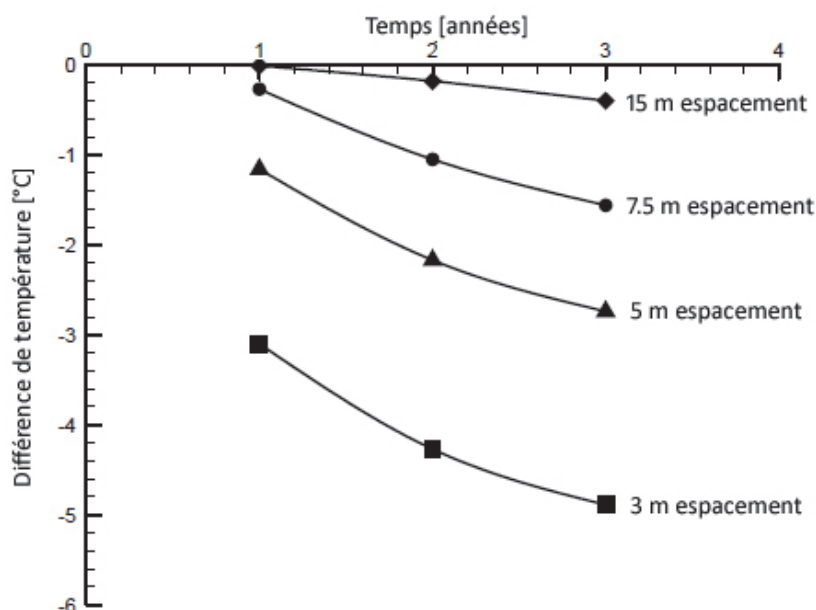


Figure 5-9. Différence de température du fluide produit par un champ de 6 sondes par rapport à une seule sonde (de même longueur totale) pour un espacement de 3, 5, 7.5 et 15 m (d'après Signorelli, 2004)

Les simulations montrent qu'en passant de 8 à 15 m pour l'espacement des sondes et pour des installations comprenant 2 à 6 sondes, le gain de longueur est de l'ordre de 2 à 10 % (PGN, 2008).

La distance à partir de laquelle il n'y a plus aucune influence est estimée à la moitié de la longueur des sondes (Pahud et al., 2002).

Pour évaluer les interactions entre plusieurs installations, Rybach et Sanner (2000) ont modélisé l'influence mutuelle de 60 maisons individuelles. Chaque maison est équipée d'une PAC d'une puissance de 7 kW, alimentée par deux SGV. A partir d'une distance de 40 m entre les installations, il n'y a plus d'influence mutuelle. De plus, par rapport à une installation isolée, il faut compter environ 60% de longueur de sonde supplémentaire s'il y a plusieurs installations espacées de 15 m et 25 % si elles sont espacées de 20 m. La nouvelle norme SIA 384/6 mentionne désormais que l'influence mutuelle en présence d'une accumulation locale de projets distincts doit être prise en compte (nécessité d'une recharge saisonnière par exemple).

Il n'existe pour l'instant à Genève aucune loi définissant la distance minimale entre deux installations. D'après les analyses réalisées et présentées ci-dessus, une distance de 40 m est conseillée dans le cas d'installations individuelles sans recharge saisonnière, afin d'éviter les interactions mutuelles. Une évaluation plus fine peut avoir lieu si le nouveau projet prévoit une recharge saisonnière, le but final étant de ne pas prétexter les installations pré-existantes.

Un autre paramètre entrant en compte, dans le cas de sondes multiples, est la configuration (disposition géométrique) des sondes, qui déterminera en partie l'influence mutuelle que les sondes auront entre elles. Ce paramètre n'a pas une influence déterminante, mais de manière générale les sondes disposées linéairement ont un rendement meilleur que celles disposées en carré ou rectangle, car elles s'influencent moins mutuellement (PGN, 2008).

SYNTHESE DE L'INFLUENCE DES DIVERS PARAMETRES

Le tableau 5-1 présente la synthèse des paramètres présentés plus haut ainsi que leur effet et leur importance sur le dimensionnement des sondes verticales (simulations à l'aide du logiciel EED, PGN, 2008).

Tableau 5-1. Propriétés influençant le dimensionnement des SGV et leur importance respective (adapté d'après PGN, 2008)

Paramètre	Référence	Importance sur le dimensionnement	Effet sur le dimensionnement et remarques
Conductivité thermique K du sol	§ 4.1.1 § 4.2 § 5.8.2	Forte	Plus K est élevé, plus la longueur de sonde recommandée diminue. Pour une petite implantation (1 à 4 sondes), la conductivité thermique peut être estimée en fonction de la géologie du sous-sol. Dans le cas d'un grand champ de sondes, il est préférable de la déterminer localement au moyen d'un test de réponse thermique. Les calculs du chap. 4.1.1 donnent également une bonne approximation pour les sols genevois.
Capacité calorifique C _v du sol	§ 4.1.2 § 4.2 § 5.8.2	Faible	Plus C _v est élevée, plus la longueur de sonde recommandée diminue
Température annuelle moyenne de l'air T _{moy}	§ 2.2 § 5.8.2	Forte	Plus T _{moy} est basse, plus la sonde doit être longue. Perte d'environ 2.5 W/m/°C. Paramètre constant à Genève.
Flux géothermique	§ 4.4	Faible	Ce critère a plus d'influence dans le cas d'un massif calcaire. Sur l'ensemble du canton de Genève, le flux est considéré comme uniforme.
Nombre de forages	§ 5.8.3	Moyenne	A cause des interactions entre les sondes, prévoir une longueur totale d'échangeur plus longue que pour une sonde unique s'il y a plusieurs sondes. Plus le nombre de sondes est faible, meilleur est le rendement thermique de l'installation.

Paramètre	Référence	Importance sur le dimensionnement	Effet sur le dimensionnement et remarques
Configuration	§ 5.8.3	Faible	A cause des interactions entre les sondes, le rendement thermique est meilleur si les sondes sont implantées en ligne plutôt qu'en carré.
Espacement	§ 5.8.3	Moyenne	S'il y a plusieurs sondes, il faut prévoir un espacement d'au moins 7 à 8 m entre elles, excepté configurations particulières (grands champs de sondes avec recharge).
Type de sonde	§ 5.8.3	Moyenne	La sonde en double-U a un très bon rendement thermique et est relativement peu coûteuse. C'est en règle générale celle qui est utilisée.
Diamètre de la sonde	§ 5.8.3	Faible	Des sondes avec des diamètres standards sont utilisées pour les SGV. Le diamètre pourrait être adapté afin que le régime d'écoulement du fluide soit le plus proche possible de la turbulence. Ceci permettrait d'améliorer les échanges thermiques et ainsi d'optimiser la longueur de l'échangeur.
Espace entre les tubes en U	§ 5.8.3	Moyenne	La pose d'écarteurs le long de la sonde permet d'assurer un meilleur rendement thermique de l'installation.
Conductivité thermique du matériau de remplissage	§ 5.8.3	Forte	L'utilisation d'un ciment de remplissage à bonne conductivité thermique (2 W/m/K) à la place du mélange standard bentonite/ciment (0.6 W/m/K) permet d'assurer un meilleur rendement thermique de l'installation, voire d'optimiser la longueur de la sonde.
Qualité du remplissage	§ 5.8.3	Faible	Même si la perte de rendement thermique liée à ce paramètre n'est pas très grande, il est très important de toujours effectuer le remplissage du forage dans les meilleures conditions possibles (protection des eaux souterraines).
Type de fluide caloporteur	§ 5.8.3	Moyenne	C'est le monopropylène glycol 33 % qui est souvent utilisé comme fluide caloporteur dans les sondes. Certains fluides ont cependant des propriétés physiques nettement meilleures; leur utilisation dans les sondes permettrait d'optimiser la longueur de l'échangeur.

5.8.4 Logiciels de dimensionnement

L'un des logiciels les plus couramment utilisés est le logiciel « **Earth Energy Designer** » (**EED**). Il s'agit d'un logiciel essentiellement destiné au dimensionnement des sondes. Ce modèle permet de faire varier de nombreuses caractéristiques, mais ne prend pas en compte une succession de couches géologiques avec différentes propriétés ou la circulation des eaux souterraines. Il permet cependant d'intégrer les caractéristiques moyennes du terrain et de la sonde, les propriétés thermiques du bâtiment et la durée d'exploitation du système (Figure 5-10).

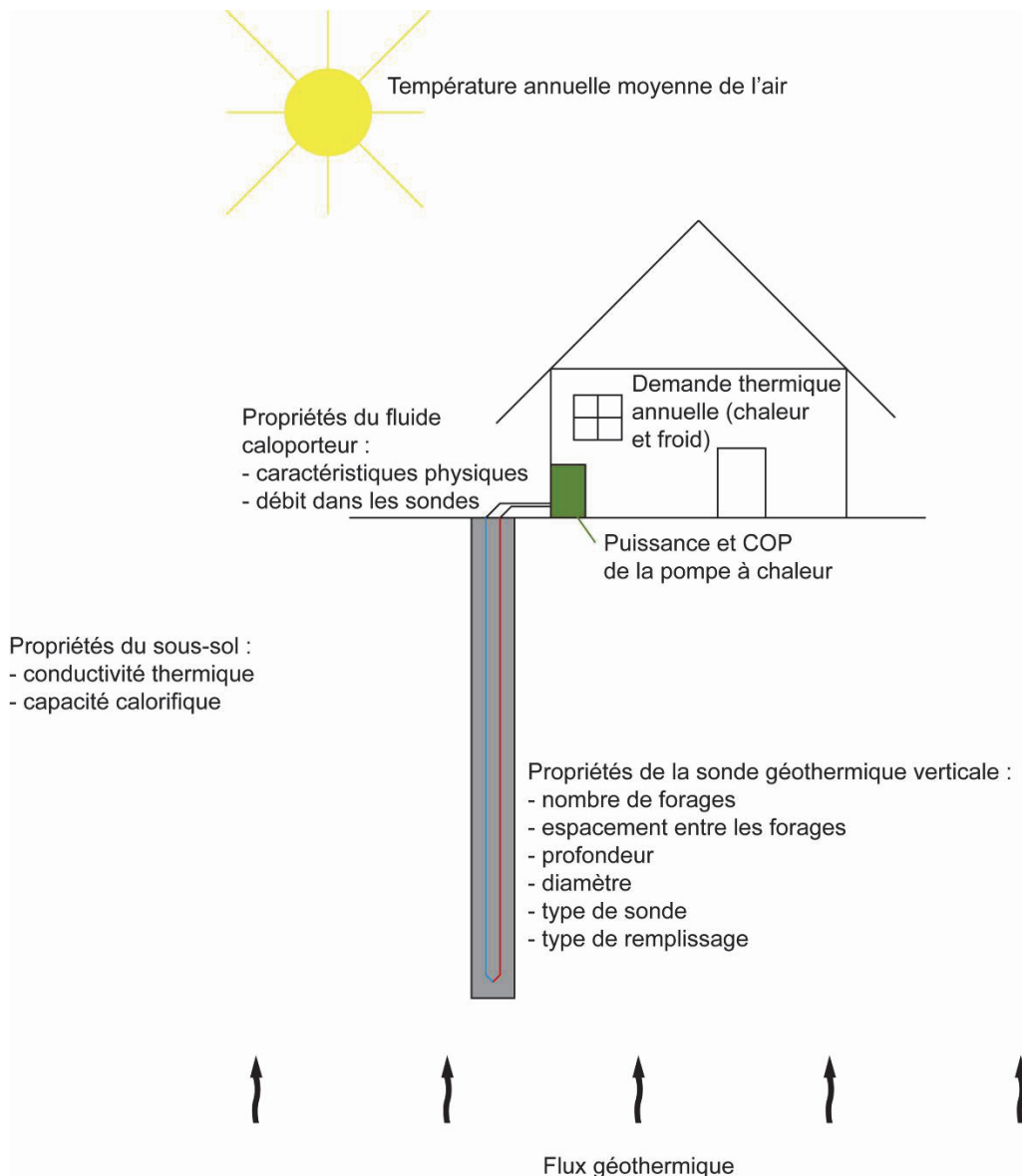


Figure 5-10. Paramètres pouvant être modifiés lors d'une simulation avec le logiciel EED (PGN, 2008)

PILESIM2 est également un outil utilisable à la fois pour simuler des systèmes de chauffage ou de refroidissement avec un système de sondes ou de pieux énergétiques. Ce logiciel intègre différents paramètres : les caractéristiques des sondes (ou des pieux), la performance thermique de la pompe à chaleur et de la machine frigorifique, et les conditions de chargement pour le chauffage et le refroidissement. Contrairement à EED, il est également possible de calculer des modèles intégrant jusqu'à 3 couches de terrain différentes et un possible écoulement dans chaque couche (Figure 5-11).

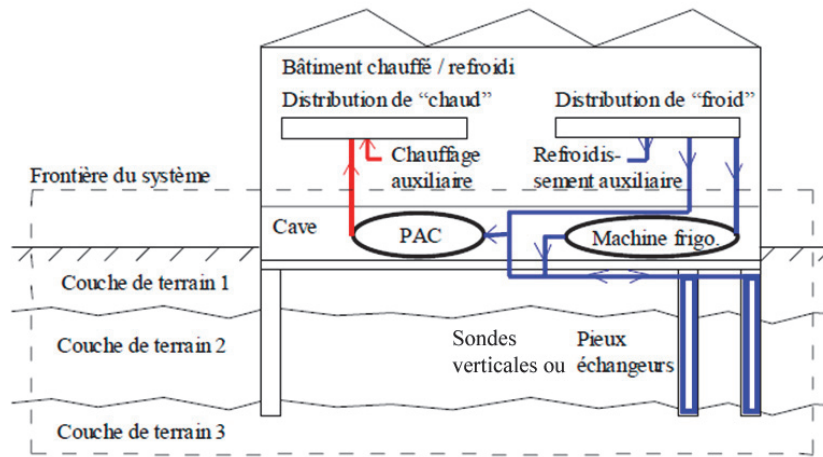


Figure 5-11. Schéma des données basiques intégrées dans le programme PILESIM2

Les logiciels EED et PILESIM2 peuvent être utilisés dans les phases de pré-dimensionnement.

Le logiciel **TRNSYS+TRNVDSTP** ou **TRNSBM** est un outil qui permet une simulation dynamique pour le calcul des performances techniques d'un bâtiment avec plusieurs sondes géothermiques ou un stockage dans un champ de sondes. Il est généralement utilisé dans la phase ultérieure du développement, lorsque le pré-dimensionnement a déjà été effectué à l'aide d'un des autres programmes. Cette opération permet le dimensionnement définitif, l'optimisation et la régulation du système. Il est plutôt utilisé pour des systèmes de grande taille.

Le logiciel **EWS** permet d'intégrer les données de plusieurs autres programmes de simulation de systèmes de PAC, tels que TRNSYS, YUM ou WPCalc. EWS permet également de simuler la durée de vie de champs de sondes. Il peut également transmettre des données.

SwEWS est un dérivé de EWS et contient une grande base de données des propriétés géothermiques de roches typiques du Bassin molassique suisse. Ces données sont ensuite intégrables dans d'autres programmes tels que EWS ou TRNSYS.

5.9 Comportement à long terme

Les premières sondes géothermiques ont été implantées dans les années 1980. On ne connaît donc pas encore leur durée de vie réelle. On estime la durée de vie d'une sonde à environ 50 ans et celle de la pompe à chaleur à au moins 20 ans (paramètres pour calculs de rentabilité - SIA 384/6). La question se pose également de savoir si cette énergie géothermique de basse température est effectivement renouvelable, c'est-à-dire si on peut exploiter la chaleur du sol indéfiniment ou si il faudra éventuellement arrêter l'exploitation. Plusieurs études ont modélisé le comportement d'une sonde à long terme à partir de mesures effectuées pendant deux campagnes de 5 ans et 10 ans.

Ces travaux montrent que la température aux alentours de la sonde descend très rapidement au cours des premières années d'exploitation, puis se stabilise à 1 ou 2°C en dessous de la température de base initiale. En règle générale, plus la sonde est longue, plus la baisse de température sera forte et plus le temps jusqu'à la stabilisation sera long.

On distingue trois cycles de fonctionnement de la sonde :

- Cycle journalier : la sonde fonctionne au maximum de sa puissance, puis s'arrête pour maintenir une température de 20°C dans le bâtiment ;
- Cycle annuel : la sonde prélève du chaud en hiver, en été le terrain se recharge ;
- Cycle de vie : période d'exploitation, suivie d'une période de recharge naturelle du terrain.

Plus le cycle de fonctionnement est court, plus la baisse de température est grande, mais elle se propage alors moins loin dans le sous-sol et est plus rapidement compensée (Figure 5-12).

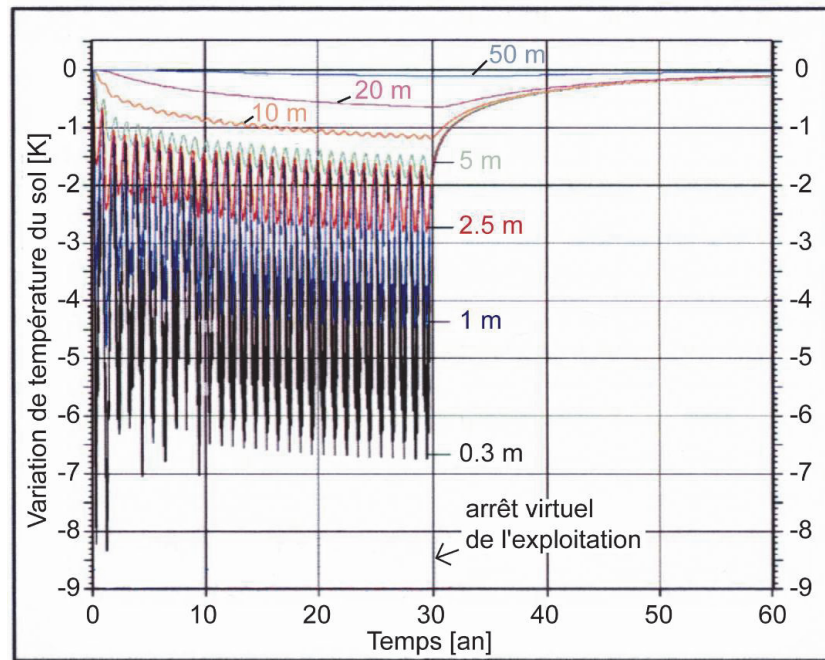


Figure 5-12 . Mesures (années 0 à 10) et modélisation (années 10 à 60) des variations de température dans le sol à 50 m de profondeur et à 0.3, 1, 2.5, 5, 10, 20 et 50 m de distance d'une sonde géothermique verticale de 105 m (PGN, 2008 ; tiré de Rybach, 2001).

Après la période d'exploitation, atteindre à nouveau la température naturelle prendrait un temps infini. Cependant, il s'agit d'une fonction asymptotique et la période de recharge naturelle nécessaire pour que le terrain retrouve une température proche de sa température initiale est environ égale à la durée d'exploitation (Rybach, 2003).

La variation de température dans le sous-sol sera bien plus élevée, et la période de recharge bien plus longue dans un champ de sondes que pour une sonde unique (Figure 5-13). Cet effet augmente si les sondes sont plus proches. Il est donc généralement indispensable de prévoir une recharge saisonnière dans le cas de champs de sondes afin d'éviter une baisse trop rapide de la température du terrain et l'épuisement de la ressource géothermique, ce qui conduirait à un temps de récupération extrêmement long (Signorelli et al., 2004).

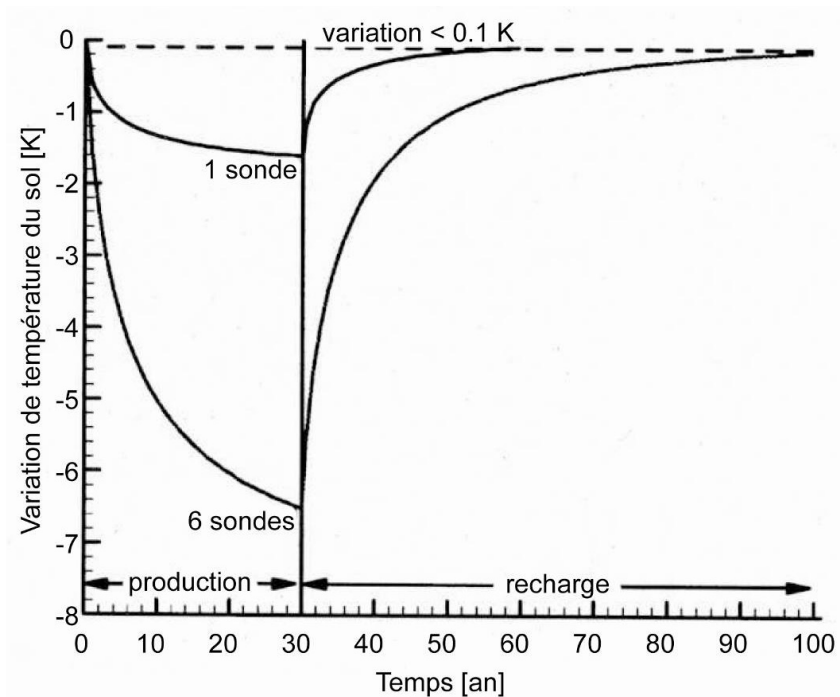


Figure 5-13. Variation de température dans le sol à une profondeur de 50 m et à 0.12 m de distance d'une sonde de 100 m de profondeur ou de six sondes de 100 m de profondeur espacées de 7.5 m (PGN, 2008, tiré de Signorelli et al., 2004).

5.10 Développements récents

Les sondes géothermiques sont très largement utilisées et font donc, logiquement, l'objet de divers développements, que ce soit sur le plan des concepts ou dans le domaine technique. Nous présentons brièvement dans les points suivants deux développements récents visant à pouvoir développer ces systèmes dans des zones pauvres en espace disponible ou peu accessibles.

5.10.1 Sondes de moyenne profondeur (400-800 m)

Les champs de sondes étant des dispositifs relativement coûteux en espace et en ressources disponibles, un nouveau concept est en cours d'étude pour des grands bâtiments dans des zones déjà construites ou densément urbanisées. Celui-ci consiste à réaliser des forages de plus grande profondeur, au-delà des 400 m qui constituent la limite actuellement définie de la géothermie de faible profondeur.

Le principe « un bâtiment, un forage » consiste à limiter le nombre de forages et l'espace ainsi utilisé. Par rapport à un champ de sondes, ces installations auraient une plus grande efficacité thermique (pour du chauffage) à longueur égale, car elles atteignent des températures plus conséquentes ($>20^{\circ}\text{C}$), qui rendent plus efficaces les pompes à chaleur, ou pourraient même permettre de s'en passer. Les pertes de chaleur subies lors du transfert depuis le forage jusqu'à la pompe à chaleur dans un champ de sondes seraient également fortement diminuées.

Les désavantages de ces sondes résident dans le fait que les forages plus profonds impliquent d'augmenter le diamètre des sondes (de 40 mm pour des sondes plus courtes que 300 - 400 m, à 50 mm ou plus pour des forages plus profonds), ce qui est relativement inhabituel. Les forages devront donc également prévoir un diamètre plus important. Il faut également noter que ce type de sonde ne permet pas de refroidissement direct en été.

Les obstacles à l'utilisation de ces forages sont pour l'instant techniques et financiers : il s'agit en effet d'une technique qui n'a que peu été utilisée dans ce cadre. L'aspect législatif pour de telles profondeurs devra également être défini.

Des études sont en cours pour estimer les coûts comparés entre champs de sondes et sondes plus profondes (Rognon et Shelker, 2010).

5.10.2 Foreuses compactes

Pour permettre de réaliser des sondes dans des lieux exigus, une nouvelle génération de foreuses compactes voit actuellement le jour, capables de passer par des portes de 1 m de largeur et séparées des installations d'alimentation de la machine, ce qui permet un important gain de place sur l'emplacement du forage. Malgré leur petite taille, ces foreuses sont capables de forer des sondes jusqu'à 120 m de profondeur environ.

5.11 Evaluation du potentiel d'implantation des sondes géothermiques verticales à Genève

5.11.1 Cartographie des paramètres géothermiques

Les données présentées dans ce chapitre ont été traitées en détail dans le chapitre 4. Nous les reprenons ici de façon plus ciblée en vue de l'évaluation du potentiel représenté par les sondes sur le canton de Genève.

TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR ET DU SOL

Comme illustré dans le chapitre 4.3, les températures annuelles moyennes de l'air et du sol peuvent être considérées constantes sur tout le canton, soit 9.6°C pour l'air et 11.2°C pour le sol.

Dans les zones avec une haute densité de construction, il est courant que les températures à la surface du sol soient plus élevées, ce qui est dû à une combinaison des rejets de chaleur des constructions (chauffage, refroidissement) et à une absorption plus efficace de la chaleur de la part du sol (pas d'isolation végétale). Cependant cet effet se dissipe dès une profondeur d'environ 4 m, et reste négligeable sur la longueur totale de la sonde.

CONDUCTIVITE THERMIQUE

Comme déjà évoqué, la propriété la plus importante du sous-sol pour les SGV est la **conductivité thermique**. Ce paramètre indique l'aptitude du sol à transmettre la chaleur et à se recharger. L'étude statistique des sols genevois permet de calculer (chapitre 4.1.1) les valeurs de conductivité thermique de chaque type de sol. Cette méthode a été validée par la comparaison avec des tests de réponse géothermique (chapitre 4.2).

Pour calculer la conductivité sur l'ensemble du canton, nous avons utilisé les modèles numériques du niveau du toit de différentes couches de la géologie genevoise : nous avons en effet à disposition des modèles numériques d'altitude non seulement de la topographie du canton, mais également du toit de l'Alluvion ancienne, du toit de la moraine rissienne, et du toit de la Molasse.

Grâce à ces données, il est possible de calculer les différentes épaisseurs des couches quaternaires et ainsi les conductivités équivalentes jusqu'à la Molasse. Nous avons choisi d'ignorer les couches inférieures à la Molasse, en prenant pour hypothèse que sa base se trouve à une profondeur supérieure à celle qu'atteindra la très grande majorité des sondes verticales.

Les couches géologiques prises en compte sont donc :

- la Molasse
- les couches quaternaires inférieures à l'Alluvion ancienne (rassemblées par commodité sous le nom de Riss)
- l'Alluvion ancienne
- la moraine et l'intramorainique würmiens (rassemblés sous le nom de moraine würmienne)
- les couches de retrait argileux (6d et 6e) auxquelles ont été intégrés les dépôts lacustres (« terrains argileux »).

Les couches supérieures de surface (remblais, colluvions, dépôts de ruissellement) ont été ignorées car leur épaisseur est le plus souvent négligeable (Figure 5-14).

CLASSIFICATION DES SOLS GENEVOIS

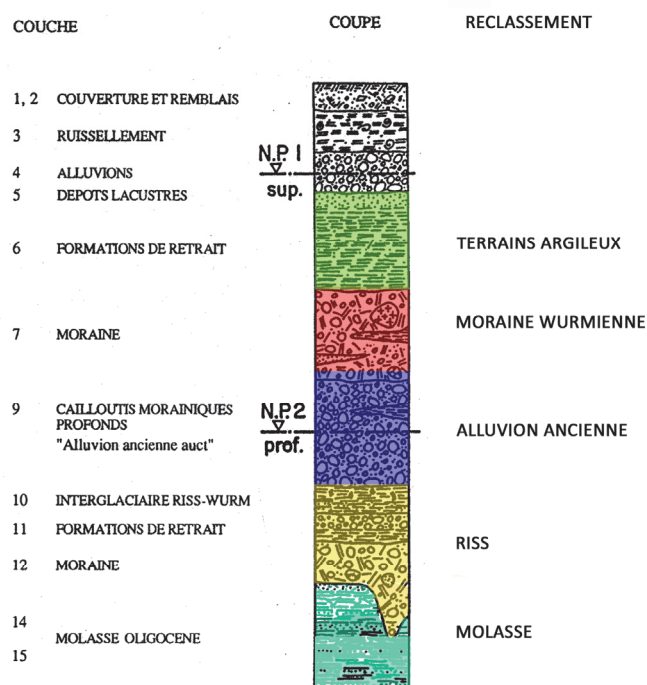


Figure 5-14. Classification simplifiée des sols quaternaires genevois

Les figures suivantes montrent l'épaisseur calculée de ces différentes couches (Figure 5-15), ainsi que l'épaisseur totale des terrains quaternaires (Figure 5-16).

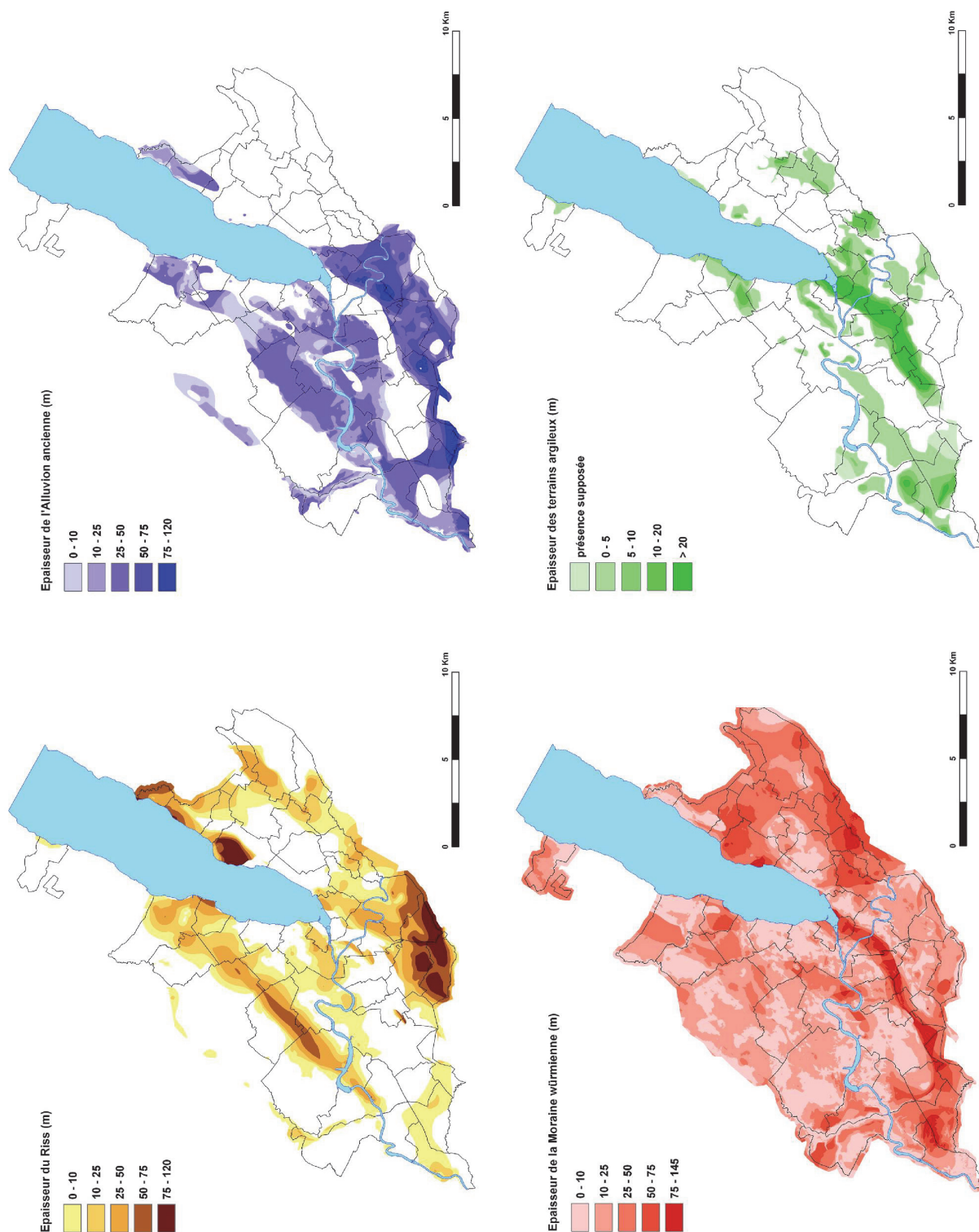


Figure 5-15. Epaisseurs des différentes formations quaternaires : Riss (jaune), Alluvion ancienne (bleu), moraine würmienne (rouge), et terrains argileux (vert).

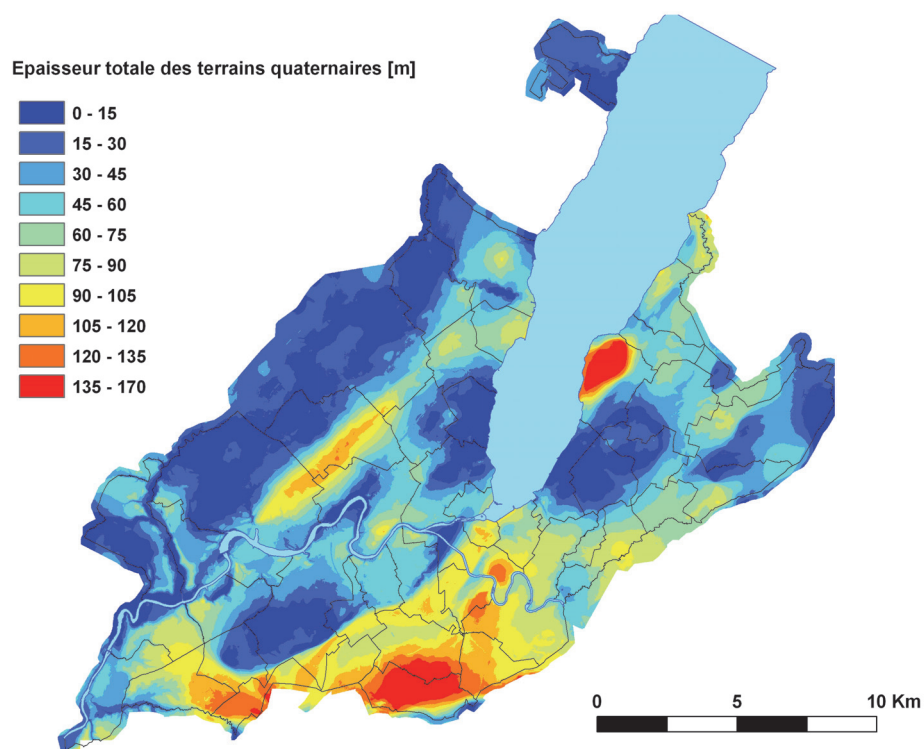


Figure 5-16 . Epaisseur totale des terrains quaternaires

Les conductivités thermiques moyennes retenues correspondant aux différentes couches sont les suivantes

Terrain	Conductivité thermique [W/(mK)]
Terrains argileux	1.6
Moraine würmienne	2
Alluvion ancienne	3
Riss	2
Molasse	2.6

En les attribuant aux différentes épaisseurs, on peut établir une carte des conductivités thermiques équivalentes jusqu'au toit de la Molasse (Figure 5-17).

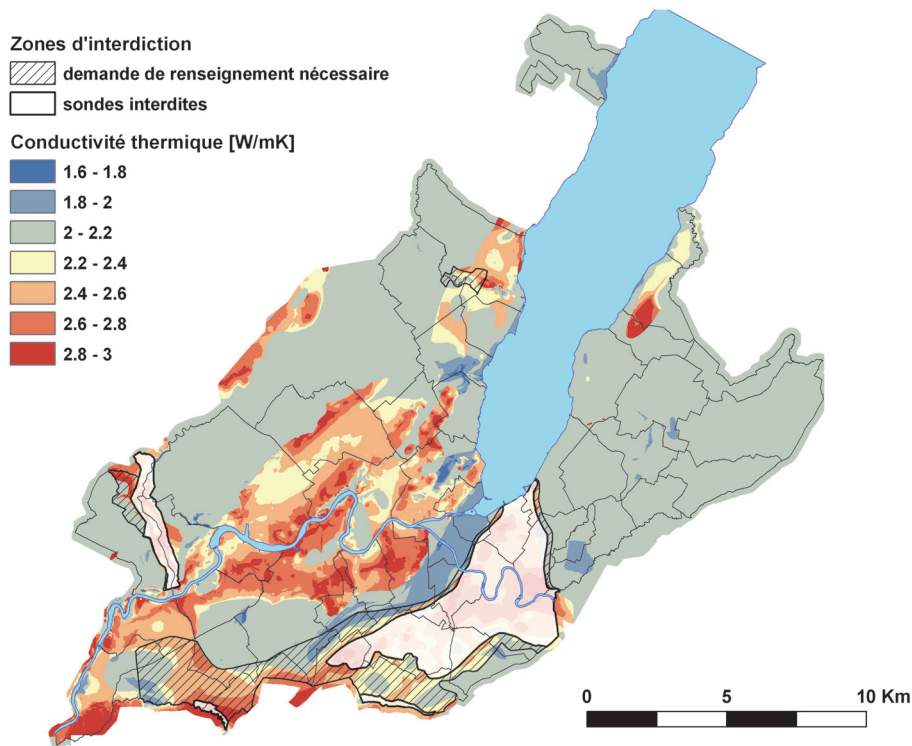


Figure 5-17. Carte des conductivités thermiques équivalentes [W/(mK)] des terrains quaternaires jusqu'à la Molasse.

On constate que les zones de plus haute conductivité correspondent à de fortes épaisseurs d'Alluvion ancienne, car ces terrains sont les meilleurs conducteurs. Cependant il s'agit aussi des zones où les sondes sont le plus fréquemment interdites, afin de protéger les nappes souterraines, principalement contenues dans cette formation graveleuse. Il est impossible de poser des sondes dans la zone d'interdiction, mais dans la zone soumise à demande de renseignement, il est possible, selon les cas, de construire des champs de sondes à faible profondeur tant que ceux-ci n'atteignent pas l'Alluvion ancienne.

Les autres zones favorables sont celles qui ont une faible épaisseur de Quaternaire, car la Molasse est un meilleur conducteur que les terrains morainiques. On constate également que les conductivités sont plus faibles dans le sillon molassique qui prolonge le lac, car celui-ci est partiellement rempli par des sédiments de retrait argileux dont la conductivité est seulement de 1,6 [W/(mK)].

Pour estimer les conductivités équivalentes de sondes de différentes longueurs depuis la surface, des modèles ont été réalisés pour des longueurs de sondes potentielles de 50, 100, 200 et 300 m (figure 5-18).

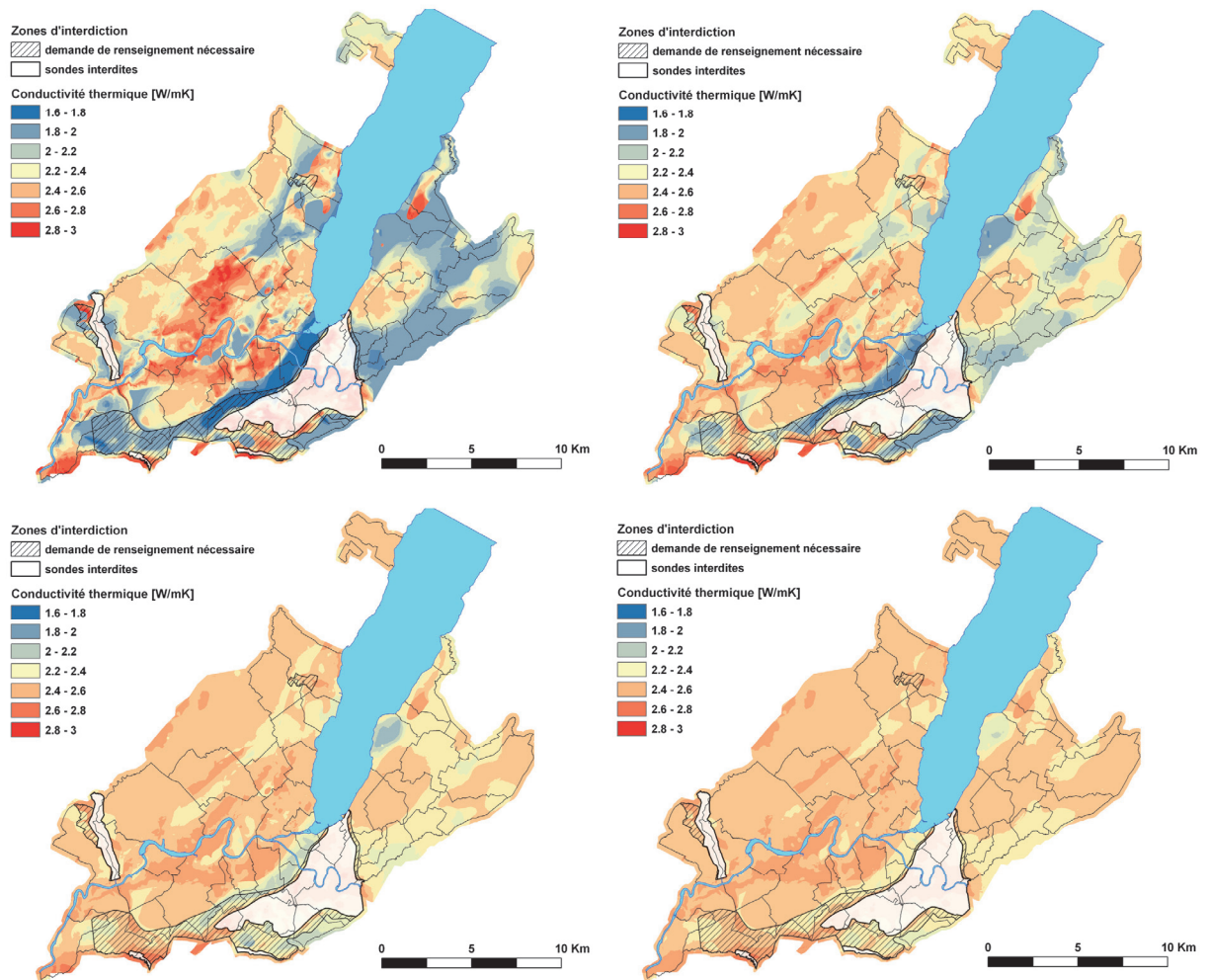


Figure 5-18. Conductivité équivalente pour différentes profondeurs de sondes, de gauche à droite et de haut en bas : 50, 100, 200 et 300 m.

Comme on peut le constater, les différences de conductivité sont principalement dues à l'hétérogénéité des terrains quaternaires et s'estompent avec la profondeur lorsque la proportion de Molasse devient plus importante.

Ces modèles donnent une bonne idée des conductivités thermiques que l'on peut trouver dans le canton tout en sachant que les modèles géologiques de base peuvent être de précision variable, en fonction de la densité de l'information qui n'est pas homogène sur l'ensemble du canton.

CAPACITE THERMIQUE OU CALORIFIQUE VOLUMIQUE [kJ/(m³K)]

Ce paramètre peut être traité sur le même principe que pour la conductivité thermique, en utilisant l'étude statistique des sols genevois et les modèles numériques géologiques.

En simplifiant les couches de la même manière que pour les conductivités, on obtient les valeurs moyennes suivantes (la valeur utilisée pour la Molasse est tirée de la norme SIA 384/6) :

Terrain	Capacité calorifique volumique [kJ/(m ³ K)]
Terrains argileux	2900
Moraine würmienne	2750
Alluvion ancienne	2300
Riss	2600
Molasse	2100

En les attribuant aux différentes épaisseurs de ces terrains, on peut établir une carte des capacités thermiques équivalentes jusqu'au toit de la Molasse (Figure 5-19).

Au niveau de la distribution géographique sur le canton, on voit que, à l'inverse de la conductivité, les valeurs les plus élevées se trouvent dans le sillon molassique qui prolonge le lac, car celui-ci contient les plus grandes épaisseurs argileuses.

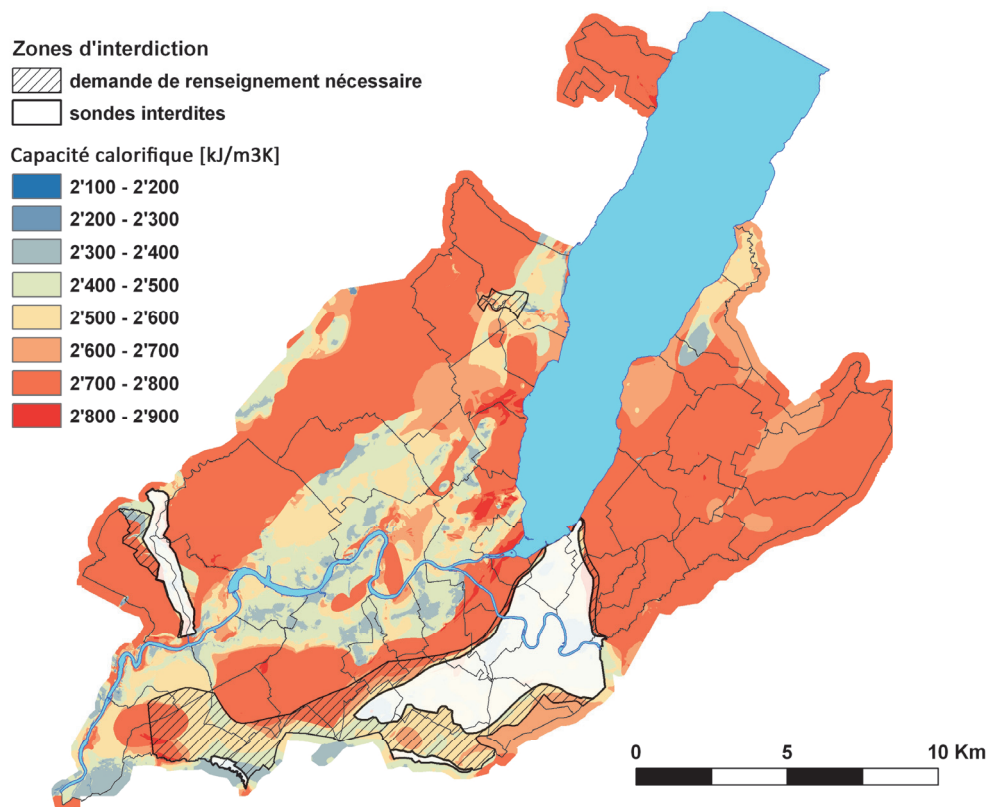


Figure 5-19. Capacité calorifique des terrains quaternaires jusqu'à la Molasse [kJ/(m³K)]

En calculant la capacité calorifique effective sur des profondeurs de 50, 100, 200 et 300 mètres, on constate que, comme pour la conductivité, les différences s'estompent avec la profondeur (Figure 5-20).

L'approfondissement des sondes diminue les valeurs de capacité, lorsque la part de Molasse devient plus importante. Toutefois, cet effet est largement compensé par l'augmentation de la conductivité thermique, qui a une influence plus déterminante sur les performances d'une sonde (chapitre 5.8.2)

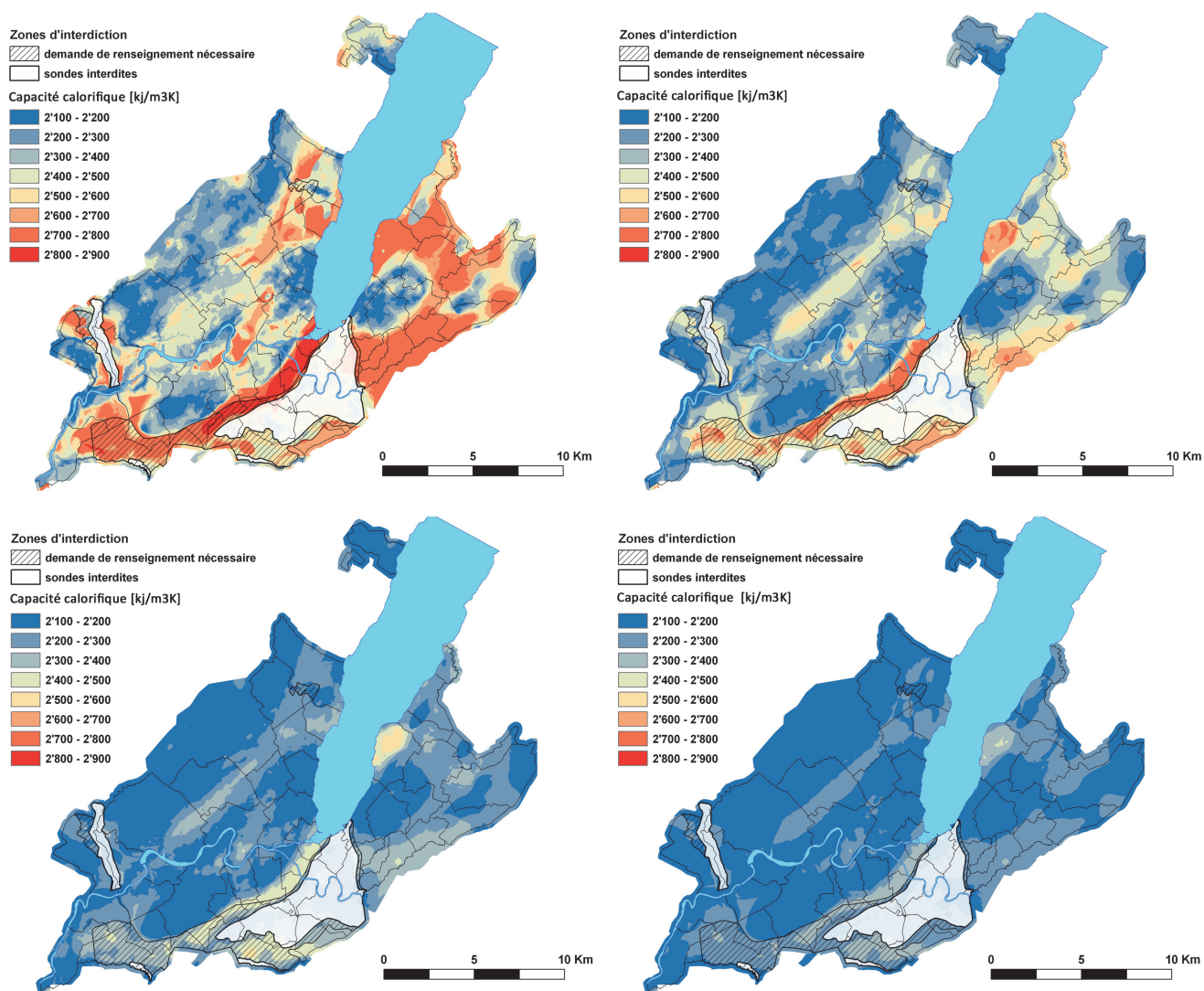


Figure 5-20. Capacité calorifique pour différentes profondeurs de sondes, de gauche à droite et de haut en bas: 50 m, 100 m, 200 m, 300 m.

5.11.2 Potentiel d'implantation géographique

D'une manière générale, la mise en place de sondes est possible sur environ 80% de la surface du canton, sans limitation de profondeur du point de vue géologique. En tenant compte des zones non constructibles (zones de forêts et les zones agricoles), seuls 30% de la surface totale du canton se retrouve à l'heure actuelle réellement concerné pour l'implantation de sondes.

Les zones d'interdiction pour des raisons de protection des eaux souterraines (nappe du Genevois et nappe de l'Allondon) ne représentent que 10% du canton, de même que les secteurs dans lesquels, pour les mêmes raisons, un examen au cas par cas des projets doit être effectué par l'autorité, pouvant aboutir soit à une interdiction soit à une limitation de la profondeur des sondes.

Le dimensionnement doit également être conçu de manière à tenir compte des éventuelles installations voisines. Ce point deviendra de plus en plus important au fur et à mesure du développement de telles installations

Enfin, il faudra bien entendu tenir compte des ouvrages souterrains existants ou planifiés qui pourraient limiter ou même empêcher la réalisation d'un projet (par exemple : tunnel routier ou ferroviaire, forage profond).

5.11.3 Particularités liées à la rénovation du bâti

L'installation d'un système de chauffage géothermique lors de la rénovation d'un bâtiment est un cas un peu particulier : en effet, pour être performant le chauffage géothermique doit généralement être relié à un système de chauffage à basse température, ce qui peut impliquer des travaux conséquents d'isolation et de remplacement des radiateurs. Toutefois, les nouvelles PAC permettent de livrer de l'eau de plus en plus chaude et ainsi d'utiliser le réseau de distribution des anciennes installations mais avec une baisse du COP.

Par ailleurs, le manque de place disponible pour réaliser des sondes dans un environnement construit reste un facteur très limitatif. L'amélioration et le développement des techniques de forage ouvrent toutefois des perspectives de plus en plus importantes à cet égard. On citera la possibilité de forer avec de machines très compactes (voir point 5.10.2), de réaliser des forages inclinés pour éviter des obstacles ou plus profonds pour en diminuer le nombre (point 5.10.1).

5.12 Calcul du potentiel cantonal

La quantification d'un potentiel géothermique est complexe, car elle ne dépend pas exclusivement des propriétés thermiques du sous-sol, mais également du mode d'exploitation et de gestion de chaleur du sous-sol. Ainsi, comparé à une simple extraction de chaleur, un système comprenant une recharge saisonnière ou un stockage saisonnier peut multiplier d'un facteur 100 la quantité d'énergie exploitable (PDGN, 2010).

Dans ce chapitre nous essayerons de quantifier l'ensemble de l'énergie géothermique disponible sur le canton, d'abord en considérant simplement l'énergie dégagée par le flux géothermique sur la surface du canton, et ensuite en utilisant le résultat de simulations de sondes avec les paramètres de base du canton de Genève, pour plusieurs scénarios.

5.12.1 Calcul de l'énergie dissipée par le flux géothermique

Dans une approche conservatrice, il est possible de calculer l'énergie dégagée par année par le flux géothermique, si l'on connaît le flux moyen et la surface du canton. Ce flux représente la part d'énergie totalement renouvelable, donc utilisable sans que la température du milieu soit affectée. Une part de cette énergie (captée jusqu'à 20 m de profondeur) est fournie par le soleil (PDGN, 2010).

Flux géothermique moyen :	0.07	W/m ²
Arrondi pour tenir compte du flux solaire :	0.1	W/m ²
Energie annuelle :	8.76	MWh/ha/an
Surface cantonale (sans le lac et les zones d'interdiction) :	21'678	ha
Energie disponible sur l'ensemble du canton :	190	GWh/an

5.12.2 Calcul du potentiel d'exploitation par des sondes

Cette méthode consiste à simuler à l'aide du programme PILESIM2 la capacité d'une sonde à extraire de la chaleur de divers terrains, et le nombre de sondes qu'il est possible d'installer sur le canton. Les paramètres de l'installation des sondes simulent un grand champ de sonde, afin de tenir compte des interactions entre les sondes. Les simulations ont été faites sur une période de 50 ans, ce qui correspond à la durée de vie planifiée d'un bâtiment. De plus, un critère limitant à 1°C après 50 ans la différence de température dans le sol par rapport à l'état initial a été introduit.

PARAMETRES LIES AU SITE D'IMPLANTATION

De nombreux paramètres contrôlent le rendement des sondes (voir §5.8). Afin de simplifier la modélisation, plusieurs de ces paramètres ont été considérés comme fixes, et d'autres ont été simplifiés.

Température moyenne annuelle de l'air, du sol et gradient géothermique : comme exposé dans le chapitre 4.3, la température moyenne de l'air peut être considérée comme constante à Genève, de l'ordre de 9.6°C. Cette valeur reste relativement conservatrice (on constate en effet un réchauffement constant ces dernières années).

La température annuelle moyenne du sol que nous avons choisie correspond à celle suggérée par la norme SIA 384/6. Une valeur de tolérance de 1K est introduite dans l'équation en raison des incertitudes locales.

$$T_{sol,chauff} = (T_{air} + 1.55) - 1$$

avec $T_{sol,chauff}$ = température annuelle moyenne du sol pour le dimensionnement d'une installation de chauffage et T_{air} = température annuelle moyenne de l'air

Une température moyenne du sol de 10.15°C a donc été considérée pour les simulations. Le gradient géothermique considéré est de 30°C/km.

Profondeur des sondes : Afin de fixer les conductivités (qui dépendent de la profondeur, voir §5.11.1), des profondeurs fixes de sondes ont été attribuées en considérant 2 grandes zones dans le canton : dans les zones sans interdiction, des sondes de 200 m ont été modélisées ; cette profondeur a été rabattue à 50 m pour la zone à dérogation. La zone d'interdiction n'a pas été considérée (Figure 5-21).

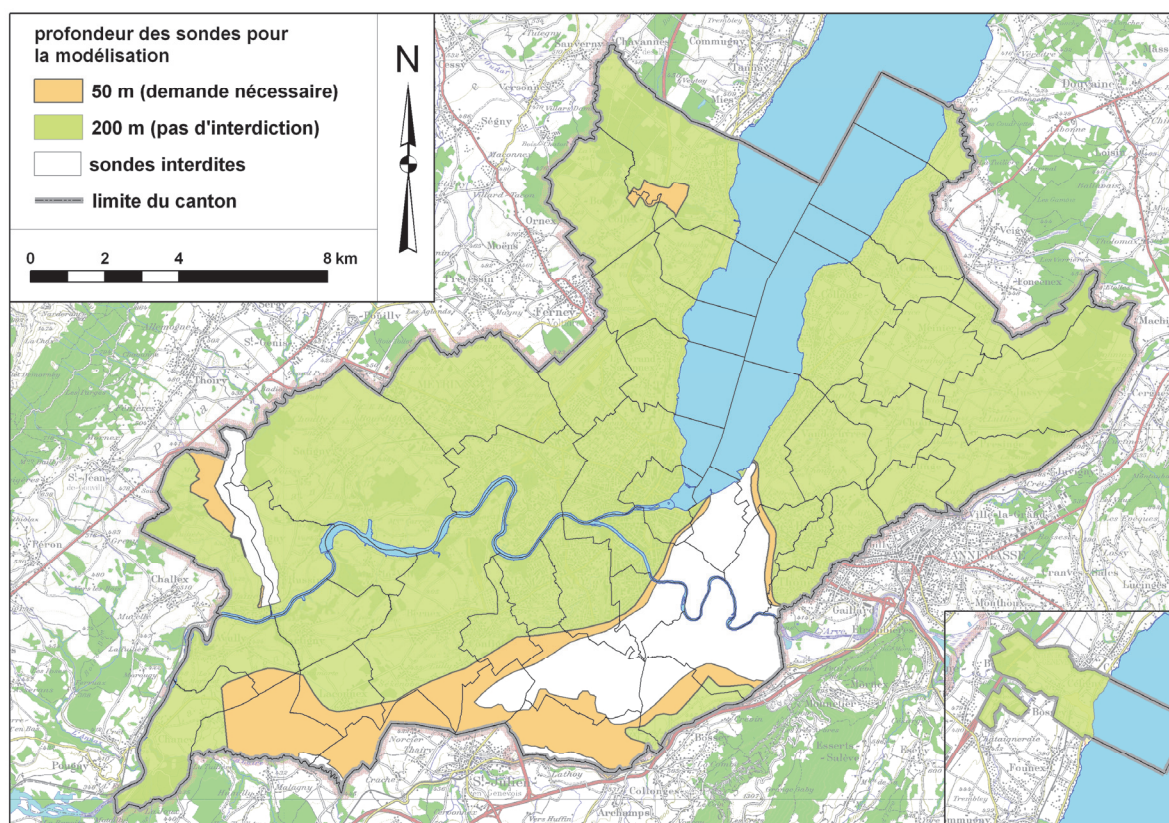


Figure 5-21 . Profondeur des sondes pour la simulation.

Conductivité thermique et capacité calorifique : les cartes de conductivité du canton ont été reprises et divisées en surface de valeurs moyennes tout les 0.2 W/(mK), entre 1.8 et 2.2 W/(mK). Une capacité calorifique moyenne a ensuite été attribuée à chacune de ces surfaces (Figure 5-22).

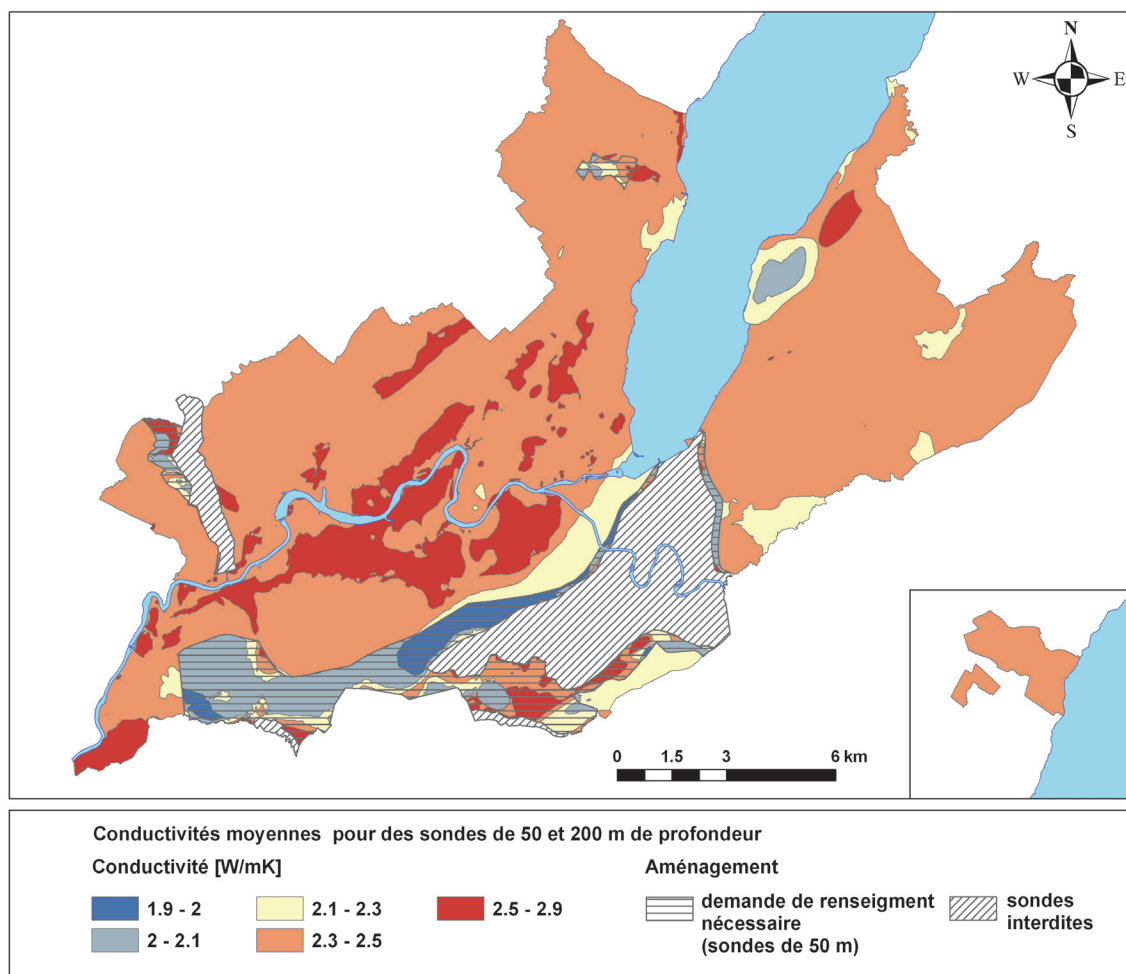


Figure 5-22. Plages de conductivité pour des sondes de 50 m et 200 m de profondeur

Hydrologie : tous les terrains ont été considérés comme saturés, et les écoulements des nappes n'ont pas été pris en compte.

PARAMETRES DE L'INSTALLATION

Demande d'énergie : les sondes de 200 m ont été modélisées pour une demande d'énergie correspondant à 1000 petites maisons. En procédant de cette manière, on évite de privilégier la recharge latérale, ce qui aurait été le cas en ne considérant qu'une maison avec 1 ou 2 sondes uniquement. Pour les sondes de 50 m, l'équivalent de 500 maisons a été pris en compte.

Les puissances et demandes thermiques ont été définies par PILESIM2.

Paramètres de modélisation	Valeur pour sondes de 200 m de profondeur	Valeur pour sondes de 50 m de profondeur
Demande thermique annuelle (E_{th})	15'692 MWh/an	7'846 MWh/an
Puissance thermique cumulée des PAC ($P_{th\ tot}$)	7'130 kW	3565 kW
Coefficient de performance (COP) de la PAC	4	4
Puissance électrique cumulée des PAC	1782 kW	891 kW
Puissance thermique cumulée extraite du terrain ($P_{sol\ tot}$)	5348 kW	2674 kW
Durée d'exploitation totale	50 ans	50 ans

Remarques : $P_{th\ tot}$ correspond à environ 2'200 h/an d'exploitation
 $P_{sol\ tot} = P_{th\ tot} \cdot (COP-1/COP)$ – voir chapitre 5.8.3

Paramètres des sondes : les sondes modélisées sont des sondes en double U, avec des dimensions moyennes. Les paramètres sont également résumés dans le tableau suivant :

Paramètre des sondes	Valeur pour sondes de 200 m de profondeur	Valeur pour sondes de 50 m de profondeur
Type	Double-U	Double-U
Diamètre forage [m]	0.15	0.13
Diamètre des tubes de la sonde [mm]	40	32
Résistance thermique de la sonde [K/(W/m)]	0.13	0.13
Résistance thermique interne de la sonde [K/(W/m)]	0.4	0.4

MODELISATION

Afin d'illustrer la palette d'utilisation des sondes, plusieurs scénarios ont été envisagés. La modélisation consiste à calculer l'énergie maximale qu'il est possible de soutirer du sol sur un tel champ en prenant en compte les propriétés du sol et en respectant les températures limites du fluide dans les sondes, et dans le terrain.

MODE 1

La première méthode de modélisation consiste à modéliser des sondes relativement espacées (25 m pour les sondes de 50 m, 70 m pour celles de 200 m), de façon à diminuer au maximum les interactions entre celles-ci. Ce scénario illustre donc à peu près le cas de sondes individuelles pour des villas. Les résultats montrent que l'énergie et la puissance extractibles par mètre de sonde sont les plus élevées dans ce scénario (Tableau 5-2). Etant donné que ce type d'installation ne prévoit en général pas de recharge saisonnière, l'extraction d'énergie a été limitée par une baisse de la température moyenne du sol dans le champ de sonde de seulement 1°C sur 50 ans.

MODE 2

La seconde méthode consiste à simuler l'effet de sondes disposées à espacement régulier sur le canton, avec un espacement fixe de 20 m entre chaque sonde. La température minimale est celle du fluide caloporteur, limitée à -3°C. Dans ce scénario les interactions entre les sondes sont très marquées, et on assiste donc à un refroidissement considérable du sol après une période de 50 ans d'exploitation (environ 6°C). La quantité d'énergie disponible par mètre de sonde est considérablement réduite, mais il s'agit cependant de la méthode qui permet d'extraire le plus d'énergie au niveau du canton, car plus de sondes sont disponibles. On constate qu'un scénario de ce type n'est pas durable car le refroidissement du sol est trop important, et qu'une recharge serait nécessaire.

MODE 3

Le troisième scénario consiste à inclure une recharge dans le mode 2, c'est-à-dire dans ce cas une demande en froid qui implique de réinjecter du chaud dans le sol. Cette méthode permet de prolonger indéfiniment l'exploitation sans atteinte à la température annuelle moyenne du sol, tout en gardant autant ou plus d'énergie disponible que le second mode d'exploitation. Dans ce cas, nous avons également fixé une température minimale du fluide caloporteur de -3°C. La recharge a été calculée de façon à maintenir la température du sol constante. L'énergie à réinjecter dans le sol est de l'ordre de 90% pour des sondes de 200 m espacées de 20 m et de l'ordre de 30 à 40 % pour les sondes de 50 m. Côté bâtiment, l'énergie thermique de froid disponible par rapport à l'énergie thermique de chaud est de l'ordre de 50% pour les sondes de 200 m et de 15 à 25 % pour les sondes de 50 m si l'on veut garder un équilibre de température annuel dans le terrain.

Les tableaux 5.2 et 5.3 donnent les puissances et énergie côté sol (E_{sol}). Pour obtenir l'énergie thermique disponible, il faut rajouter l'énergie électrique de la PAC pour le chaud et soustraire l'énergie de la machine frigorifique pour le froid. Pour un COP de 4 de la PAC, correspondant à un coefficient d'efficacité de 3 de la machine frigorifique, on a :

$$E_{th\ chaud} = E_{sol} \times (COP/COP-1) = E_{sol} \times 4/3$$

$$E_{th\ froid} = E_{sol} \times C_{ef}/C_{ef}+1) = E_{sol} \times 3/4$$

Tableau 5-2. Puissances (P_{sol}) et énergies (E_{sol}) disponibles par mètre de sonde, et puissances et énergies unitaires pour les modes d'exploitation 1 et 2, selon les conductivités et capacités calorifiques du sol

Conductivité (W/(mK))	Capacité calorifique (MJ/m ³ /K)	Profondeur de forage (m)	Mode 1 espacement 70 m et 25 m				Mode 2 (pas durable) espacement fixe 20 m				dT après 50 ans	
			Puissance max soutirée par m de sonde (W/m)	Energie par m de sonde (kWh/m/an) Expl. env. 2'200 h/an	Puissance unitaire max par m ² de terrain (W/m ²)	Energie volumique par m ³ (kWh/m ³ /an)	Puissance max soutirée par m de sonde (W/m)	Energie par m de sonde (kWh/m/an) Expl. env. 2'200 h/an	Puissance unitaire max par m ² de terrain (W/m ²)	Energie volumique par m ³ (kWh/m ³ /an)		
1.9	2.8	50	32.45	71.55	2.60	0.114	1°C	30.16	66.49	3.77	0.166	6°C
2.1	2.6	50	34.11	75.21	2.73	0.120		31.68	69.85	3.96	0.175	
		200	40.14	88.48	1.69	0.019		25.62	56.47	12.81	0.141	
2.3	2.5	50	35.78	78.88	2.86	0.126		33.22	73.24	4.15	0.183	
		200	42.04	92.66	1.77	0.019		26.17	57.68	13.09	0.144	
2.5	2.4	50	37.23	82.08	2.98	0.131		34.62	76.33	4.33	0.191	
		200	43.76	96.45	1.84	0.020		26.64	58.72	13.32	0.147	
2.7	2.3	50	38.63	85.29	3.09	0.136		35.93	79.2	4.49	0.198	
		200	45.09	99.39	1.90	0.021		27.04	59.61	13.52	0.149	
2.9	2.2	50	39.9	87.96	3.192	0.141		37.15	81.9	4.64	0.205	

Les résultats du deuxième scénario (espacement fixe de 20 m), montrent que la puissance et l'énergie obtenue par les sondes longues sont bien plus faibles au niveau du mètre de sonde que celles du mode 1, mais que la puissance unitaire par m² (W/m²) et l'énergie volumique (kWh/m³/an) reste plus importante, car pour une même surface la longueur totale de sonde est plus bien plus importante que dans le premier scénario.

Tableau 5-3. Puissances et énergies disponible par mètre de sonde, et puissances et énergies unitaires pour le mode d'exploitation 3, selon les conductivités et capacités calorifiques du sol

Conductivité (W/(mK))	Capacité calorifique (MJ/m ³ /K)	Profondeur de forage (m)	Mode 3 = Mode 2 (espacement 20 m) avec recharge saisonnière								dT' après 50 ans
			Production de chaud				Production de froid				
			Puissance max soustraite par m de sonde (W/m)	Energie par m de sonde (kWh/m/an)	Puissance unitaire d'extraction par m ² (W/m ²)	Energie volumique par m ³ (kWh/m ³ /an)	Puissance d'injection max par m de sonde (W/m)	Energie injectée par m de sonde (kWh/m/an)	Puissance unitaire d'injection max par m ² (W/m ²)	Energie volumique injectée par m ³ (kWh/m ³ /an)	
1.9	2.8	50	34.44	67.05	4.31	0.168	9.51	25.39	1.19	0.063	0°C
2.1	2.6	50	35.95	69.98	4.49	0.175	9.24	24.69	1.16	0.062	
		200	44.34	86.30	22.17	0.216	25.74	79.24	12.87	0.198	
2.3	2.5	50	37.46	72.93	4.68	0.182	9.43	25.01	1.18	0.063	
		200	46.18	89.88	23.09	0.225	26.64	81.97	13.32	0.205	
2.5	2.4	50	38.83	75.58	4.85	0.189	8.96	22.92	1.12	0.057	
		200	47.92	93.27	23.96	0.233	27.62	85.08	13.81	0.213	
2.7	2.3	50	40.05	77.96	5.01	0.195	8.82	22.11	1.10	0.055	
		200	49.52	96.39	24.76	0.241	27.62	87.94	14.29	0.220	
2.9	2.2	50	41.16	80.13	5.15	0.200	8.64	21.13	1.08	0.053	

Le dernier mode d'exploitation inclut une recharge par production de froid. Cette recharge peut cependant se faire par d'autres techniques, par exemple avec des panneaux solaires thermiques ou des rejets thermiques. Cette méthode permet d'extraire de grandes quantités de chaleur du sous-sol tout en maintenant la température de celui-ci quasi constante.

Puisque nous connaissons la dimension du territoire disponible pour chacune de ces catégories (conductivité et profondeur), l'énergie totale disponible sur l'ensemble du canton peut être calculée.

Afin d'affiner les résultats, trois scénarios ont de nouveau été envisagés : dans le premier, la surface totale du canton est disponible. Les résultats ont ensuite été recalculés en ne considérant que les zones construites et constructibles sur le canton (incluant les zones industrielles et ferroviaires), ainsi que les zones de verdure, sous lesquelles des champs de sondes peuvent être installés. Enfin, afin d'estimer l'énergie immédiatement disponible sur le canton, seules les surface correspondant aux zones de développement ont été considérées dans un troisième temps.

Les quantités d'énergie extractibles côté sol (P_{sol} , E_{sol}) et disponibles côté bâtiment ($P_{th\ tot}$, $E_{th\ tot}$, y c. apport électrique pour la PAC avec un COP de 4) selon les 3 modes d'exploitation simulés sont les suivantes :

Scénarios			Mode 1	Mode 2	Mode 3 (chaud)	Mode 3 (froid)
Espacement des sondes			25 et 70 m	20 m	20 m	
Recharge thermique			non	non	oui	
dT après 50 ans			1°C	6°C	0°C	
Durable			oui	non	oui	
Surface totale du canton	Puissance extractible (MW)	P_{sol}	512	3'210	5'693	3'237
	Puissance disponible (MW)	$P_{th\ tot}$	680	4'280	7'590	
	Energie extractible (GWh/an)	E_{sol}	1'129	7'076	11'080	9'952
	Energie disponible (GWh/an)	$E_{th\ tot}$	1'500	9'430	14'770	
	Couverture d'une demande d'énergie de 6000 GWh/an	sol	19%	118%	185%	
		Sol + PAC	25%	157%	246%	
Surfaces construites et de développement	Puissance extractible (MW)	P_{sol}	131	897	1'605	921
	Puissance disponible (MW)	$P_{th\ tot}$	175	1'196	2'140	
	Energie extractible (GWh/an)	E_{sol}	288	1'978	3'125	2'835
	Energie disponible (GWh/an)	$E_{th\ tot}$	384	2'638	4'167	
	Couverture d'une demande d'énergie de 6000 GWh/an	sol	5%	33%	52%	
		Sol + PAC	6%	44%	69%	
Seulement surface de développement	Puissance extractible (MW)	P_{sol}	44	297	534	306
	Puissance disponible (MW)	$P_{th\ tot}$	59	396	712	
	Energie extractible (GWh/an)	E_{sol}	97	656	1'040	942
	Energie disponible (GWh/an)	$E_{th\ tot}$	130	875	1'387	
	Couverture d'une demande d'énergie de 6000 GWh/an	sol	1.6%	11%	17%	
		Sol + PAC	2.1%	15%	23%	

Ces valeurs sont bien sûr indicatives, mais elles donnent une bonne idée des ordres de grandeur en jeu. D'emblée, on constate que les puissances et énergies mises à disposition par le sous-sol avec la technique des sondes géothermiques sont grandes et représentent une proportion importante de la demande totale du canton. Bien entendu, cette ressource ne peut être exploitée qu'à l'aide de pompes à chaleur, nécessitant un apport d'énergie électrique qui augmente toutefois l'énergie disponible.

De manière très théorique, l'exploitation de l'ensemble du territoire cantonal par sondes géothermiques, y compris les zones non constructibles, permettrait de fournir près du double de la demande d'énergie actuelle (246% avec 185% provenant du sol), dans un mode intensif (sondes tous les 20 m) mais durable avec recharge thermique saisonnière.

En réalité, on pourrait considérer un schéma « réaliste » intermédiaire entre le mode 1 et le mode 3 avec une surface de référence comprenant les zones de développement et une partie des surfaces construites. Dans ce cas, on peut estimer la couverture de la demande cantonale à au moins 20%.

Cette proportion peut même être facilement revue à la hausse puisque les dispositifs peuvent être optimisés avec des champs de sondes importants (avec recharge) à l'échelle de quartiers et de centres commerciaux importants avec des performances avérées pouvant être 10 fois supérieures à celles considérées ici.

5.13 Synthèse et recommandations

Les sondes géothermiques verticales (SGV) sont les systèmes les plus utilisés en Suisse. Elles ont un haut taux de réussite, et sont une solution idéale pour le chauffage, voire le refroidissement de villas individuelles, ou de plus grands bâtiments dans le cas de champs de sondes.

Les paramètres déterminant leur dimensionnement sont nombreux, mais grâce à la nouvelle norme SIA 384/6 sur les sondes il est désormais possible de les dimensionner sur des bases méthodologiques homogènes.

A Genève, outre une géologie favorable, elles peuvent largement être utilisées puisque seule une petite partie du canton leur est interdite (10 à 20 %) pour des raisons de protection des eaux souterraines. Pour le reste, leur utilisation est principalement liée aux contraintes de l'aménagement du territoire (zones constructibles).

Grâce à la densité importante des données géologiques et géotechniques sur le canton, il a été possible d'établir des cartes des caractéristiques thermiques du sous-sol à l'échelle cantonale, pour différentes longueurs de sondes, en vue de leur dimensionnement.

Les simulations réalisées à l'échelle cantonale afin d'estimer le potentiel énergétique représenté par les sondes mettent en valeur une offre importante liée à cette technique. En effet, théoriquement, la demande cantonale actuelle totale en énergie de chauffage (6'000 GWh/an) pourrait être largement couverte.

En considérant les différentes contraintes territoriales et en établissant un mode d'exploitation « raisonnable », incluant une recharge thermique saisonnière, on peut estimer une couverture d'au moins 20% de la demande actuelle qui peut être revue à la hausse sans optimisme forcené en optimisant leur utilisation. De nombreux projets existants de champs de sondes importants (avec recharge thermique) ont en effet des performances 10 fois supérieures à celles simulées ici.

On mentionnera également les développements récents des techniques, comme par exemple la réalisation de sondes plus profondes, donc plus intéressantes d'un point de vue thermodynamique.

Il apparaît donc que les sondes géothermiques représentent un potentiel important à l'échelle cantonale et que leur utilisation doit être encouragée.

Dans cette perspective, les actions suivantes sont proposées :

1. Diffuser les conclusions de la présente étude, notamment à travers le système d'information du territoire (SITG).
2. Promouvoir les sondes géothermiques auprès des professionnels et des promoteurs.
3. Etablir une réglementation en faveur des sondes géothermiques, incitant notamment à équilibrer thermiquement les installations à long terme (recharge saisonnière).
4. Evaluer systématiquement les possibilités d'utilisation des champs de sondes dans des projets de grande envergure.
5. Coordonner les études et projets utilisant la géothermie, notamment les sondes géothermiques, et diffuser les informations de base (cadastre des installations) pour éviter tout problème d'influence mutuelle entre projets voisins. Ce dernier point pourrait également faire l'objet d'une réglementation portant sur les distances limites entre dispositifs distincts et les distances par rapport aux limites de propriété.
6. Inclure le développement des sondes et champs de sondes géothermiques dans la conception cantonale de l'énergie et dans le plan directeur de l'énergie comprenant les mesures décrites ci-dessus.

5.14 Bibliographie

Baños J.-C., 2009 (ECM SA). *Installation de sondes géothermiques du quartier Vésenaz Sud-Ouest*. Présentation à la journée genevoise de géothermie, 4 septembre 2009.

Blunier P., 2009. *Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain*, thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 258 pp.

Colliard B., 2004. *Outil de décision et de quantification du potentiel géothermique pour l'implantation de sondes géothermiques verticales*, travail de diplôme du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN)

Dysli M., 1991. *Le gel et son action sur les sols et fondations*, Complément au Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique de Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes

Energieschweitz et Société suisse pour la géothermie (SSG), 2006. *Dokumentation von Schadensfällen bei Erdwärmesonden*, étude par Bassetti S., Rohner E., Signorelli S. (Geowatt) et Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA

Géotechnique appliquée Dériaz S.A. (GADZ), 1997, révisé 2009. *Sols Genevois ; Etude statistique des sols de la cuvette genevoise ; rapport de synthèse*

Geowatt, 2009. *Statistik des geothermischen Nutzung in der Schweiz, Ausgabe 2008*, disponible sur le site de l'OFEN, 45 pp.

Groupe de travail PGN, 2008. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)*, CREGE 11-88/02, Neuchâtel, 206 pp.

Groupe de travail PDGN, 2010. *Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel – PDGN ; Volume 1 : Rapport final*, 284 pp.

Guigue A., 2009. *Géothermie, Géocooling et récupération d'énergie à Vésenaz*. Walter Meier - Histoire à succès n° 28.

Huber A., 2005. *Erdwärmesonden für Direktbeizung, Phase 1 : Modellbildung und Simulation*, rapport de l'OFEN, 66 pp.

Jenne D., 2009. *Kompaktes Gerät kommt durch*. Geothermie.ch, Bulletin de la société suisse pour la géothermie, n°47, pp 22-23.

Meyer M., 2009. *Conditions d'implantation d'ouvrages géothermiques à Genève*, présentation de la Journée Genevoise de la Géothermie (07.09.2009), GESDEC

Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2000. *Dimensionnement des pompes à chaleur*, 6 pp.

Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2009. *Exploitation de la chaleur tirée du sous-sol, Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie*, disponible sur le site de l'OFEN

Rognon F., Schelker C., 2010. *Ein Gebäude – eine Bohrung*, Bulletin de la Société Suisse pour la Géothermie, vol. 40, pp. 22-23

Rybach L., Sanner B., 2000. *Ground-Source Heat Pump Systems, The European Experience*, GHC Bulletin march 2000, pp. 16-26

Rybach L., 2003. *Geothermal energy: sustainability and the environment*, Geothermics 32, pp. 463-470

Sachs O., Eberhard M., 2010. *Erdgasausbruch bei einer Erdwärmesondenbohrung in Rothrist-Buchrain – ein Erfahrungsbericht*, Swiss Bulletin de géologie appliquée, vol. 15/1, pp. 43-51

Service Cantonal de Géologie de Genève, 1997. *Etude Statistique des Sols de la Cuvette Genevoise, rapport de Synthèse*, Géotechnique Appliquée Dériaz SA

SIA 384/6, 2010. *Sondes géothermiques*, 76 pp.

SIA D 025, 1988. *Base de Dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température*, 110 pp.

Signorelli S., Kohl T., 2004. *Regional ground surface temperature mapping from meteorological data*, Global and Planetary Change 40, pp. 267-284

Signorelli S., Kohl K., Rybach L., 2004. *Sustainability of Production from Borehole Heat Exchanger Fields*, 20th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, 6 pp.

Société suisse pour la Géothermie (SSG) et suisse énergie, *fiche technique : Les sondes géothermiques : Un chauffage discret, sans émissions de CO₂ et sans entretien*, 2 pp.

Vuataz F.-D., Bossy F., Colliard B., Wilhelm J., 2005. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg*, Rapport final pour le Service des transports et de l'énergie, Fribourg

Sites internet

Société suisse pour la Géothermie (SSG) : <http://www.geothermie.ch>

Centre de recherche en géothermie (CREGE) : <http://www.crege.ch>

Canton de Genève, GESDEC, carte des zones d'autorisation pour les sondes géothermiques : <http://etat.geneve.ch/dt/geologie/geothermie-269-2804.html>

Logiciels

Earth Energy Designer (EED): <http://www.buildingphysics.com/>

PILESIM2: daniel.pahud@supsi.ch

6. Géostrucures énergétiques

6.1 Introduction

Le présent chapitre 6 est destiné à l'évaluation du potentiel géothermique exploitable sur le territoire du canton de Genève dans le domaine des géostrucures énergétiques. La première partie, soit le point 6.2, comprend une présentation générale de la technologie des pieux et autres géostrucures énergétiques. On y décrit successivement le concept général du procédé, ses avantages et les méthodes de dimensionnement énergétiques. Cette partie inclut également des indications sur les aspects constructifs et économiques.

La deuxième partie (point 6.3) passe en revue quelques exemples significatifs réalisés en Suisse et à l'étranger au cours de ces dernières années, en mentionnant également les possibilités offertes par les ouvrages souterrains constitués par des géostrucures.

La troisième partie est consacrée à une évaluation du potentiel énergétique des géostrucures du canton au cours des prochaines années (point 6.4). On y trouve tout d'abord une description des conditions géologiques qui ont permis d'identifier les portions du territoire comportant des sols défavorables du point de vue des fondations des bâtiments, et donc où la réalisation de géostrucures est vraisemblable. Puis on a sélectionné les secteurs à potentiel de géostrucures énergétiques, soit les zones de construction destinées à des bâtiments importants situées sur ces terrains aux conditions géotechniques défavorables. On a ensuite procédé à une évaluation des quantités de chaleur produite sur le territoire cantonal, basée sur une estimation du taux de croissance du volume de construction et de la proportion de géostrucures équipées en échangeur de chaleur (6.4.2). De plus les potentialités dans quelques secteurs spécifiques de développement en phase de PLQ ou de plan de masse ont été étudiées plus en détail. Les bâtiments de deux d'entre eux, où l'état des démarches et l'intérêt des organismes concernés pourrait favoriser la concrétisation de tels ouvrages, ont fait l'objet d'une évaluation chiffrée (SOVALP, tour Etoile).

Le point 6.5 contient les conclusions et les recommandations quant à la suite à donner à la présente étude. Une liste de références énumère les principales publications relatives à la conception, la réalisation et le fonctionnement des géostrucures énergétiques, ainsi que celles concernant le territoire cantonal.

6.2 Les géostrucures énergétiques

6.2.1 Concept général

Les *géostrucures* sont des ouvrages d'appui ou de soutènement mis en place dans le sol ou en contact avec lui. Suivant le concept et la destination, on distingue les types suivants :

Fondations

- Pieux battus (pieux préfabriqués)
- Pieux forés (moulés dans le sol)
- Barrette de paroi moulée

Parois

- Rideaux de pieux (paroi berlinoise)
- Parois moulées de soutènement
- Parois de soutènement préfabriquées

Dalles

- Dalles ou radier de fondation

Cadres en béton armé

- Murs, radiers, dalles de couverture

En principe tous ces éléments et d'une façon générale toute construction en contact avec le sol peuvent être équipés en échangeur de chaleur géothermique. On les appelle alors des *géostrucures énergétiques*. En effet, à partir d'environ 10 mètres sous la surface de la Terre, la température devient très rapidement constante, avoisinant sous notre climat une valeur de 9 - 11°C. Ce niveau de température autorise une utilisation thermique pour le chauffage de bâtiments en hiver et pour le refroidissement en été.

L'énergie absorbée par les géostrucures, prioritairement en béton qui possède d'excellentes propriétés thermiques, est véhiculée par un fluide circulant dans un réseau de conduites intégré. Les conduites sont reliées à un collecteur qui alimente une ou plusieurs pompes à chaleur (Figure 6-1).

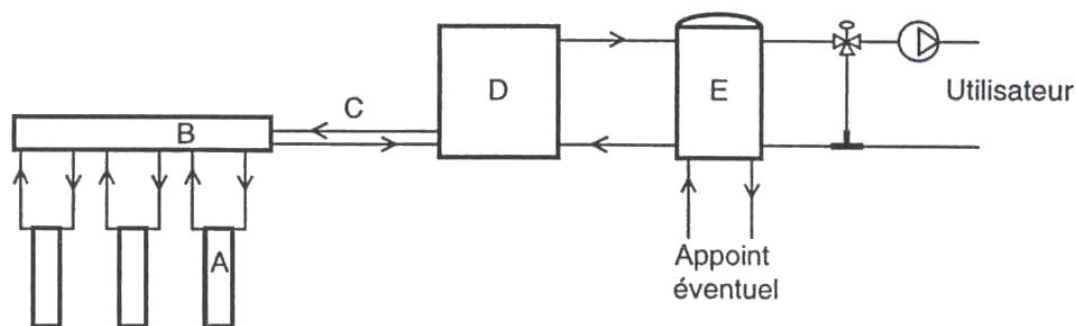


Figure 6-1. Schéma de principe d'une installation de pieux énergétiques avec pompes à chaleur. A : pieux énergétiques, B : collecteur, C : conduites de liaison, D : pompe à chaleur, E : stockage tampon (Pahud, 2002).

L'installation fonctionne sur un cycle annuel, avec extraction de chaleur du sol pendant la saison de chauffage (injection de froid dans le sol) et une extraction de froid pendant la saison chaude (injection de chaleur dans le sol). Contrairement à certaines configurations de sondes géothermiques, il n'est généralement pas possible de n'extraire que de la chaleur ou du froid du sous-sol sans prévoir de recharge. Les puissances installées varient de quelques kW à plusieurs centaines de kW thermiques.

Comme conduit caloporteur, on fait normalement appel à des tuyaux en matière synthétique. Dans le cas des géostrucures préfabriquées et des éléments en béton coulés sur place, ces tuyaux sont fixés à la cage d'armature avant le bétonnage. Pour les pieux battus en béton centrifugé, les circuits de tubes sont placés dans la cavité centrale du pieu. L'espace restant est ensuite rempli avec un matériau ad hoc, possédant une bonne conductibilité thermique.

Les figures 6-2 à 6-6 montrent successivement le schéma de principe d'un pieu énergétique moulé, ainsi que quelques détails et des vues de l'exécution des pieux et des parois énergétiques.

Figure 6-2. Schéma de principe d'un pieu énergétique moulé dans le sol avec sa cage d'armature et les conduites de circulation du fluide caloporteur

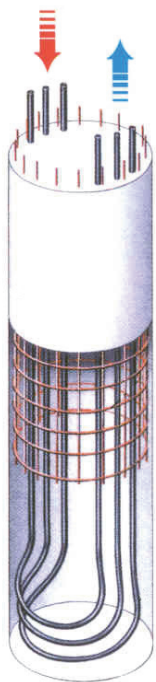


Figure 6-3. Pieux centrifugés avant mise en place (photo GRAM SA)



Figure 6-4. Conduites de circulation de fluide caloporteur fixées à la cage d'armature d'un pieu moulé (photo F-D. Vuataz, CREGE).

Figure 6-5 . Mise en place de la cage d'armature d'une paroi moulée équipée de conduites de circulation de fluide caloporteur (photo Nägelebau, Röthis).



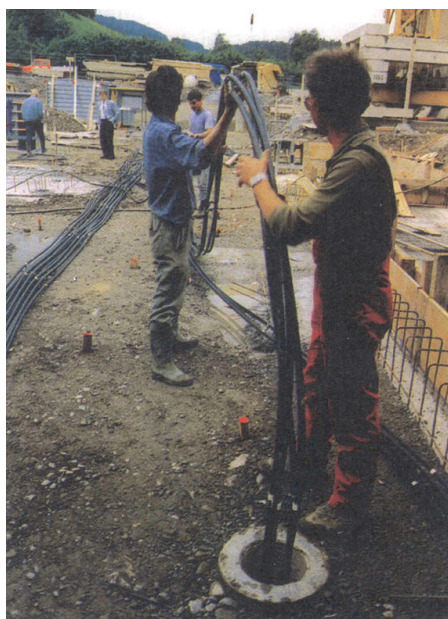


Figure 6-6. Pose de la conduite de circulation du fluide caloporteur dans la cavité intérieure d'un pieu battu dans le sol (photo SACAC AG, Lenzburg).

Les pieux en béton armé ont en général un diamètre entre 30 et 150 centimètres et leur longueur peut varier de quelques mètres à 40 m, voire plus. Les parois moulées sont le plus souvent réalisées avec une épaisseur de 60 à 100 cm et peuvent descendre à des profondeurs pouvant atteindre 25 m environ. Leurs fiches auront une longueur de 3 à 12 m, selon la hauteur excavée, la qualité du terrain et les conditions hydrogéologiques.

La capacité énergétique d'un pieu battu d'un diamètre de 40 cm, représente une puissance thermique ou frigorifique de l'ordre de 30 à 50 W/m, en fonction de l'écartement des pieux et des caractéristiques du sous-sol. Dans des conditions de fonctionnement habituelles, chaque mètre de pieu produit ainsi entre 50 et 100 kWh d'énergie par an. Dans certains terrains et pour des diamètres supérieurs, des rendements bien plus élevés ont été enregistrés.

6.2.2 Dimensionnement des géostructures énergétiques

Bases de dimensionnement

La règle de base du dimensionnement des géostructures énergétiques est de développer un bilan thermique annuel équilibré, afin d'assurer la stabilité du système à long terme. Le concept du système de chauffage et/ou de refroidissement doit être établi très tôt dans un projet, puisque les pieux de fondation seront bien souvent construits avant que les installations de chauffage et de ventilation ne soient dimensionnées. Le nombre de pieux et/ou la surface des parois moulées devant être équipé d'échangeurs doit être connu avant la construction des fondations du bâtiment, ce qui implique à la fois une bonne connaissance des propriétés thermiques du terrain, de l'hydrogéologie locale et du type de géostructure utilisé. Il faut aussi définir les besoins en énergie du bâtiment et sa conception énergétique, de manière à pouvoir intégrer les géostructures dans le système de façon adéquate.

Au niveau du concept plusieurs paramètres doivent être définis très tôt, en particulier :

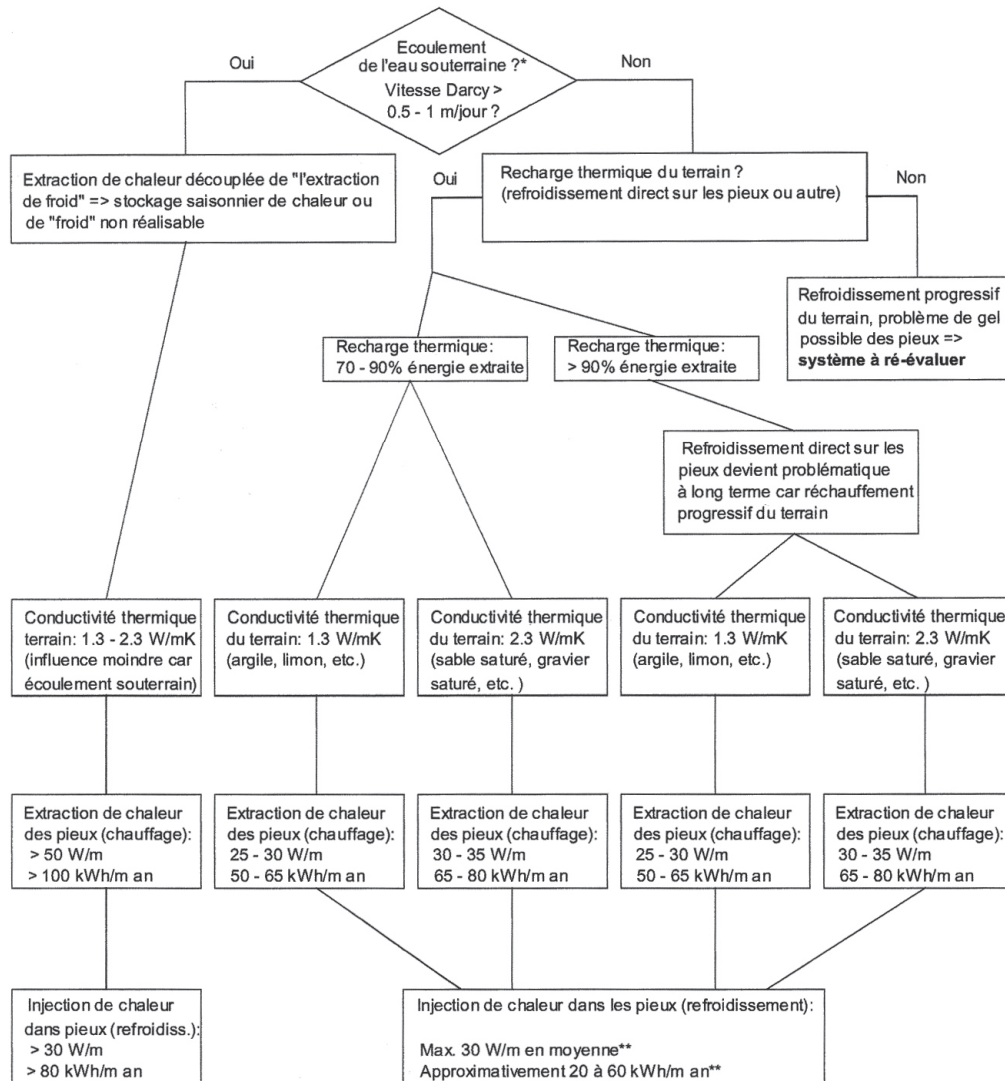
- coefficient de performance annuel de la ou des pompes à chaleur,
- puissance et quantité d'énergie spécifique annuelle délivrées par les géostructures,
- besoin d'isolation des interfaces entre les divers constituants du système en contact avec le sol,
- régime hydraulique au sein du système de circulation des fluides.

Les principaux paramètres géologiques et hydrogéologiques à déterminer sont la capacité thermique volumétrique, la conductivité thermique, et la perméabilité du terrain (chapitre 4.2). Pour la caractérisation thermique d'un système de géostructures énergétiques, on doit connaître sa résistance thermique et sa capacité thermique. Ces paramètres dépendent notamment du type de géostructure utilisé, de ses

dimensions, du nombre et de l'arrangement spatial des tubes incorporés, du régime d'écoulement du fluide dans les tubes et de la conductibilité thermique des matériaux utilisés.

Prédimensionnement

Pour le prédimensionnement d'une installation ou dans le cadre d'une première approche du potentiel disponible, et avant d'entreprendre le travail de dimensionnement proprement dit, on pourra procéder à une estimation paramétrique en ayant recours à des valeurs statistiques tirées de la pratique, selon la méthode illustrée sur la figure 6-7 (Fromentin, 1997). Les puissances et les énergies sont données par mètre linéaire de pieu de 40 cm de diamètre. Pour des diamètres plus grands les performances indiquées augmenteront sensiblement.



* il suffit que l'eau souterraine s'écoule dans une couche traversée par les pieux échangeurs, même mince relativement à la profondeur de ces derniers, pour que l'effet soit significatif.

** si la recharge thermique du terrain excède 90% de l'énergie prélevée, la température du terrain aura tendance à augmenter à long terme, ce qui limitera la recharge thermique si elle est réalisée par du refroidissement direct sur les pieux.

- avec des pieux de diamètre plus grand (> 40 cm), l'espacement est généralement plus grand, et les performances indiquées ci-dessus peuvent être revues à la hausse (jusqu'à 50% pour des pieux de 1 m de diamètre).

- les valeurs données ci-dessus correspondent à un système monovalent. Pour un fonctionnement en ruban des pieux, la puissance par mètre de pieu sera plus basse, et la quantité d'énergie par mètre de pieu plus grande.

Figure 6-7. Synthèse des principaux résultats numériques du prédimensionnement d'un avant-projet. Les puissances et énergies indiquées sont données par mètre linéaire de pieu énergétique (Fromentin, 1997).

Le schéma de la figure 6-7 définit un principe de raisonnement. Les valeurs doivent être adaptées aux valeurs spécifiques rencontrées à Genève, en particulier les conductivités du terrain (voir chapitres 4.2 et 5.11) et la recharge possible.

Logiciels de dimensionnement

Fondamentalement, le dimensionnement des pieux énergétiques ne diffère pas de celui des sondes géothermiques verticales. PILESIM, déjà évoqué dans le chapitre des SGV est ainsi un logiciel initialement prévu pour le dimensionnement de pieux énergétiques. PILESIM2 a d'ailleurs été développé dans le cadre du projet du dock E de l'aéroport de Zürich (voir point 6.3.1).

Divers types de systèmes peuvent être simulés : ils ont tous en commun le chauffage du bâtiment par le biais d'une pompe à chaleur (PAC) couplée aux pieux énergétiques. L'extraction de chaleur hivernale peut être combinée avec une recharge thermique du terrain en été, ou avec une production de froid en été qui peut être réalisée de trois manières différentes : par une machine frigorifique couplée sur des pieux, par refroidissement direct sur les pieux, ou par la combinaison des deux avec priorité sur le refroidissement direct (SIA D0190, 2005).

Les données utilisées par PILESIM pour la simulation sont les caractéristiques du sol intégrant jusqu'à trois couches différentes avec un possible écoulement d'eau souterraine dans chaque couche, le type de pieu énergétique, l'interface sol-bâtiment, la pompe à chaleur et la machine frigorifique, et les conditions de chargement pour le chauffage et le refroidissement, qui représentent les besoins annuels en énergie et les températures de l'énergie thermique distribuée (Pahud, 2007 ; Figure 6-8).

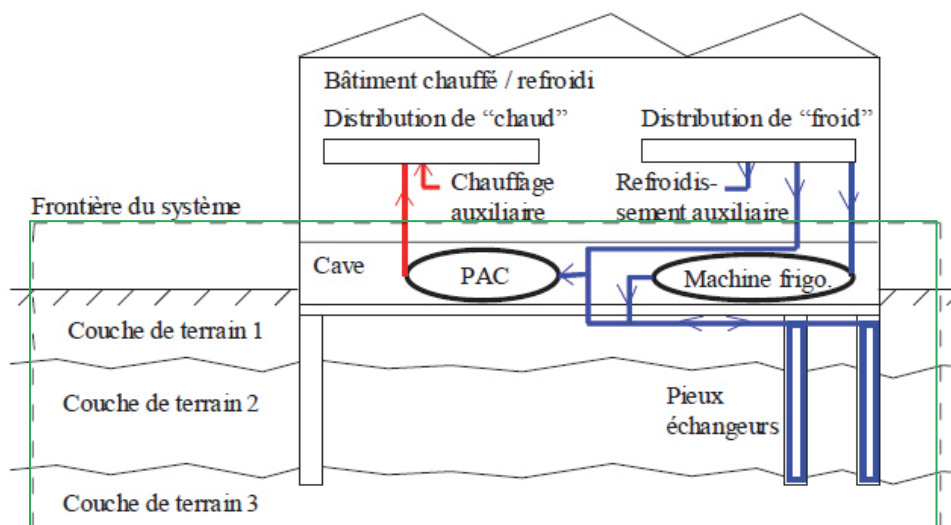


Figure 6-8. Vue schématique d'un système à pieux énergétiques: la partie du système modélisée par le programme PILESIM2 est délimitée par le cadre vert

Un autre logiciel pouvant être utilisé est TRNSYS avec TRNSBM ou TRNDSTP, qui permet une simulation très détaillée du système, pour le dimensionnement définitif et l'optimisation et la régulation du système. Celui-ci sera plutôt utilisé pour des systèmes de grande taille avec un dimensionnement compliqué (Pahud, 2006).

Il n'existe que peu de logiciels spécialement destinés à dimensionner les géostructures dans un tunnel ou des blindages : cette technique est encore peu utilisée, et reste très spécifique. Pour exemple, des modélisations ont été réalisées pour le dimensionnement des géostructures énergétiques du tunnel de CEVA par le groupe Geowatt (Geowatt, 2008).

Influence des changements de température sur la portance mécanique des pieux

Les effets induits dans le système sol-pieux par les *cycles de chargement-déchargement de la température* affectent dans une certaine mesure la faculté de *portance mécanique des pieux* de fondation. Dans la pratique courante, cependant, cet effet n'est pas pris en compte dans le dimensionnement des pieux. L'influence réelle de ce phénomène est étudiée depuis plusieurs années par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL, dont les recherches sont complétées par des observations sur une installation d'essai en vraie grandeur. Les conclusions tirées à ce jour permettent de dire que les effets thermiques peuvent avoir une certaine importance sur le comportement des fondations profondes, et qu'il convient d'en tenir compte dans le dimensionnement, le cas échéant. Toutefois on constate que ceci ne limite en rien la faisabilité de telles installations (Laloui, 2006 ; Boënnec, 2009).

6.2.3 Avantages et contraintes d'un système à géostructures énergétiques

Les SGV et les géostructures énergétiques sont très proches dans leur mode de fonctionnement et peuvent fournir à la fois du chaud et du froid, en utilisant une PAC pour la chaleur et une machine frigorifique (qui peut être cette même PAC) ou non pour le froid. Par contre, les géostructures seront essentiellement présentes dans les terrains quaternaires, alors que les SGV se situeront pour la plupart dans les terrains molassiques. Un aspect particulièrement intéressant des géostructures est la production de froid, car elles utilisent une tranche de terrain moins profonde, et donc plus froide que les SGV.

Les grands bâtiments administratifs ont souvent une demande en froid très importante, et le refroidissement direct avec les pieux échangeurs demande moins d'énergie électrique qu'une machine frigorifique. Il faut toutefois relever que la production de chaud doit équilibrer celle de froid, sous peine de réchauffer le terrain.

S'agissant de géothermie, le recours à des géostructures énergétiques présente naturellement tous les autres avantages de cette ressource indigène évoqués au chapitre 5.5.

Dans les zones où les SGV sont interdites du fait des nécessités de protection des eaux (voir chapitre 5.6.1 et figure 5-5), les géostructures sont souvent envisageables, du fait de leur plus faible profondeur. Il convient de respecter une distance de sécurité de 2 m par rapport au niveau haut de la nappe à protéger (nappe du Genevois à Genève) et /ou de respecter la législation en vigueur sur la protection des eaux.

Dans le secteur AU de protection des eaux, l'installation et l'exploitation des pieux énergétiques nécessite une autorisation. En zone S3, ils peuvent être admis si l'on peut garantir que l'eau potable ne subira aucune atteinte (OFEV, 2009).

6.2.4 Aspects économiques

Généralités

La rentabilité économique des installations techniques d'un bâtiment se calcule par la méthode des charges annuelles, conformément aux directives de la Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation (SWKI – SICC), et compte tenu des spécifications de la norme SIA 480, en faisant intervenir les charges suivantes :

- charges financières des montants investis pour les installations techniques et pour l'aménagement des locaux ;
- coût de l'énergie utilisée (électricité consommée par la PAC et/ou par les appareils auxiliaires, etc.) ;
- frais d'exploitation et d'entretien (surveillance, réparations, etc.) ;
- autres frais (administration, assurances, etc.).

Les charges financières sont constituées par les coûts annuels, soit les intérêts sur le capital investi et son amortissement sur la durée d'utilisation (annuités). Le coût de l'énergie utilisée dépend de son prix d'achat et de la quantité consommée.

On démontre la rentabilité économique d'une installation d'énergie alternative en comparant les charges annuelles avec celles d'une installation de chauffage conventionnelle. Dans le cas d'une installation à pieux énergétiques, on constate que les coûts d'investissement supplémentaires sont amortis en quelques années, en général entre 8 à 10 ans, grâce aux charges annuelles très réduites.

Cependant, la présence d'une géostructure n'implique pas nécessairement qu'elle soit appropriée pour devenir une source de froid et de chaleur. Dans certains cas on pourra préférer d'autres ressources renouvelables souvent plus économiques, par exemple les sondes géothermiques verticales ou la création d'un doublet dans la nappe souterraine (si celle-ci est présente et utilisable). De plus, les pieux étant des structures coûteuses, on cherchera, du point de vue du génie civil, à les éviter par exemple en utilisant des micropieux, qui sont impropres à l'exploitation géothermique, ou en construisant simplement un radier.

En ce qui concerne le rendement, une installation utilisant des géostructures est généralement moins efficace qu'une installation de sondes verticales, en raison surtout de leur plus faible profondeur, et du fait que le dimensionnement des géostructures ne dépend pas directement des besoins de chauffage et /ou de refroidissement. Les performances du système couvriront très rarement la totalité des besoins en énergie de chauffage, et rarement plus de 50% des besoins. Il est cependant possible de suppléer à ce manque par d'autres moyens (par exemple chauffage à distance ou panneaux solaires).

Exemple de calcul économique d'une installation à pieux

Bases de départ

Nous prenons comme exemple un bâtiment locatif neuf comportant 24 appartements.

L'installation de chauffage est constituée par des pieux énergétiques couplés à une pompe à chaleur, permettant en période estivale de tempérer les locaux par refroidissement direct (free-cooling). Une telle disposition favorise la régénération thermique du champ des pieux, et contribue ainsi à l'amélioration du coefficient de performance. Dans ce cas, l'énergie utilisée est limitée à celle consommée par la seule pompe de circulation.

Cette solution est comparée à une installation de chauffage au mazout.

Le calcul est effectué en faisant intervenir les coûts externes environnementaux (CEE), selon la norme SIA 480. A titre de comparaison, un deuxième cas est calculé sans CEE.

Données techniques

Surface du bâtiment :	env. 600 m ² (30 m x 20 m)
Surface de référence énergétique :	env. 2'500 m ²
Nombre d'appartements :	24
Puissance de chauffage :	70 kW
Consommation de chaleur (y compris ECS) :	215 MWh/a (énergie utile)
Longueur active des pieux énergétiques :	1'200 m
Nombre de pieux énergétiques :	78 (longueur 15.4 m)
Taux d'utilisation de la chaudière :	88 %
Coefficient de performance de la PAC :	3.2

Prix admis des énergies consommées

Mazout de chauffage (extra léger) :	CHF 90.00 / 100 litres
Electricité Hivers TH :	16.8 cts / kWh
Hivers TB :	9.0 cts / kWh
Tarif de puissance en hiver :	CHF 12.00 / kW mois

Au niveau des investissements, seules les installations de production sont prises en compte dans les deux variantes. Les réseaux de distribution et les installations de diffusion de chaleur ne sont donc pas pris en compte dans ce calcul.

Investissements pour l'installation de chauffage au mazout

Comprenant chaudière avec brûleur, cheminée et citerne
 Total installation de chauffage conventionnelle au mazout **45'000.00**

Investissements pour une installation de pieux énergétiques (PE) avec PAC

Comprenant pompe à chaleur, équipement des pieux et aménagements, remplissage au glycol, collecteurs entre pieux
 Total installation de pieux énergétiques avec PAC **140'000.00**

Ce total ne prend en considération que l'équipement des pieux en échangeur. Les pieux eux-mêmes, exécutés pour des raisons de stabilité du bâtiment, font partie du coût de la construction de l'ouvrage.

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à chaudière, avec prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Entretien, exploitation, réparations	1'860.00
Coût de l'énergie	32'520.00
Total des coûts de fonctionnement	<u>34'380.00</u>
Total des charges financières	3'000.00
Total du coût externe environnemental (CEE)	<u>10'980.00</u>
Total des dépenses annuelles	48'360.00

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à PE et PAC, avec prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Entretien, exploitation, réparations	1'400.00
Coût de l'énergie	15'550.00
Total des coûts de fonctionnement	<u>16'950.00</u>
Total des charges financières	7'000.00
Total du coût externe environnemental (CEE)	<u>3'400.00</u>
Total des dépenses annuelles	27'350.00

Alors que le coût d'investissement d'une installation PE/PAC est le triple de celui de l'installation conventionnelle, les dépenses annuelles ne représentent qu'un peu plus de la moitié, si l'on tient compte des coûts externes environnementaux. L'économie annuelle de 21'000 francs permet d'amortir l'investissement supplémentaire de 95'000 francs en 5 ans environ.

Sans les coûts externes environnementaux, la comparaison donne les résultats suivants :

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à chaudière, sans prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Total des dépenses annuelles **37'360.00**

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à PE et PAC, sans prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Total des dépenses annuelles **23'950.00**

On constate que dans la comparaison sans CEE, les dépenses annuelles de la solution PE/ PAC, inférieures de 13'4000 francs, permettent d'amortir l'investissement supplémentaire en 8 ans environ.

6.3 Exemples et projets de réalisations

En Suisse, les origines de cette technique remontent aux années 80. Depuis lors, un grand nombre de bâtiments de toute sorte, situés en grande partie dans le nord-est du pays, a été construit selon ce système. Un des premiers et des plus importants est le centre industriel de l'entreprise PAGO, dans le canton de St-Gall, qui repose sur 570 pieux énergétiques (Figure 6-9).



Figure 6-9. Bâtiment industriel reposant sur 570 pieux énergétiques fonctionnant comme source de chaleur et de froid. 1 : Pieux énergétiques, 2 : Conduites de raccordement, 3 : Collecteur primaire, 4 : Collecteur principal, 5 : Centrale énergétique (Lippuner AG, Grabs).

6.3.1 Terminal Dock Midfield de l'aéroport de Zurich

Ce bâtiment est le nouveau terminal E de l'aéroport de Zürich, d'une longueur de 500 m pour une largeur de 30 m. En raison des mauvaises conditions géologiques (terrains meubles post-glaciaires), il a été construit sur 440 pieux de fondation. Ces pieux ont un diamètre exceptionnellement grand (90 à 150 cm) et sont fichés dans une couche de moraine de fond située à une profondeur de 30 m environ. Plus de 300 pieux ont été équipés pour contribuer au chauffage et refroidissement du bâtiment. La planification et le dimensionnement ont été basés sur des études détaillées, qui ont inclus deux tests de réponse géothermiques et des simulations thermiques dynamiques du bâtiment et du système de pieux.



Figure 6-10. Vue aérienne du dock E de l'aéroport de Zürich (source : site de l'aéroport de Zürich)

Le bâtiment a été mis en service en 2003. Un suivi de l'installation utilisant les pieux énergétiques a été instauré en octobre 2004 pour une durée de 2 ans. Le bilan énergétique du système, en particulier les demandes annuelles d'énergie de chauffage et de refroidissement sont proche des valeurs planifiées.

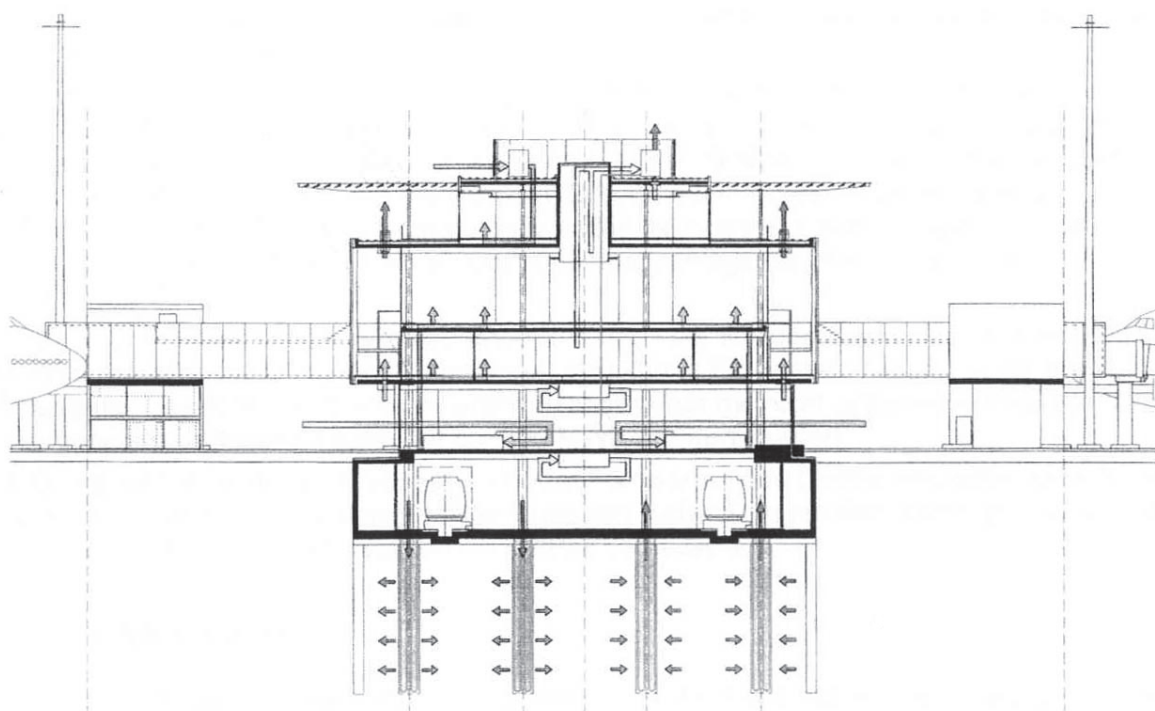


Figure 6-11 . Coupe transversale du dock montrant l'installation des pieux énergétiques (Pahud et al, 1999)

Les performances thermiques du système sont très bonnes : en effet les mesures d'octobre 2005 à septembre 2006 ont montré que la pompe à chaleur (PAC) dimensionnée pour délivrer une puissance thermique de 630 kW, contribue pour plus de 70% au chauffage du bâtiment (3020 MWh/an), le reste étant couvert par du chauffage à distance. La demande de refroidissement est causée par la nécessité d'évacuer les charges internes (1170 MWh/an). Elle est couverte par le géocooling à 53%. Le reste du

froid est produit en satisfaisant les besoins de chauffage simultanés (32%) et avec la PAC utilisée comme machine frigorifique (15%). La production de géocooling et de froid représente 40% de l'énergie extraite en hiver par la PAC et assure ainsi une recharge thermique suffisante du terrain, indispensable pour garantir le fonctionnement à long terme du système.

D'un point de vue économique, les prestations du système sont également satisfaisantes. Le coût de l'énergie thermique (chaud et froid) délivrée est calculé à 6 ct./kWh, contre 8 ct./kWh pour une solution conventionnelle. L'investissement supplémentaire du système de pieux pourra donc être remboursé en 8 ans environ (OFEN, 2007).

Il faut souligner l'importance d'un calcul de dimensionnement approprié et de mesures préliminaires, ainsi que l'importance du réglage de l'installation au début de son exploitation, afin d'optimiser son rendement.

Grâce à la qualité de l'ouvrage et à ses performances exceptionnelles, la Société suisse pour la géothermie lui a décerné en août 2010 le « **Prix Suisse de Géothermie 2010** ».

6.3.2 Bâtiment scolaire Vers-l'Eglise, Fully

Cette école primaire a été construite dans le courant de l'année 2000. Elle est chauffée depuis janvier 2001 (Figure 6-12).

Le bâtiment repose sur 118 pieux battus dont 41 ont été équipés de sondes géothermiques double U. Ces pieux ont ensuite été remplis de sable humide afin d'assurer une bonne conductivité. Le diamètre des pieux varie entre 35 et 40 cm, pour une longueur moyenne de 23 m environ. Le chauffage est assuré par 4 pompes à chaleur en cascade avec commande et régulation intégrés. En été le cycle est inversé et le système assure le refroidissement du bâtiment grâce à un dispositif de rayonnement de plafond (Bonvin, 2002).

Après la phase de réglage de l'installation, on constate que le coefficient de performance (COP) est supérieur à 4.5, et que l'installation couvre la totalité des besoins de chaleur et de refroidissement du bâtiment, ce qui est exceptionnel dans le cas de géostructures énergétiques.



Figure 6-12 . Vue du nouveau bâtiment scolaire de Fully, en Valais, équipé de 41 pieux énergétiques (photo J. Wilhelm).

6.3.3 Centre Aldi à Domdidier

La firme allemande Aldi a achevé en 2008 la construction de son important centre de logistique pour la Suisse occidentale à Domdidier. Ce complexe comporte principalement une grande halle de tri des marchandises, des chambres froides et un bâtiment administratif (Figure 6-13).

Des pieux de fondation équipés en échangeur thermique contribuent à satisfaire les besoins en chaleur et en froid des bâtiments. Ces besoins sont couverts par une pompe à chaleur de 500 kW et par deux chaudières à mazout et à gaz d'une puissance de 800 kW chacune (Figure 6-14)



Figure 6-13. Le centre logistique Aldi est opérationnel depuis août 2008



Figure 6-14. Pompes à chaleur et chaudières d'appoint

60'000 mètres de conduites en polyéthylène situées dans les 378 pieux énergétiques véhiculent de l'eau pure, qui fournit sa chaleur à la PAC via un échangeur et un circuit intermédiaire. Les pieux moulés, d'un diamètre de 26 cm et espacés de 6,66 m ont une longueur de 34 mètres (Figure 6-15).



Figure 6-15 . Pose de la cage d'armature d'un pieu énergétique de 34 mètres de long sur le chantier Aldi à Domdidier (photo J. Wilhelm, 2007).

La figure 6-16 montre le schéma de principe de l'installation. Les rejets de chaleur des installations frigorifiques contribuent au rechargement du stock thermique, par l'intermédiaire des pieux énergétiques.

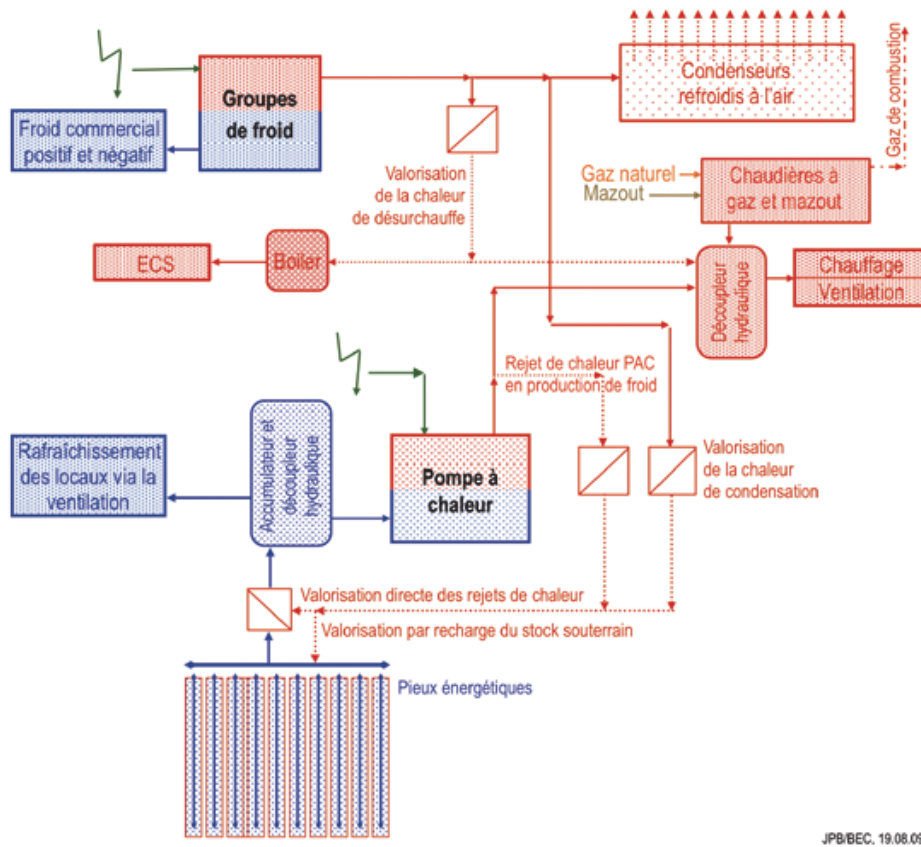


Figure 6-16 . Centre Aldi, Domdidier. Concept énergétique (Borel, 2009).

Le centre logistique a été mis en service au début de l'année 2009. Le fonctionnement constaté depuis lors est conforme aux prévisions (Borel, 2009).

6.3.4 Bâtiments locatifs à Delémont

Deux bâtiments construits sur pieux énergétiques sont en voie d'achèvement à Delémont. Il s'agit de constructions sur 4 niveaux, reposant sur 50 pieux de 15 mètres de longueur, d'un diamètre de 90 cm (Figure 6-17). L'énergie thermique des pieux sert d'appoint à une chaudière à gaz. Les bâtiments abriteront des locaux commerciaux et d'habitation.

Ce cas constitue une première dans l'arc jurassien. L'énergie renouvelable valorisée par les pieux est considérée comme une valeur ajoutée, comme en témoigne la documentation de promotion.



Figure 6-17. Pieu énergétique en cours d'exécution à Delémont (photo Compatible SA).

6.3.5 Exemple à Genève : Nouvelle halle logistique du CICR à Satigny (GE)

Ce projet était en cours de réalisation lors de la rédaction du présent rapport. Il s'agit à notre connaissance du seul exemple de pieux énergétiques dans le canton de Genève.

Cette halle, d'une surface d'environ 5'000 m² est située dans la zone industrielle de Meyrin-Satigny (ZIMEYSA) à proximité de la route du Mandement. En raison d'un approfondissement local des terrains offrant de bonnes capacités de fondation (moraine et Molasse) correspondant à un épaissement des terrains superficiels médiocres (retrait wurmien), le bâtiment a été fondé sur 149 pieux de 19 à 24 m de longueur dont 144 ont été équipés de sondes « simple-U », identiques à celles équipant les sondes géothermiques classiques (Figures 6-18 et 19).

Les cages d'armature des pieux, d'un diamètre de 600 mm, 800 mm et 1000 mm ont été munies de 3 à 4 sondes par pieu. Ces sondes ont toutes 20 m de longueur avec un diamètre de 32 mm. Au total, 465 sondes ont été installées (site internet HakaGerodur).



Figures 6-18 et 6-19. Halle CICR à Satigny. Cages d'armatures de 20 m équipées des sondes en double-U en attente (photo Haka Gerodur)

6.3.6 Bâtiments tours sur pieux énergétiques à Francfort

La ville de Francfort-sur-le-Main peut être considérée comme la cité des pieux énergétiques. La figure 6-20 montre la situation des principaux bâtiments sur pieux construits récemment. Les points jaunes indiquent l'emplacement des constructions avec pieux énergétiques.



Figure 6-20 . Bâtiments importants construits sur pieux énergétiques dans la ville de Francfort-sur-le-Main, en Allemagne (Katzenbach, 2007).

Un des plus significatifs est le Main Tower qui repose sur 112 pieux de 150 cm de diamètre et de 30 mètres de longueur (Figure 6-21). Le bâtiment, qui abrite des bureaux, des locaux commerciaux et des parkings souterrains, a été mis en service en 2005.

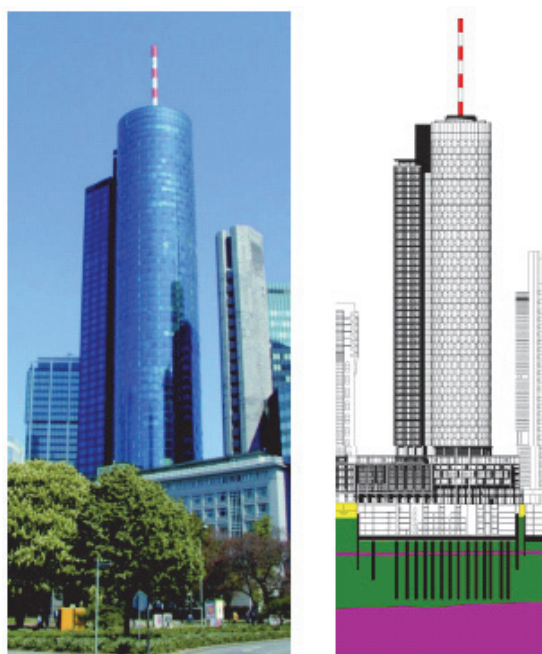


Figure 6-21 . Photo et schéma en élévation du Main Tower, à Francfort-sur-le-Main, reposant sur 112 pieux énergétiques (Katzenbach, 2007).

Une imposante tour de 185 mètres de haut, construite par la Banque Centrale Européenne, est en cours de réalisation à l'est du centre ville. Elle reposera sur 97 pieux de fondation équipés en échangeur thermique et sera achevée en 2014.

Des informations complémentaires et une description plus détaillée de la tour BCE sont données au chapitre 6.4.

6.3.7 Métro de Vienne

Divers éléments constructifs des tunnels et des ouvrages souterrains enterrés sont susceptibles d'être équipés en échangeur de chaleur. Les cadres en béton armé enterrés constituent une catégorie particulière de géostructures énergétiques. Ils trouvent leur application dans les tunnels urbains et les lignes de métro enterrées. Dans la région viennoise, en Autriche, plusieurs stations de métro et de liaisons ferroviaires sont conçues de façon à exploiter le potentiel calorifique du sous-sol.

Durant l'extension de la ligne de métro U2 à Vienne, quatre stations de métro ont été équipées de géostructures énergétiques. Celles-ci sont utilisées pour la production de chaleur et de froid. Les 4 stations combinées ont une capacité de chauffage de 449 kW et de refroidissement de 231 kW. Il faut souligner les avantages du refroidissement dans ce type d'installation, car les équipements sont moins encombrants que ceux d'une installation classique de refroidissement.

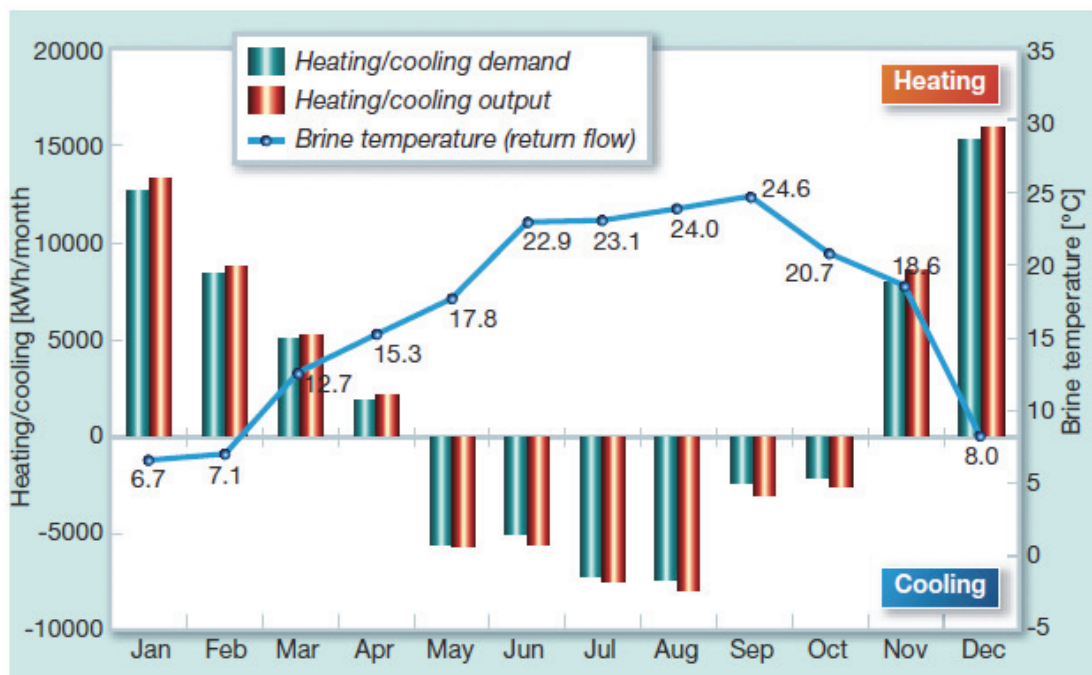


Figure 6-22. Métro de Vienne : distribution annuelle des besoins en chauffage et en refroidissement (Hofinger et Markiewicz, 2005)

Les installations de conduits de liquide caloporteur sont différentes dans chaque station : dans la station U2/1 (Schottenring), située sous le canal du Danube (d'une profondeur de 21 m), les structures énergétiques sont situées dans deux puits, où le radier de fondation et une partie des rideaux pieux de soutènement sont également utilisés. Dans la station U2/2 (Taborstrasse), les parois moulées, les pieux et la dalle de radier ont été équipés pour la géothermie (Figure 6-23). La station U2/3 (Pratersten) utilise les parois moulées ainsi que la totalité du radier (Figure 6-24). Enfin la station U2/4 (Messe) se trouve sous une route principale. Etant donné sa plus faible demande en énergie, seule une partie de son radier est équipée.

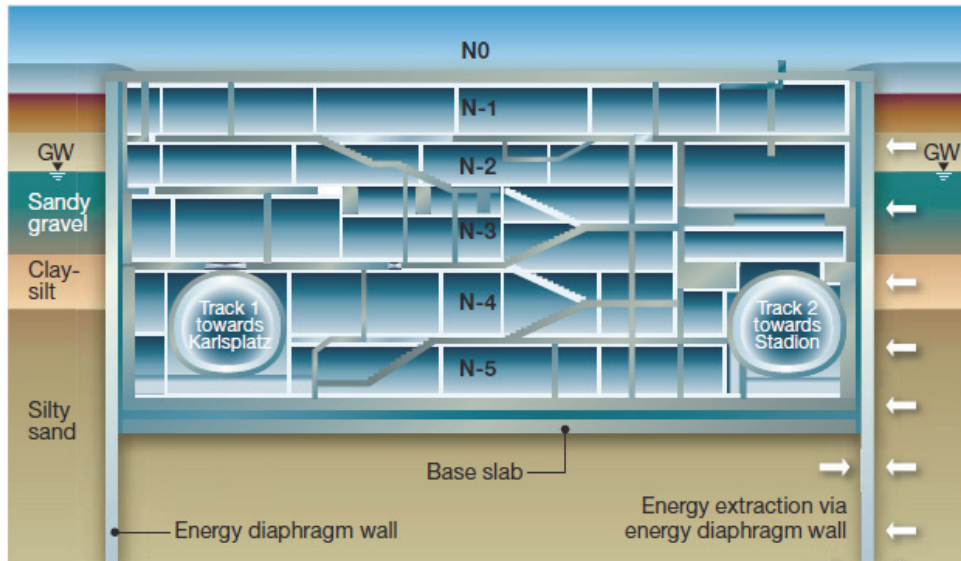


Figure 6-23. Section transversale de la station Taborstrasse (U2/2) équipée de géostructures énergétiques (Hofinger et Markiewicz, 2005).

Les risques mécaniques ont été soigneusement étudiés avant le début des travaux, déterminant que l'effet des changements de températures sur les structures de soutènement et les terrains était négligeable. En cas de dommage sur une partie de l'installation, des longueurs de tuyaux individuelles peuvent être déconnectées.

Une étude d'impact environnemental a également été effectuée, concluant que les eaux souterraines ne seraient pas affectées à partir d'une distance de 5 m de l'installation. L'écoulement des eaux peut encore diminuer cette distance. Il n'est cependant pas encore certain que cet écoulement ne soit pas perturbé par les constructions souterraines.

La réalisation de ce type de structures est encore au stade expérimental : de nombreux problèmes techniques ont dû être résolus lors de la construction de ces stations, principalement pour éviter d'endommager les tuyaux lors de la construction et l'utilisation du système. Un certain taux d'avarie (3%) est prévu dans la conception de base du système. Des sources d'énergie complémentaires ont également été prises en compte, et de nombreuses simulations effectuées.

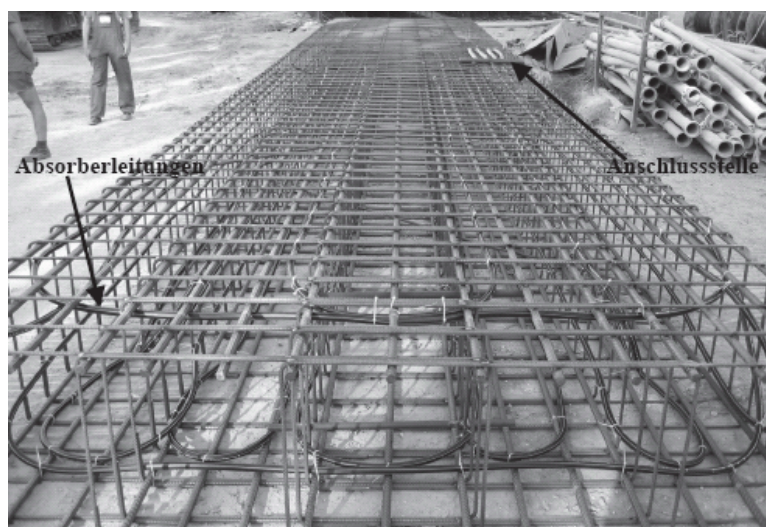


Figure 6-24 . Métro de Vienne, station Praterstern. Cage d'armature d'une paroi moulée équipée par des tubes thermiques

Un autre exemple de ce type est prévu dans le Lainzertunnel, un tunnel ferroviaire qui connecte plusieurs lignes importantes de trains sous la ville de Vienne et dont la mise en service est prévue pour 2013. Dans ce cas, c'est un tronçon de rideau de pieux, équipé en échangeur de chaleur qui fournira de l'énergie de chauffage à un bâtiment voisin (Figure 6-25).

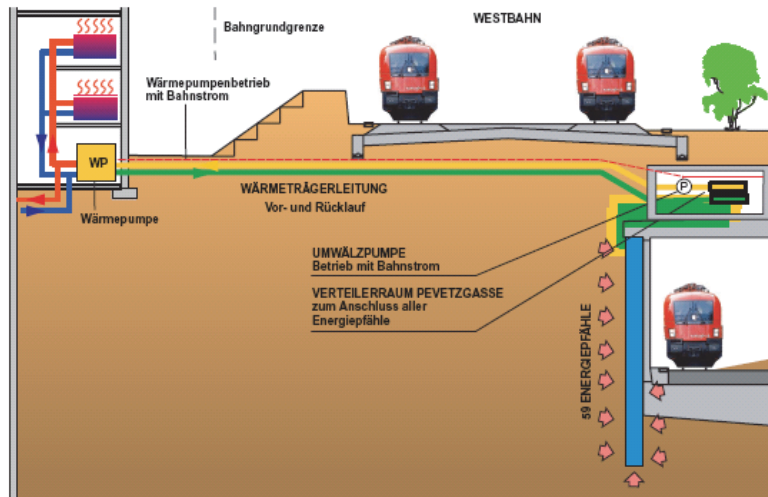


Figure 6-25. Lainzertunnel à Vienne, en Autriche. Rideau de pieux énergétiques raccordés à un bâtiment voisin

6.3.8 Géostructures dans les tunnels creusés

La possibilité d'utiliser la chaleur des massifs souterrains par des voussoirs de tunnels, voire les radiers et les bordures en béton équipés en échangeur thermiques est actuellement en étude (Figure 6-26). Il en est de même des ancrages de soutènement et surtout des géotextiles d'étanchéité posés en sandwich entre les anneaux extérieur et intérieur (Figure 6-27).

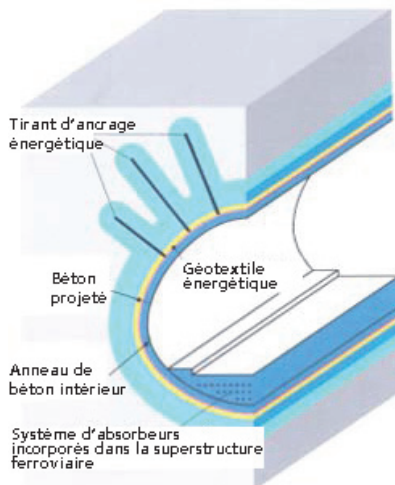
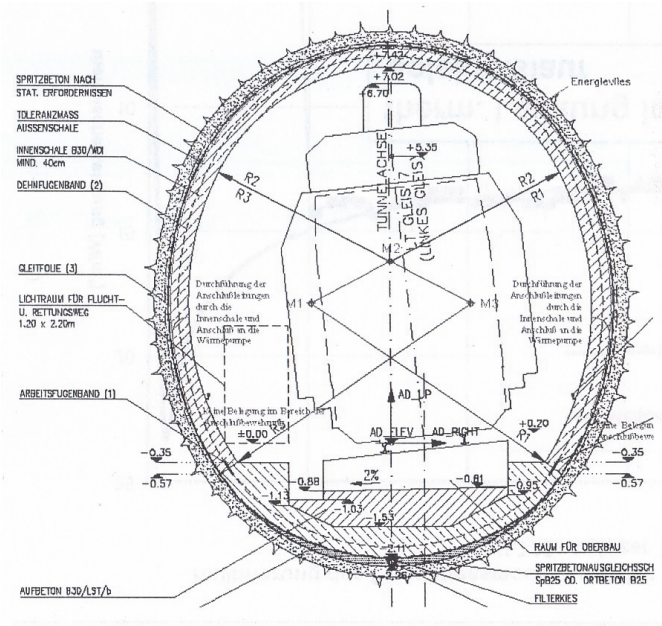


Figure 6-26. Eléments d'un tunnel susceptibles d'être équipés en échangeur de chaleur

Figure 6-27 . Géotextile énergétique posé entre l'anneau de soutènement extérieur et l'anneau de béton intérieur d'un tunnel



Bien que se trouvant encore en phase de recherche, principalement dans les souterrains de la région viennoise, ces tendances montrent la diversité des applications possibles de ce genre de procédé.

6.4 Evaluation du potentiel thermique des géostructures énergétiques dans le canton de Genève

Il s'agit encore d'une technique bien plus développée en Suisse allemande qu'en Romandie, et de nombreuses conditions doivent être réunies pour assurer le succès et la rentabilité d'une telle installation, contrairement à l'installation plus simple d'un champ de sondes par exemple. Genève est cependant dans une phase importante de développement et de construction, et de nombreux projets existent qui seraient propices à l'utilisation de géostructures énergétiques.

Afin de déterminer les zones potentielles de développement, nous avons d'abord produit une carte de tous les terrains géotechniquement défavorables à Genève pouvant nécessiter la présence de géostructures pour la fondation de bâtiments. Cette carte a ensuite été recoupée avec les zones de développement. Plusieurs projets de développement majeurs ont ensuite été examinés individuellement afin de déterminer lesquels présentaient le plus d'opportunité à développer des géostructures énergétiques.

6.4.1 Géologie et secteurs de développement

Le développement des géostructures est naturellement plus limité que celui des sondes, car leurs critères de réalisation sont très spécifiques. Les bâtiments nécessitant l'installation de pieux sont presque exclusivement des ouvrages de grande taille, avec un gabarit relativement élevé (en général, on ne prévoit pas de pieux pour des bâtiments de moins de 7 étages), et enfin ces installations ne se feront naturellement que sur des terrains de mauvaise qualité, qui rendent indispensable la stabilisation du bâtiment. Les tunnels et blindages sont un cas à part et leur exploitation thermique est plus délicate.

Afin d'évaluer le potentiel des ouvrages d'appui sur le canton, nous avons tout d'abord élaboré une carte du canton incluant les différents types de terrains pouvant justifier la mise en place de pieux (Figure 6-28). Cette carte a été réalisée en utilisant les données d'environ 1000 relevés de forage sur le canton. Les terrains de mauvaise qualité géotechnique dans le canton comprennent les terrains limono-argileux et argileux du retrait würmien (6d et 6e respectivement dans la classification des sols genevois, GADZ, 1997), ainsi que les argiles et craies lacustres (5e et 5f) et certaines formations interglaciaires limono-argileuses et argileuses lorsque celles-ci se trouvent proches de la surface (8d et 8e). Par souci de simplification ces terrains sont regroupés sous le terme de « terrains argileux ». Les zones argileuses ont ensuite été séparées en 3 catégories selon leur épaisseur : moins de 10 m, de 10 à 20 m et plus de 20 m d'épaisseur.

Les secteurs remblayés, comme les anciennes gravières ou décharges, sont également des terrains inadaptés à servir de fondations et ont aussi été intégrés à la carte. Des pieux sont nécessaires pour la plupart des constructions sur ces terrains. Enfin, les zones en mouvement (glissements) sont également des zones où les éventuels bâtiments doivent être fondés en profondeur sur des terrains stables.

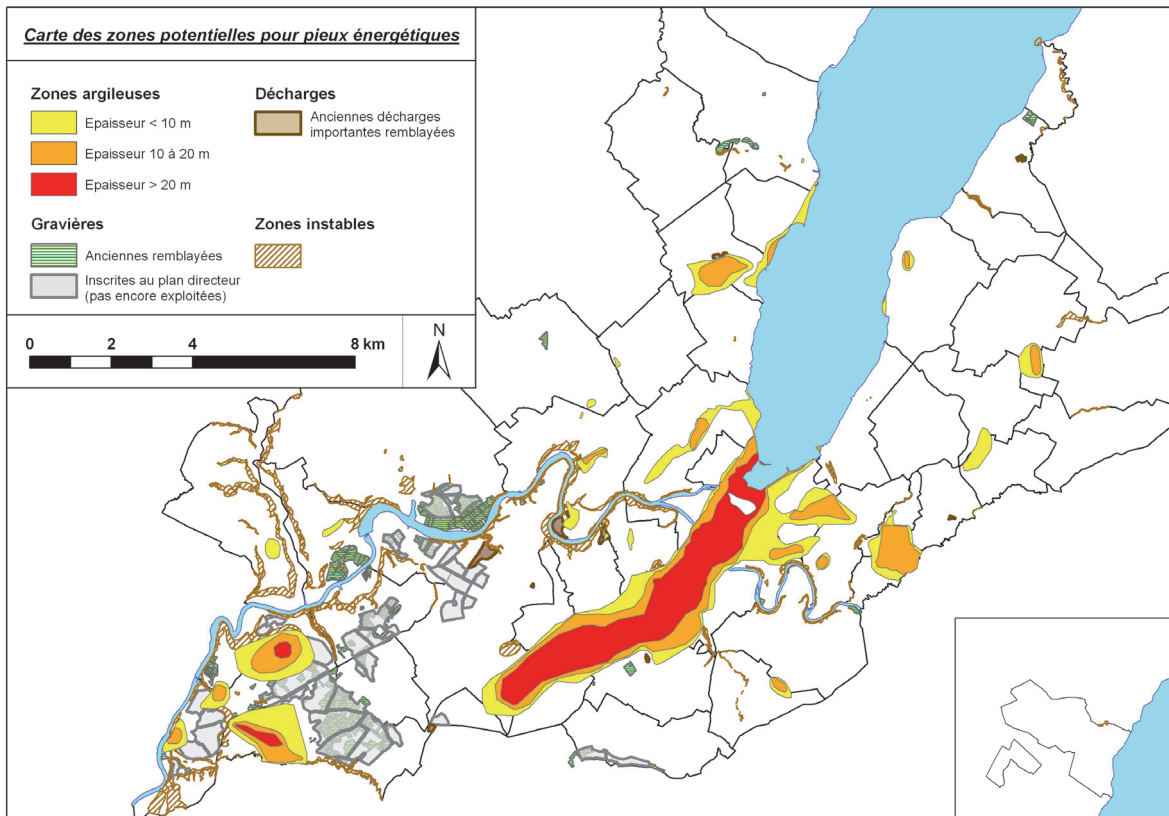


Figure 6-28. Carte des zones potentielles pour pieux énergétiques, incluant les zones argileuses, les gravières, décharges et zones instables (ou zones en mouvement permanent)

On constate que les zones où les épaisseurs d'argiles sont les plus importantes se trouvent dans le sillon molassique qui forme la prolongation du lac. En effet il s'agit d'une partie de l'ancien bassin que recouvrait le lac Léman à la fin de l'époque glaciaire würmienne. Le lac était alors à une altitude plus élevée qu'actuellement, des dépôts morainiques importants obstruant la cluse de Collonges (Fort de l'Ecluse) et le glacier du Rhône occupant encore une partie du bassin lémanique.

6.4.2 Estimation du potentiel énergétique au niveau cantonal

L'estimation générale d'un potentiel cantonal est difficile pour les géostructures. En effet, elles sont liées à des projets et bâtiments particuliers (par exemple tours, aéroport), avec parfois des demandes énergétiques spécifiques (refroidissement important par exemple). De plus, leur dimensionnement dépend de la taille du bâtiment et de la stratigraphie locale.

La méthode utilisée ici consiste à recouper les zones potentielles d'installation de pieux énergétiques avec les zones de développement. Dans un premier temps, on a recensé les zones d'affectation autorisant les bâtiments élevés (habitations et zones industrielles) recoupant les zones potentielles pour pieux énergétiques visibles sur la figure 6-28. Par la suite, des hypothèses réalistes ont été prises en compte pour définir des indices de développement : pourcentage de construction d'ici 2030, proportion de bâtiments équipée en pieux énergétiques (50%), dont la longueur dépendra de l'épaisseur de la couche de terrains à traverser, et les diamètres des pieux et fiches nécessaires en fonction du gabarit maximum du bâtiment.

Le tableau suivant résume les indices d'occupation du sol, le pourcentage estimé de construction, et le pourcentage de ces bâtiments équipés en pieux énergétiques considérés dans le calcul final.

Type de zone	Zones favorables (m ²)	Indice d'occupation du sol (IOS)	Pourcentage construit d'ici 2030	Pourcentage équipé en pieux énergétiques
Construit	4'910'152	0.5	10	50
Développement	4'110'547	0.4	50	50

Les différentes zones d'affectation et leurs caractéristiques considérées sont résumées ci-dessous.

Zones	Type d'aménagement	Type de bâtiment	Gabarit maximum [m]	Diamètre de pieu [mm]
2	Anciens quartiers urbains	Habitation, tertiaire	24	900
3	Urbain avancé	Habitation, tertiaire	21	900
4A	Urbain	Habitation, activités	15	650
ZI	Industriel et artisanal	Activités	21	900
	Divers	Tours	>100	>1000 ou barrettes

La quantité de chaleur et le froid extractible par mètre de pieu dépendent du diamètre de celui-ci et de la conductivité du terrain. Pour simplifier les calculs, les conductivités ont seulement été subdivisées en deux catégories : plus ou moins élevé que 1.9 (W/mK), qui est une conductivité moyenne dans les zones argileuses.

Diamètre du pieu [mm]	Conductivité < 1.9 [W/mK]		Conductivité >1.9 [W/mK]	
	Production de chaleur [kWh/m/an]	Production de froid [kWh/m/an]	Production de chaleur [kWh/m/an]	Production de froid [kWh/m/an]
< 700	50	15	60	15
700 – 1000	60	20	70	20
> 1000 ou barrettes	70	25	80	25

En considérant ces critères et en les confrontant aux données géologiques, ce qui permet de déterminer la longueur des pieux (variable en fonction de la position du soubassement sain), la quantité d'énergie annuelle potentiellement productible sur le canton est la suivante :

Production potentielle de chaleur	30	GWh/an
Production potentielle de froid	9	GWh/an

Même s'il s'agit de valeurs globalement relativement faibles, les chapitres suivants vont montrer qu'il s'agit néanmoins d'une source d'énergie loin d'être négligeable à l'échelle d'un projet donné.

6.4.3 Projets de développement particuliers

Des projets de développement particuliers ont été étudiés plus en détail : projet SOVALP et celui d'une éventuelle tour sur la zone du PAV. Ces deux zones de développement se situent le long du sillon argileux prolongeant le lac (Figure 6-29).

Il est à noter que l'ensemble de la zone du PAV a fait l'objet d'une étude qualitative globale de son potentiel géothermique (BG-Ingénieurs-conseils, 2009) ainsi que d'une estimation de la demande d'énergie à l'horizon 2030 (PAVéne, 2009).

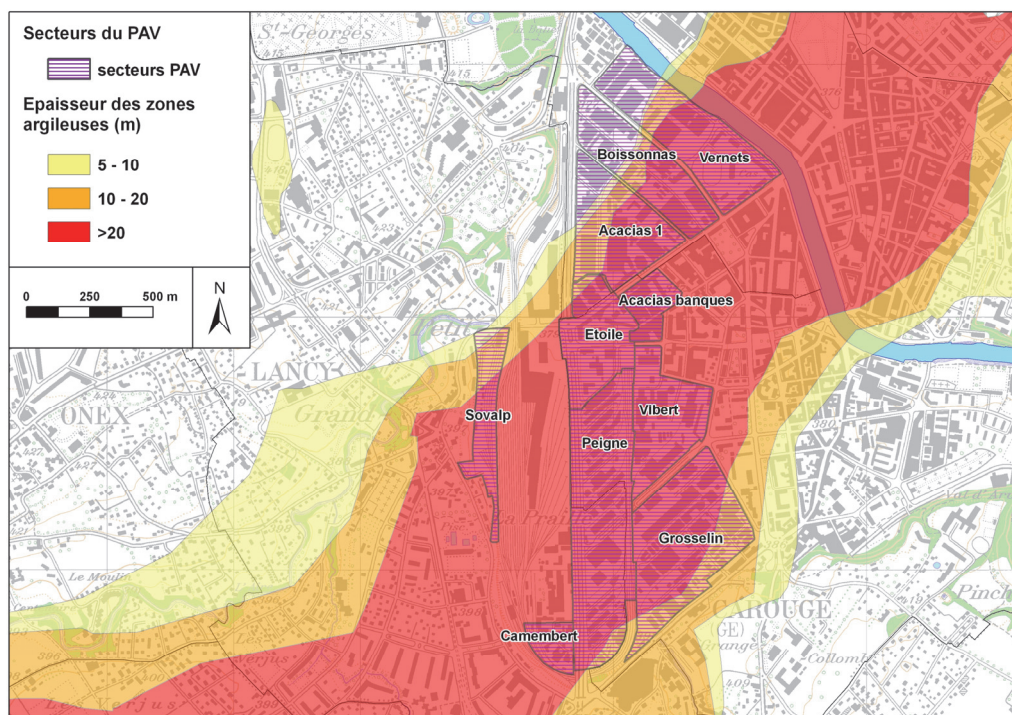


Figure 6-29. Situation des divers secteurs de développement du PAV (y.c. SOVALP) par rapport au sillon argileux.

Le projet SOVALP – Valorisation de terrains CFF à Genève-La Praille

Description du projet

Pour mettre en valeur le périmètre autour de la gare de la Praille, une société simple a été constituée, associant les CFF, propriétaires des terrains, et l'Etat de Genève: la SOVALP (Société simple de valorisation des terrains à Genève La Praille). Cette dernière a mis au point un concept d'urbanisation de ce périmètre.



Figure 6-30. SOVALP – Zone de développement à la Praille – Pont-Rouge

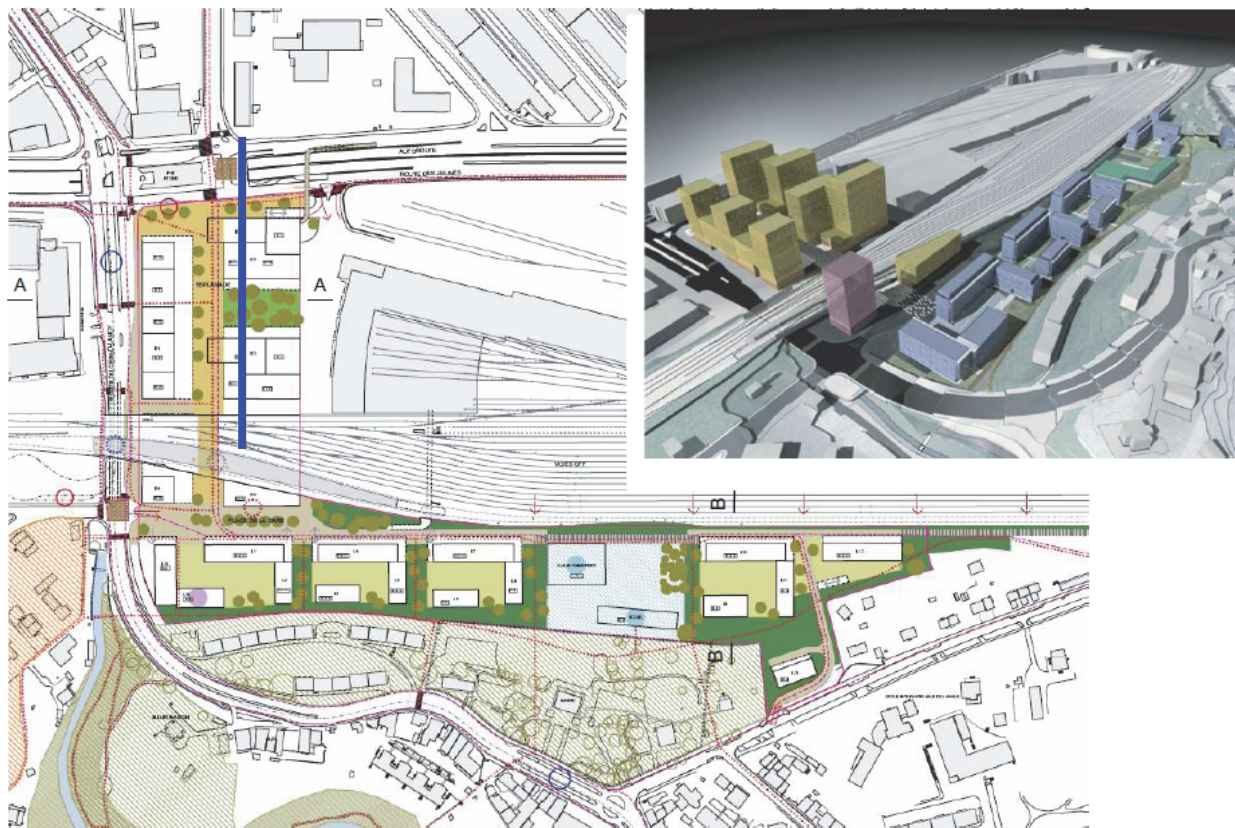
Le projet SOVALP, qui constitue l'un des plus grands projets de la région genevoise, est situé en continuité directe du centre ville de Genève. Le site est desservi par d'importantes infrastructures de transports, notamment par la future liaison ferroviaire CEVA entre Genève et Annemasse, et se trouve en bordure d'un site topographique et végétal marqué, le coteau de Lancy (Figure 6-30 et Figure 6-31). Le projet s'inscrit dans le renouvellement urbain du secteur La Praille – Acacias – Vernets (PAV).

La surface d'environ 97'000 m², libérée par la concentration de l'exploitation ferroviaire de la gare marchandises, est entièrement propriété des CFF et est située sur la commune de Lancy.

Le concept urbanistique retenu (Figure 6-32) se caractérise par un concept d'intégration à l'environnement, soit:

- Un programme d'env. 184'000 m² de surfaces brutes de planchers, dont environ 122'000 m² d'activités, 57'000 m² de logements (env. 550 logements) et 5'000 m² d'équipements publics
- Des espaces publics et des équipements publics diversifiés, développés en fonction des affectations et de leurs situations respectives
- L'identification et la diversification des formes bâties proposées selon les secteurs et leur affectation (secteur d'activités et secteur d'habitation)
- La possibilité de réaliser le projet par étapes, notamment en permettant, dans une phase transitoire, de maintenir le bâtiment de service CFF
- Une prise en compte cohérente et systématique des problématiques et des enjeux environnementaux.

Le programme de 122'000 m² d'activités et d'environ 550 logements, correspond à un coefficient d'utilisation du sol (CUS) de 2. Il se réalisera par étapes en coordination avec le projet CEVA.



— Profil géologique 2 – 2 (Figure 6-34)

Figure 6-31. SOVALP - Plan de situation

La station Lancy – Pont-Rouge et la Place de l’Etoile se trouvent au centre de ce dispositif : c’est là que s’articule la transition entre le secteur destiné aux activités et celui dévolu à l’habitation, entre un secteur entièrement construit et un autre mettant en valeur le coteau de Lancy et sa végétation.

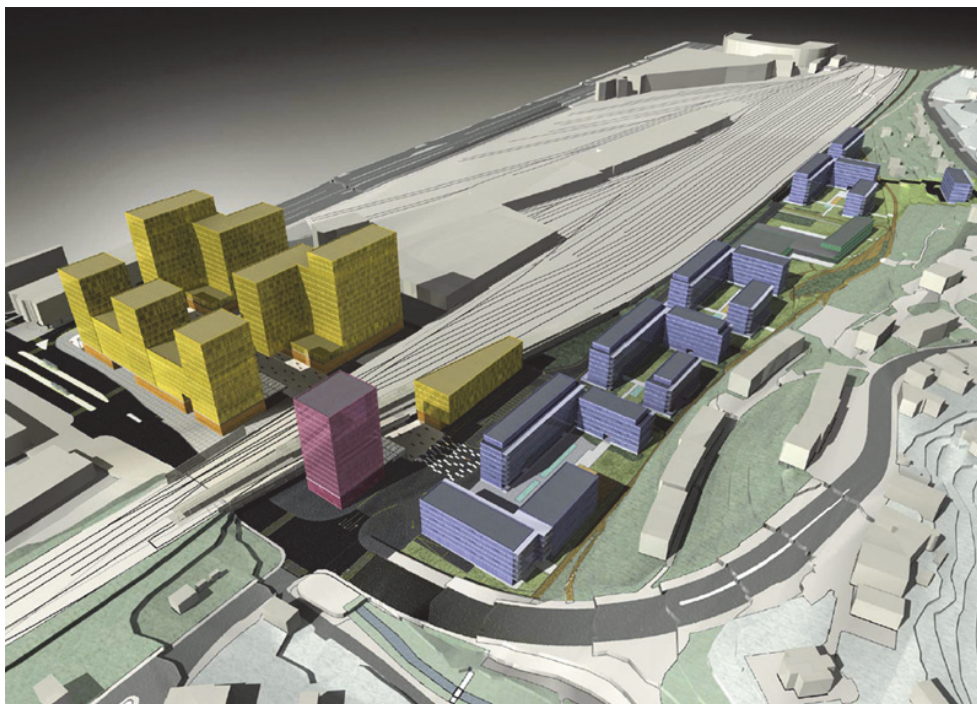


Figure 6-32 . SOVALP – Zones d’affectation.

Jaune et rose : zone activités et hôtels
Bleu : zone habitats et écoles

SECTEURS ACTIVITES COMMERCIALES ET HOTELIERES

Tant par ses affectations que par sa forte densité (immeubles de 7 à 16 étages), le secteur des activités se situe dans le prolongement de la zone des Acacias, actuellement en plein développement.

La création d'environ 119'000 m² de surfaces d'activités représente environ 4'600 places de travail. Le projet propose des affectations complémentaires (restaurants, cafés, commerces, espaces de loisirs, équipements publics ainsi qu'un hôtel) qui, par leur organisation et leur diversité, renforcent l'attractivité et l'animation du lieu.

SECTEUR LOGEMENTS ET ECOLE

Le secteur des logements se trouve le long du coteau de Lancy. Il est rattaché aux infrastructures communales existantes.

Le projet prévoit un total de 57'000 m² de surfaces de plancher correspondant à environ 550 logements.

Les logements sont groupés en entités de plusieurs bâtiments disposés autour de cours semi privées. Les 15 bâtiments (L1 à L15) ont 4 à 6 niveaux sur rez, plus un étage en attique pour 8 d'entre eux. Deux bâtiments disposeront de deux sous-sols, les autres d'un seul.

Le groupe scolaire se situe au milieu de ce quartier de logements, en contrebas de la mairie.

Conditions géologiques et géothermiques

Le site de SOVALP se situe en bordure du large sillon argileux qui prolonge le lac. Ces terrains sont géotechniquement médiocres, et présentent des conductivités thermiques relativement basses (chap. 4). Comme illustré sur la figure 6-33, au fur et à mesure de l'approfondissement du sillon et de l'épaississement des couches argileuses, la conductivité thermique moyenne sur une tranche de 50 m diminue.

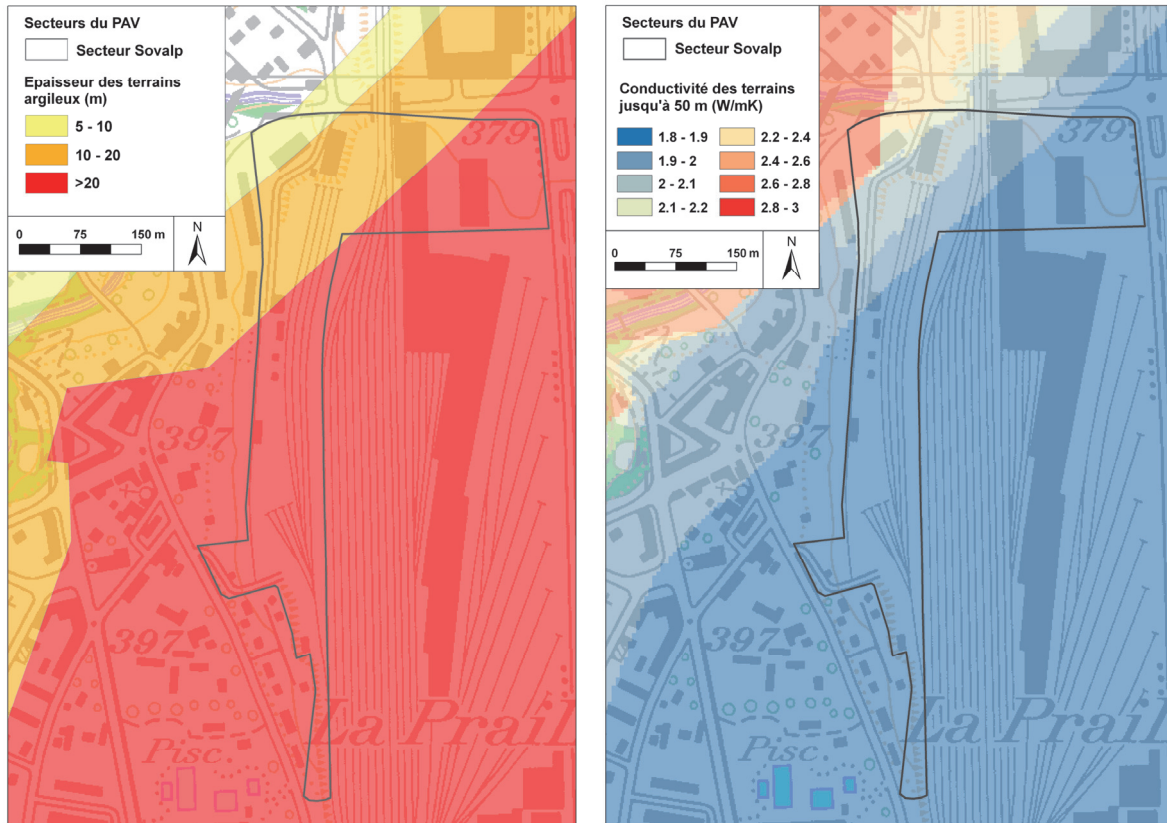


Figure 6-33. SOVALP – Cartes de l'épaisseur des terrains argileux et des conductivités thermiques moyennes jusqu'à 50 m.

Bâtiments, pieux de fondation et potentiel thermique

SECTEUR ACTIVITES COMMERCIALES ET HOTELIERES

Selon le plan de masse de 2008, ce secteur comprendra 5 bâtiments, désignés B1 à B5, dont 1 de près de 50 et 3 de plus de 50 mètres de hauteur au-dessus du niveau 0 (altitude 379,50 m.s.m.), à savoir :

Bâtiments entre la voie centrale et la ligne ferroviaire (3 sous-sols) :

- B1 : 7 à 13 niveaux sur rez, surface construite env. 3'500 m²
- B2 : 12 à 15 niveaux sur rez, surface construite env. 2'300 m²
- B3 : 12 à 15 niveaux sur rez, surface construite env. 2'200 m²

Bâtiments à l'ouest de la voie ferrée (2 sous-sols) :

- B4 : 13 niveaux sur rez, surface construite env. 650 m²
- B5 : 5 niveaux sur rez, surface construite env. 1'050 m²

La situation des bâtiments est visible sur la figure 6-31. L'épaisseur des argiles varie d'un bâtiment à l'autre entre 15 et 40 mètres. Le niveau moyen de la nappe phréatique superficielle (nappe de Carouge - La Praille) s'établit à la cote 375,00 m. Une coupe du sous-sol à travers les bâtiments B2 et B3 est visible sur la figure 6-34 ci-après (profil géologique 2-2, situé sur la figure 6-31).

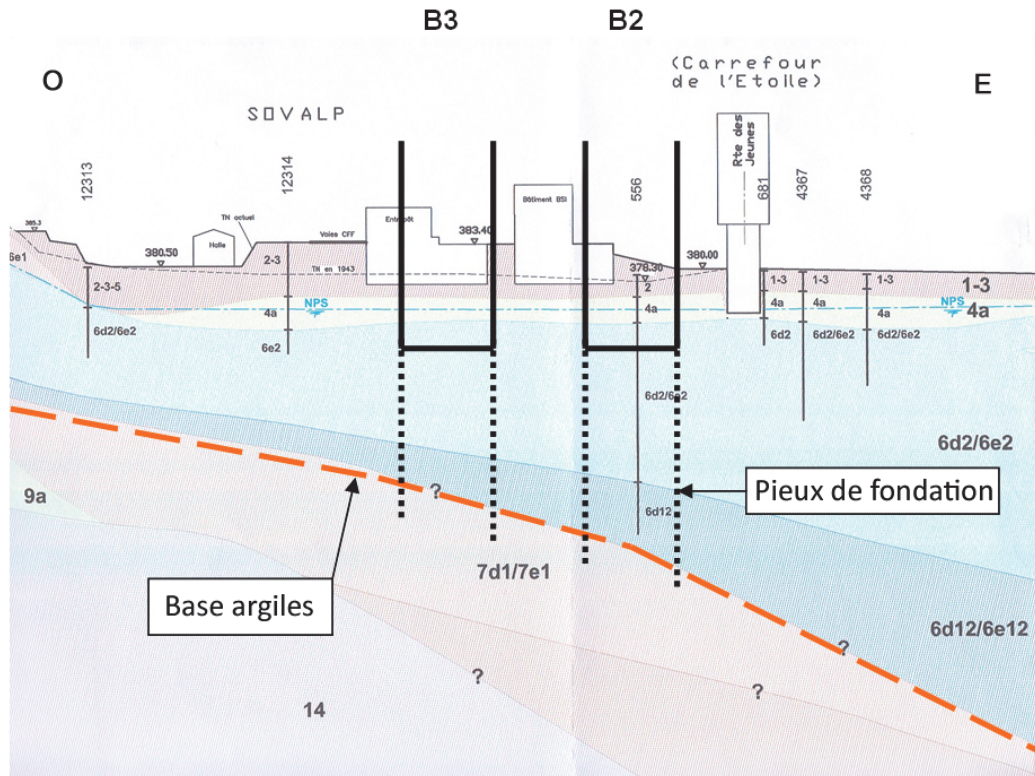


Figure 6-34. SOVALP - Profil géologique 2 - Bâtiments B2-B3 (situation figure 6-31)

Afin de déterminer la disposition et le nombre de pieux de fondation, un modèle structural a été établi pour chaque bâtiment, sur la base des informations à disposition. Par mesure de simplification, un maillage uniforme, variant entre 5 et 6 mètres en fonction des dimensions en plan, a été retenu pour l'ensemble des bâtiments.

La figure 6-35 représente le schéma des structures du bâtiment B1 en élévation-coupe frontale et transversale, cette dernière montrant aussi le bâtiment B2. La position de la couche géologique admise comme porteuse (7d1/7e1, moraine limono-argileuse et argileuse préconsolidée), déterminant la longueur des pieux de fondation sous le radier des parkings, y est également reportée.

Les indications ci-dessus permettent de déterminer le nombre et la longueur des pieux de fondation.

L'estimation du potentiel géothermique et la comparaison avec les besoins énergétiques de chacun des cinq bâtiments ressortent du tableau 6-1.

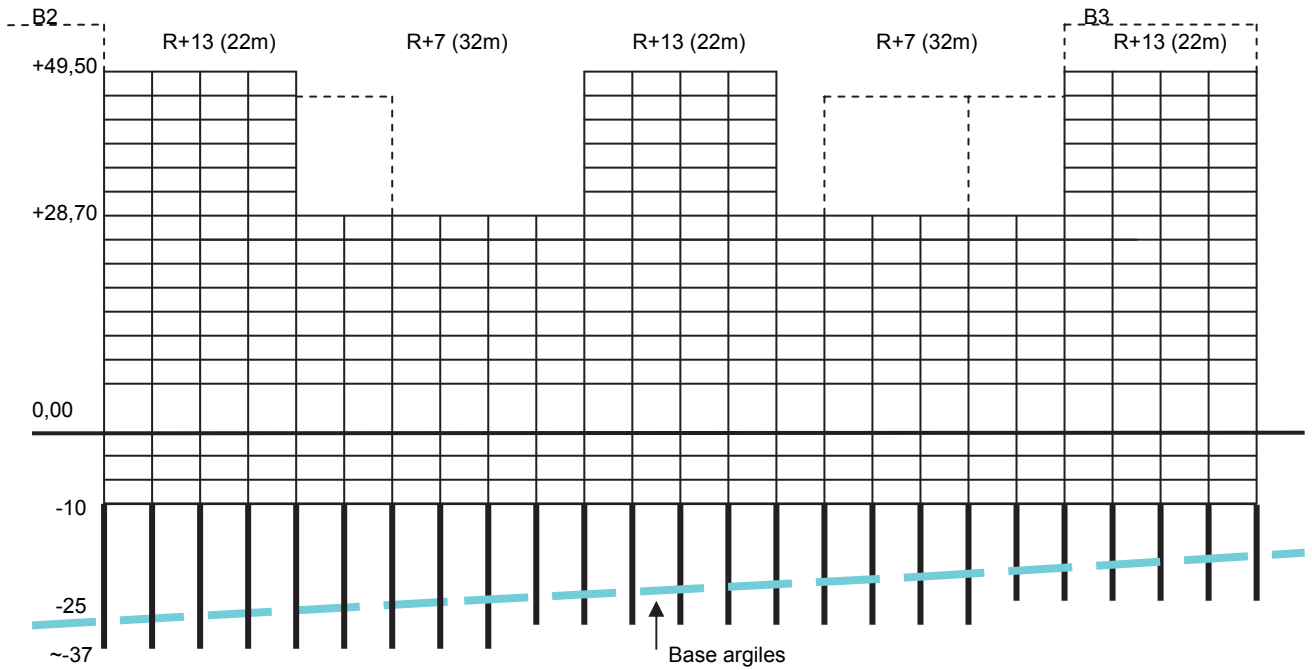
Les cinq premières colonnes concernent le calcul des surfaces des bâtiments. Dans le cas des bâtiments B1 à B3, le rez est considéré comme un espace public non chauffé. La sixième colonne indique les besoins annuels de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude, en admettant que la surface de référence énergétique représente les 90% de la surface brute totale d'un bâtiment et que les besoins spécifiques annuels sont de 30 kWh/m² en moyenne.

On trouve dans les cinq dernières colonnes le nombre de pieux par bâtiment (N), la longueur active moyenne d'un pieu (L, avec fiche de 12 m), la longueur active totale des pieux du bâtiment (L_{tot}), la production annuelle totale de chaleur par les pieux, en MWh (avec 60 kWh/m/an, 70 kWh/m/an pour le bâtiment B1) et la quantité de chaleur produite en pourcent des besoins. Ces paramètres sont des valeurs statistiques pour des pieux de 100 cm de diamètre et tiennent compte d'une conductivité du sous-sol qui dans ce secteur est de l'ordre de 1,6 à 1.8 W/m.K.

Il apparaît que les quantités de chaleur produites annuellement sont de **263, 211, 165 et 71 MWh** pour les bâtiments B1, B2, B3 et B5, respectivement, soit un total de 481 MWh. Le taux de couverture des besoins en chaleur est de 28, 24, 20 et 41 %, soit un **un taux de couverture moyenne de 25 %**. En admettant une valeur de 100 W/m de pieu, les puissances maxima de soutirage sont estimées à 375, 352, 276 et 118 kW. Dans l'état actuel des connaissances, le recours à des pieux ne s'impose pas pour le bâtiment B4.

SOVALP Secteur activités - Bâtiment B1 & B2 – Module structure ~5,0/6,0 – Disposition pieux de fondation – 0,00=379,50 msm

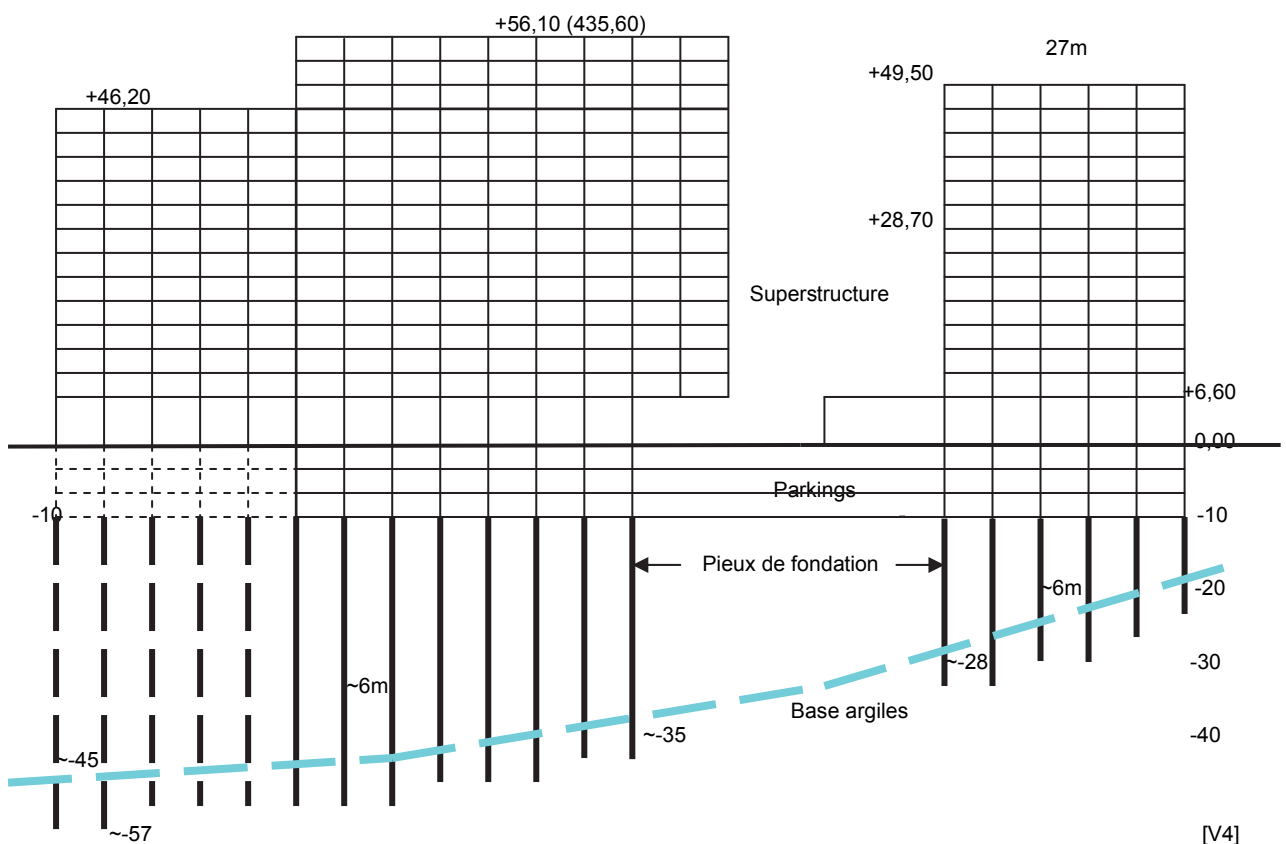
B1 Elévation-coupe E-W



Bâtiment B2 - R+15 / R+12

Elévation/Coupe N-S

Bâtiment B1 - R+13 / R+7



[V4]

Figure 6-35. SOVALP Bâtiments B1 et B2 – Concept des superstructures et des pieux

Tableau 6-1 . SOVALP – Zone activités et hôtels - Bâtiments B1 à B5
Demande de chaleur pour chauffage et eau chaude et production estimée au moyen de pieux énergétiques

Bât.	Et.	Niv.	Sn	St	Dem. chaleur	N	L	Ltot	Chaleur	
No	-	-	m ²	m ²	MW/b par an	-	m	m	MW/b par an	%
B1	1-7 8-13	7 6	3'510 1'782	24'570 <u>10'690</u>	952	150	25	3'750	263*	28
			Total	35'260						
B2	1-16 1-13a 1-13b	16 13 13	1'080 252 96	17'280 3'276 <u>12'480</u>	892	95	37	3'515	211	24
			Total	33'036						
B3	1-16 1-13a 1-13b	16 13 13	960 10 1'080	15'360 1'404 <u>14'040</u>	832	95	29	2'755	165	20
			Total	30'804						
B4	R+13	14	650	9'100	246	radier de fondation				
B5	R+5	6	1'050	6'300	170	47	25	1'175	71	41
									Couverture moyenne	25%

Légende

Bâtiments
 Bât. : numéro de bâtiment
 Et. : étages sur rez ;
 B1, B2 et B3 : 3 sous-sols ; B4 et B5 : 2 sous-sols
 Niv. : nombre de niveaux approvisionnés
 Sn : surface par niveau
 St : surface totale
 Dem. chaleur : demande annuelle de chaleur pour chauffage et ECS (30 kWh/m²/an) ;
 surface de référence énergétique = 0,9 x surface brut totale

Pieux
 N : nombre de pieux par bâtiment
 L : longueur active moyenne d'un pieu
 Ltot : longueur active totale des pieux du bâtiment
 Chaleur MWh par an : production annuelle totale de chaleur
 (avec 60 kWh/m/an ; * 70 kWh/m/an)
 Chaleur % : quantité de chaleur produite en pourcent de la demande

SECTEUR LOGEMENTS

Ce secteur comprendra un total de 15 bâtiments, désignés L1 à L15, disposés le long du coteau de Lancy (voir figure 6-31 et figure 6-32). Il s'agit de bâtiments de 4 à 6 niveaux sur rez, avec attique pour la moitié d'entre eux. Tous disposent d'un sous-sol, sauf deux avec deux sous-sols. Les surfaces au sol s'échelonnent entre 400 et 900 m² (Tableau 6-2).

Du point de vue géologique, tous les bâtiments se trouvent sur le sillon molassique comblé par des argiles situé dans le prolongement du lac, décrit plus haut. L'épaisseur des argiles varie du nord au sud entre 5 et 30 mètres environ. On peut ainsi admettre que les trois bâtiments se trouvant le plus au nord pourront être réalisés sans fondations spéciales. Pour les autres, le recours à des pieux de fondations est envisageable.

Une estimation des quantités de chaleur pouvant être produites par ces pieux équipés en échangeur thermique figure dans le tableau 6-2 ci-après. La démarche est identique à celle retenue pour les bâtiments du secteur activités. Compte tenu des charges moins élevées, on retient des pieux de 80 cm de diamètre, avec comme conséquence une réduction d'environ 10% de leur rendement thermique.

Les quantités de chaleur produites annuellement par les 12 bâtiments L1 à L12 varient de **13 à 49 MWh**, soit un total de 333 MWh. Si l'on fait abstraction du bâtiment L1, le taux de couverture des besoins en chaleur se situe entre 20 et 36%, soit une **moyenne de 26%**. En admettant une valeur de 80 W/m de pieu, les puissances maxima de soutirage estimées varient entre 16 et 72 kW par bâtiment.

Pour les bâtiments signalés en grisé dans le tableau 6-2, la réalisation de pieux reste à confirmer en raison de leur gabarit plus faible, et devra être évaluée lors du projet définitif. Ils ont cependant été inclus dans le calcul géothermique pour procurer une vision d'ensemble des possibilités d'exploitation.

Tableau 6-2 . SOVALP – Zone habitations - Bâtiments L1 à L15

Demande de chaleur pour chauffage et eau chaude et production estimée au moyen de pieux énergétiques

Bât.	Et.	Niv.	Sn	St	Dem. chaleur	Pieux			Chaleur	
						N	L	Ltot		
No	-	-	m ²	m ²	MWh par an	-	m	m	MWh par an	%
L1	R+6+A	8	780	6'240	187	20	10	200	13*	7
L2	R+4+A	6	410	2'450	74	24	10	240	16*	21
L3	R+4+A	6	430	2'580	77	24	15	360	20	26
L4	R+6+4	8	780	6'240	187	39	17	663	36	20
L5	R+5+A	7	410	2'870	86	24	19	456	25	29
L6	R+5	6	430	2'580	77	24	21	504	28	36
L7	R+6+A	8	780	6'240	187	39	23	897	49	26
L8	R+6	7	410	2'870	86	24	23	552	30	35
L9	R+5	6	540	3'240	97	24	17	408	22	23
L10	R+6+A	8	780	6'240	187	39	17	663	36	20
L11	R+6	7	410	2'870	86	24	17	408	22	26
L12	R+6+A	8	780	6'240	187	39	17	663	36	20
L13	R+4	5	540	2'700	81	pas de pieux				
L14	R+6/2ss	7	900	6'300	189	pas de pieux				
L15	R+5/2ss	6	680	4'080	122	pas de pieux				

Moyenne L2 - L12 (11 bâtiments) : 22%

Légende

Bâtiments

Bât. : numéro de bâtiment
 Et. : niveaux sur rez ; nombre de sous-sol (R : rez ; A :attique)
 Niv. : nombre de niveaux approvisionnés
 Sn : surface par niveau
 St : surface totale
 Dem. chaleur : demande annuelle de chaleur (avec 30 kWh/m²/an) ; surface de référence énergétique = 0,9 x surface brut totale

Pieux

N : nombre de pieux par bâtiment
 L : longueur active moyenne d'un pieu
 Ltot : longueur active totale des pieux du bâtiment
 Chaleur MWh par an : production annuelle totale de chaleur (avec 55 kWh/m/an ; * 65 kWh/m/an)
 Chaleur % : quantité de chaleur produite en pourcent de la demande

Les valeurs de potentiel énergétique ainsi déterminées sont à considérer comme des ordres de grandeur et dépendent dans une très large mesure du concept énergétique général toujours très intéressant dans ce genre d'ouvrage, notamment en ce qui concerne la quantité d'énergie de refroidissement. Elles sont cependant suffisantes pour mettre en évidence les potentialités thermiques du sous-sol et permettre aux planificateurs d'en tenir compte lors de l'établissement du concept énergétique des bâtiments.

Il est d'ailleurs à mentionner qu'une étude du concept énergétique futur du projet SOVALP (Amstein et Walthert, 2006) tend à privilégier l'utilisation de la ressource géothermique (sondes et géostructures énergétiques).

Développement Praille-Acacias-Vernets – Bâtiments tours

Introduction

La Master plan PAV de 2007 envisage la construction d'une série de bâtiments de 70 à 175 mètres de haut dans les secteurs Etoile et Camembert (Figure 6-36). En raison de la nature du sous-sol, de tels édifices pourraient être supportés par des pieux équipés en échangeur de chaleur. Sans préjuger des aspects liés à la protection des eaux souterraines ou à d'autres sujétions, il a été jugé opportun d'examiner dans le cadre de la présente étude l'apport énergétique escompté de ces fondations, à l'image de récentes réalisations à Francfort sur le Main en Allemagne.



Figure 6-36 . PAV Maquette des tours dans le secteur Etoile (Master plan 2007)

Bâtiments tours sur pieux énergétiques à Francfort sur le Main en Allemagne

Le sous-sol de la ville de Francfort est constitué par des dépôts fluviaux de faible portance, imposant le recours à des fondations spéciales pour les immeubles de grande taille.

Le sol est constitué d'une alternance de couches d'argiles et de sables à hydrobies, avec intercalation de bancs de calcaire et de dolomie. Les sols de bonne portance se trouvent à des profondeurs variant entre 40 et 55 mètres. La présence d'une nappe phréatique, dont le niveau oscille entre trois et six mètres sous le niveau du sol, rend les travaux de fondation particulièrement difficiles. Les températures du sous-sol, relativement élevées, atteignent 15 à 19 degrés Celsius, selon la profondeur. Les conditions hydrogéologiques, caractérisées par une faible vitesse d'écoulement des eaux souterraines, sont propices au recours à des pieux énergétiques pour le stockage temporaire ou saisonnier de la chaleur.

Ainsi, au vu du développement de la technique des géostructures énergétiques, une série de tours construites dans le centre ville au cours de la dernière décennie se sont vu dotées d'échangeurs géothermiques incorporés dans les pieux de fondation (tours Galileo, Main Tower, IG Metall, Dresdner Bank). Il s'agit de pieux moulés, de 130 à 150 cm de diamètre, d'une longueur atteignant 35 mètres. Les principales tours construites à ce jour sont visibles sur la figure 6-37 (voir aussi le point 6.3.6).



Figure 6-37. Bâtiments tours sur pieux énergétiques dans le centre de Francfort sur le Main, en Allemagne

Les échangeurs fournissent une bonne partie de l'énergie nécessaire au chauffage et au refroidissement des bâtiments. Les expériences tirées de ces réalisations ont mis en évidence leur intérêt énergétique, mais aussi les difficultés d'ordre constructif et d'exécution (Von der Hude 2007 et 2010). En particulier, la disposition des tubes échangeurs à l'intérieur des pieux et celle des tuyaux de liaison entre les pieux et la centrale de chauffe ont fait l'objet de variantes permettant d'optimiser le rapport coût/énergie au fur et à mesure du développement des projets (Figure 6-38).



Figure 6-38. Tour Galileo à Francfort. Mise en place de la cage d'armature d'un pieu de fondation. Les tubes échangeurs sont visibles à l'intérieur de la cage

Depuis 2008, une autre tour, fondée sur pieux énergétiques, est en cours de réalisation à environ 3 km du centre ville. Il s'agit du nouveau siège de la Banque Centrale Européenne (BCE), constitué par un nouvel édifice de 187 mètres de haut et une ancienne halle transformée en bâtiment administratif. La figure 6-39 montre le site en bordure de la rivière Mainz avec la reproduction des bâtiments projetés.



Figure 6-39 . Le site du futur siège de la Banque Centrale Européenne à Francfort sur le Main.

La situation du site par rapport au centre ville avec ses tours est visible sur la figure 6-40. La zone de construction de la BCE se trouve un peu plus près de la rivière que celle du centre ville.



Figure 6-40 . Vue aérienne du site du futur siège de la Banque Centrale Européenne avec, à l'arrière plan, le centre ville de Francfort sur le Main et ses tours, en partie sur pieux énergétiques.

Le bâtiment principal est constitué de deux tours, reliées entre elles par un atrium. La tour nord comporte 45 étages et atteint une hauteur maximale de 185 m. La tour sud, avec 43 étages, s'élève à 165 m. La surface par étage de chaque tour varie entre 700 et 1'200 m². La surface totale construite représente environ 110'000 m².



Figure 6-41 . Les bâtiments du futur siège de la Banque Centrale Européenne à Francfort sur le Main (photomontage).

Les tours reposent sur un radier général, soutenu par 97 pieux de fondation, forés jusqu'à une profondeur de 37 mètres (Figure 6-42). Les pieux ont été équipés en échangeurs de chaleur souterraine. La mise en valeur de la capacité thermique du sous-sol comme stockage temporaire de la chaleur pour le chauffage et le refroidissement des locaux permet également de réduire les coûts énergétiques du système.

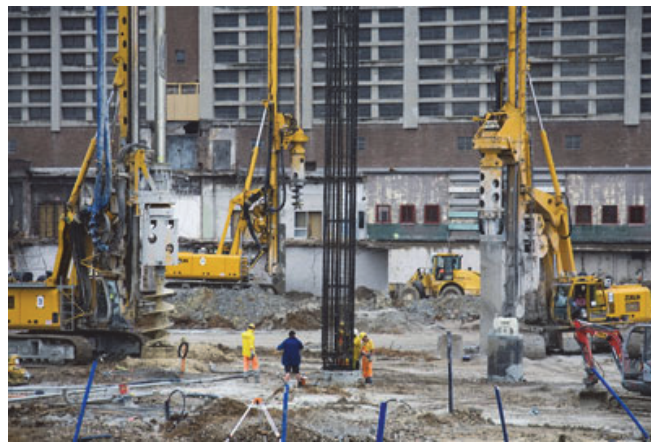


Figure 6-42. Futur siège de la Banque Centrale Européenne à Francfort sur le Main. Exécution des pieux forés.

Bâtiment tour dans le secteur Etoile du PAV

La figure 6-43 montre la disposition possible d'une construction de 175 mètres de haut hors sol à proximité de la route des Jeunes et de la route des Acacias. Le concept structural esquissé suggère une tour de 160 mètres reposant sur un socle semi enterré d'une trentaine de mètres de haut.

Les conditions du sous-sol dans cette zone imposent des mesures spéciales pour les fondations d'une telle construction. Dans le cas de pieux de fondation, en admettant que ceux-ci s'appuient sur la moraine (phases limono-argileuse et argileuses préconsolidées, 7d1/7e1), à une profondeur de l'ordre de 70 mètres, leur longueur moyenne serait d'environ 65 mètres en dessous du radier du socle. Le niveau moyen de la nappe superficielle de Carouge - La Praille se trouve à 375 m.s.m. Dans ces conditions, il devient plus intéressant d'utiliser des barrettes (c'est-à-dire des sections de parois moulées), qui ont une portance plus importante que celle d'un pieu, plutôt que d'augmenter démesurément la taille de ceux-ci. La section de ces barrettes est bien plus élevée que les diamètres de pieux (équivalent à un pieu d'un diamètre de 2.8 m), et elles devraient permettre de soutirer au moins autant d'énergie que des pieux de grand diamètre. Pour les calculs nous avons considéré un espacement de 7 m, et une fiche de 12 m dans les terrains morainiques.

Ces éléments, ainsi que les hypothèses énumérées ci-après permettent d'estimer le potentiel énergétique des pieux, comme suit :

DONNEES ET HYPOTHESES DE BASE

Emplacement de la tour	:	à environ 100 mètres de la route des Jeunes
Niveau du terrain	:	380,00 m.s.m
Gabarit de la tour	:	selon esquisse de la figure 6-43
Conditions du sous-sol	:	étude géotechnique PAV - GADZ 2010 - 2011
Caractéristiques thermiques du sous-sol		
- Conductivité	:	1,8 W/mK
- Capacité thermique	:	2'700 kJ/m ³ .K
Pieux de fondation (selon figure 6-36)		
- Niveau tête des barrettes	:	-15 m
- Niveau couche porteuse	:	entre - 65 et - 70 mètres
- Nombre de barrettes	:	50
- Section des barrettes	:	2,8 m x 1.0 m
- Longueur des barrettes	:	entre 60 et 70 mètres

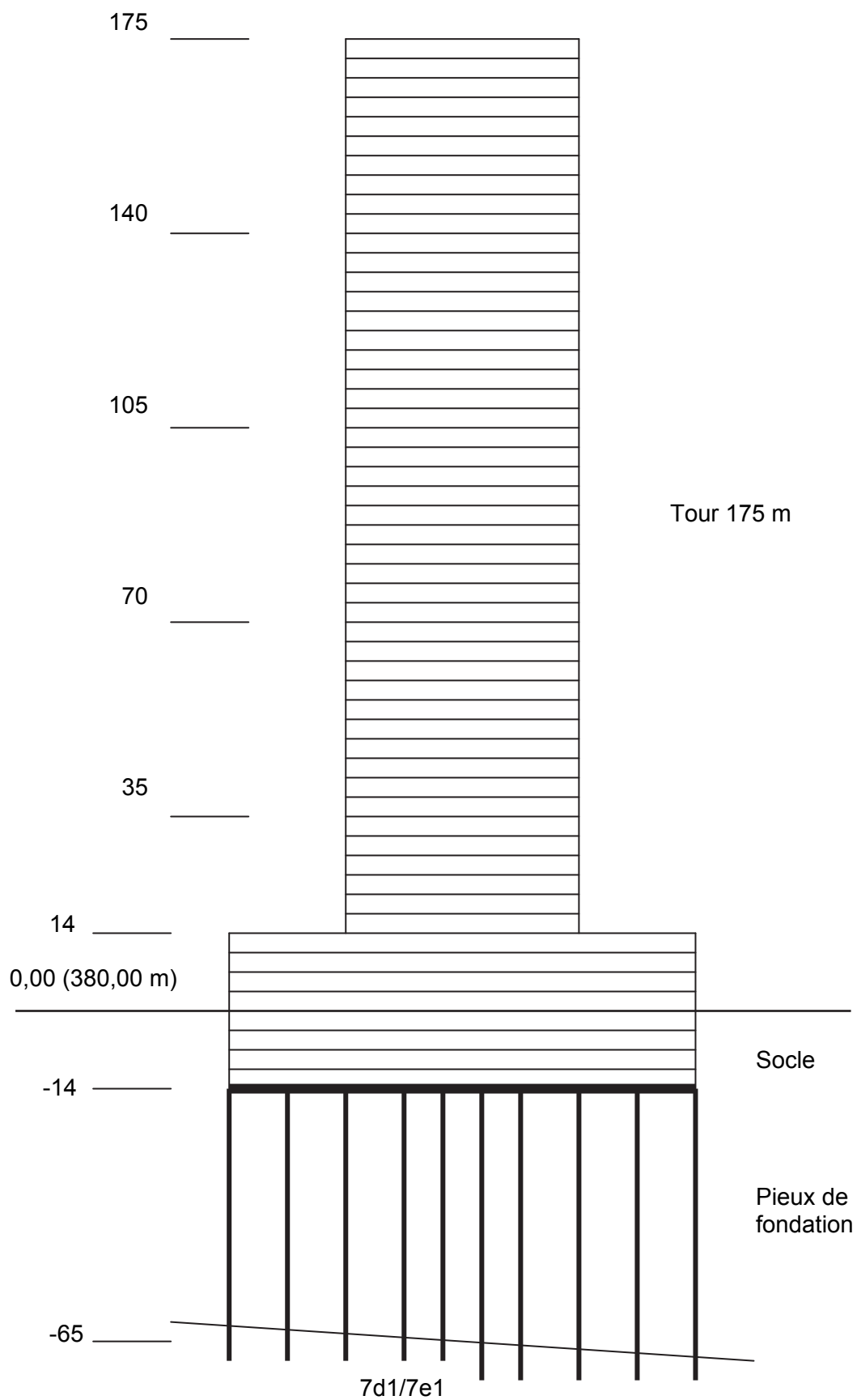


Figure 6-43 . PAV Secteur Etoile – Esquisse structurale d’un bâtiment tour de 175 m sur barrettes de fondation.

QUANTITES ANNUELLES DE CHALEUR ET DE FROID ESTIMEES

- Longueur moyenne active des barrettes	:	65 m
- Longueur totale active	:	3'250 mètres
- Quantité annuelle de chaleur délivrée par mètre de barrette	:	100 kWh/m/a
- Quantité totale de chaleur par an	:	325'000 kWh/a
- Quantité annuelle de froid délivrée par mètre de barrette	:	25 kWh/m/a
- Quantité totale de froid par an	:	81'250 kWh/a

En admettant une surface de référence énergétique de 80'000 m² et un taux annuel spécifique de 30 kWh/m² pour le chauffage et la production d'eau chaude, les besoins annuels de chaleur de l'édifice se montent à 2'400'000 kWh. Dans ces hypothèses, soit un mètre de barrette permettant de chauffer 2,33 m² de surface chauffée, le taux de couverture de chaleur par les barrettes énergétiques est de l'ordre de 14% des besoins du bâtiment. Ce pourcentage pourrait être sensiblement amélioré lors de l'établissement du concept énergétique, en optimisant l'approvisionnement par l'ensemble des sources énergétiques et en tirant profit de la capacité de transfert de chaleur du stock souterrain, pour la valorisation des surplus de chaleur ou de froid disponibles pendant les périodes de faible consommation.

En tout état de cause, les quantités d'énergies annuelles évaluées, soit environ **325 MWh** pour la production de chaleur et **81 MWh** pour la production de froid, représentent des ordres de grandeur justifiant la prise en compte des pieux géothermiques lors de l'établissement du concept énergétique des bâtiments tours du secteur Etoile. Il en est de même pour le secteur Camembert, où il faudra néanmoins compter avec les aléas liés à la présence de la nappe souterraine protégée du Genevois.

Pour les édifices moins élevés, le taux de couverture serait plus important car la taille des pieux et le volume du sous-sol activé thermiquement ne diminuent pas en proportion de la hauteur du bâtiment.

Autres projets de développement

La démarche ci-dessus peut s'appliquer par analogie pour déterminer le potentiel des géostructures énergétiques d'autres projets de développement, pour autant que la disposition et les principales caractéristiques des constructions projetées soient connues au niveau d'un PLQ ou d'un plan de masse. Ces évaluations qui, outre les calculs du potentiel proprement dit, demandent un important travail de récolte et de mise en forme des données, dépassent le cadre de la présente étude.

Voici une liste de quelques projets identifiés d'ores et déjà comme étant susceptibles de présenter un intérêt, sous certaines conditions, pour l'utilisation de la géothermie par des géostructures.

1. La Chapelle – Les Sciez, Lancy / Plan-les-Ouates
2. Gare de Chêne-Bourg, CEVA-SOVACB
3. Gare des Eaux-Vives, CEVA, Genève
4. Secteurs PAV
5. Grange-Collomb, Carouge
6. ZIPLO Extensions
7. Les Cherpines, Plan-les-Ouates

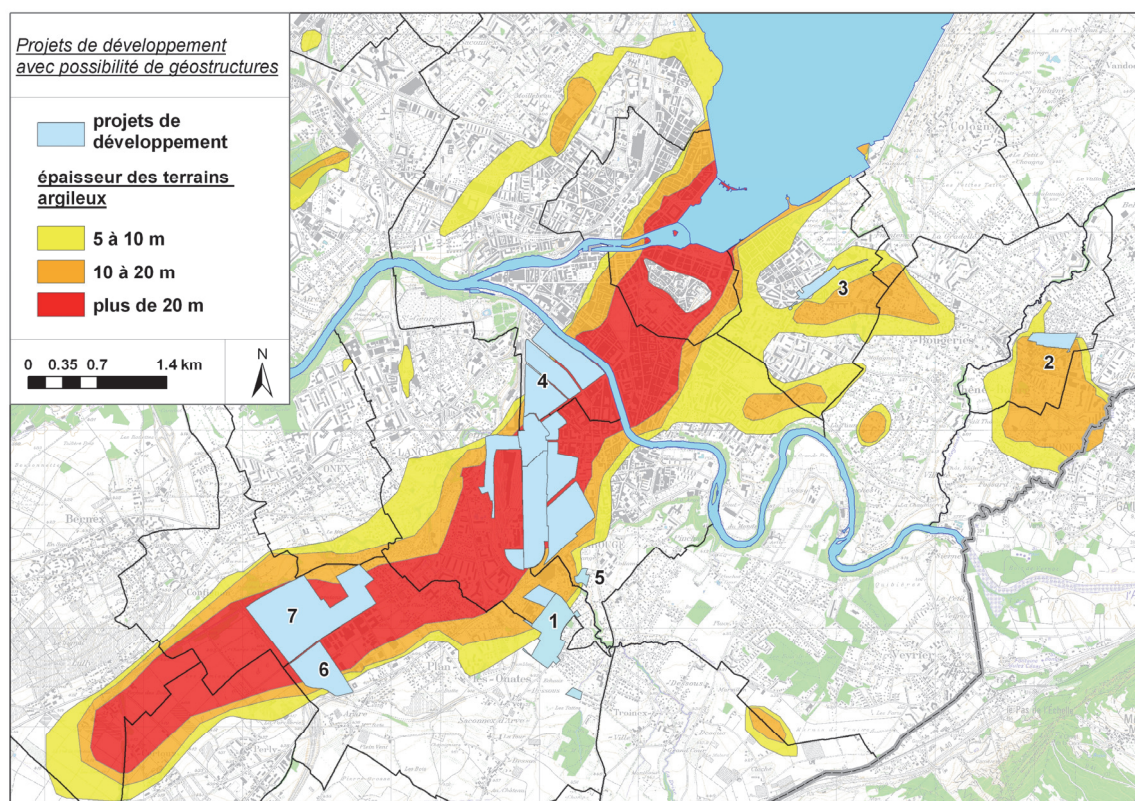


Figure 6-44. Projets de développement importants pouvant nécessiter des géostructures: 1) La Chapelle - les Sciez 2) Gare de Chêne-Bourg 3) Gare des Eaux-Vives 4) Secteurs PAV 5) Grange-Collomb 6) extension ZIPLO 7) Les Cherpines

Il est recommandé de procéder, dans une étape d'investigation ultérieure, à l'évaluation de ces projets, ainsi qu'à celle des autres projets situés dans les zones potentielles identifiés dans la présente étude.

On estime qu'il existe à l'heure actuelle plusieurs dizaines de projets entrant dans cette catégorie.

6.4.4 Tunnels et tranchées couvertes

Les projets de tunnels ayant la date de réalisation la plus proche sont ceux du CEVA (Cornavin - Eaux-Vives – Annemasse). Ce projet de ligne ferroviaire vise à répondre à un besoin grandissant de déplacement dans l'agglomération genevoise. Il s'agit d'une ligne de train d'une longueur d'environ 16 km et dont le tracé est majoritairement souterrain (Figure 6-45).

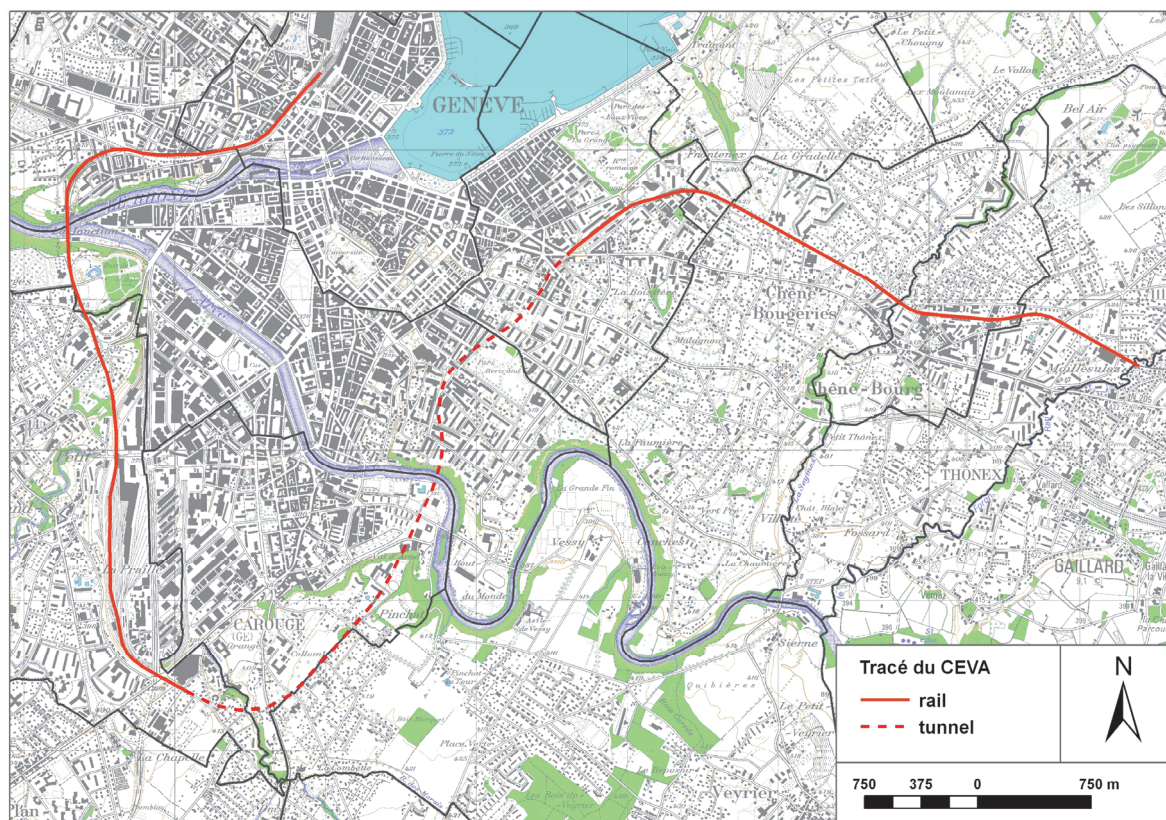


Figure 6-45. Tracé de la liaison ferroviaire Cornavin - Eaux-Vives - Annemasse sur le territoire genevois

Une étude préliminaire a déterminé que les structures les plus intéressantes pour les installations d'échangeurs thermiques sont les tronçons de tranchées couvertes plutôt que les parties en tunnel à proprement parler. Les installations peuvent alors se faire dans les parois moulées latérales et dans le radier en béton (Geowatt, 2008). Pour certains ouvrages du CEVA, la mise en place de telles installations est pratiquement acquise (station du Bachet de Pesay) ou au stade d'étude avancée (tranchée couverte du Val d'Arve).

De telles installations existent déjà dans le métro de Vienne (chapitre 6.3.7) et sont en projet à Stuttgart.

Il est difficile d'estimer quantitativement le potentiel d'une telle installation, car très peu d'exemples existent à ce jour, et ils comportent tous des différences importantes. Les modélisations réalisées par le bureau Geowatt montrent qu'il serait possible de soutirer un maximum annuel de 800 MWh de chaleur et autant de froid sur 100 m de tunnel.

D'autres projets de tunnels liés à des liaisons routières et autoroutières pour soulager le trafic dans l'agglomération et la périphérie de Genève sont actuellement en discussion : l'un est le contournement Est de Genève, et l'autre la tranchée couverte (tunnel) des Nations. Ces ouvrages auraient également la possibilité d'être équipés de géostructures énergétiques mais leur stade d'étude n'est pas encore assez avancé pour estimer un potentiel.

6.5 Conclusions et recommandations

Les géostructures énergétiques mettent à contribution les ouvrages de fondation et de soutènement nécessaires pour la stabilité de certains bâtiments, et particulièrement les pieux, en les utilisant comme échangeurs de chaleur. Sur le même principe que les sondes géothermiques verticales (fluide caloporteur circulant dans des tuyaux), il est possible d'extraire du froid et/ou de la chaleur du sous-sol.

Dans ces systèmes, les géostructures servent tout d'abord à fonder un bâtiment sur des terrains de bonne qualité, et seulement ensuite à l'exploitation géothermique. Elles ne sont donc en général pas dimensionnées de façon à couvrir tous les besoins en chaud ou en froid d'un bâtiment. Le concept énergétique d'un bâtiment utilisant un tel système doit donc être étudié avec soin, suffisamment tôt lors de la conception du projet.

A Genève, plusieurs secteurs se prêtent à l'utilisation de cette source d'énergie comme le long de l'important sillon molassique qui prolonge le lac, rempli de terrains argileux. Au droit de ce sillon, la zone de développement du PAV (Praille - Acacias – Vernets), sur laquelle des constructions de grande taille sont prévues serait très propice à des géostructures, et en particulier la zone de SOVALP.

D'autres secteurs sont aussi concernés, comme les zones remblayées (anciennes gravières et décharges), les zones de glissement ou certains secteurs géologiques particuliers (épaississements locaux de couches géotechniquement défavorables). Le seul projet connu à Genève est d'ailleurs réalisé sur une de ces zones particulières.

Une estimation de l'énergie disponible sur l'ensemble du canton à l'horizon 2030 donne un chiffre de 30 GWh/an de production potentielle de chaleur et de 9 GWh/an de production de froid en admettant un taux de mise en œuvre des géostructures énergétiques de 15% dans les zones favorables et constructibles.

Si ce potentiel global est relativement faible à l'échelle du canton, les calculs estimatifs réalisés pour un projet de tour au PAV et pour une série de bâtiment à SOVALP montrent cependant un taux de couverture des besoins en chaleur situé entre 10 et 30 % pour un projet spécifique. Les systèmes existants ailleurs en Suisse et à l'étranger montrent d'ailleurs en moyenne un taux de couverture de l'ordre de 30%. Les coûts d'investissement sont par ailleurs rapidement amortis compte tenu des faibles coûts de fonctionnement.

Des applications sont également possibles dans les structures linéaires telles que les parois moulées ainsi que dans les tunnels. A Genève, des projets avancés sont sur le point d'aboutir sur le projet CEVA.

La présente étude a été menée au niveau d'une première évaluation du potentiel lié à ces techniques. Les zones favorables ayant été définies et les techniques étant connues, même si elles sont amenées à s'améliorer encore, rien ne s'oppose à une prise en compte systématique, au moins au niveau des études, de cette source d'énergie dans les projets où des géostructures sont prévues pour des raisons géotechniques.

Dans cette perspective, les actions suivantes sont proposées :

1. Diffuser les conclusions de la présente étude, notamment à travers le système d'information du territoire (SITG).
2. Promouvoir ce type de projet auprès des professionnels et des promoteurs.
3. Etablir une réglementation en faveur des géostructures énergétiques.
4. Poursuivre les évaluations dans les zones potentielles identifiées dans la présente étude.
5. Coordonner les études et projets utilisant la géothermie, notamment les géostructures énergétiques, et diffuser les informations de base (cadastre des installations) pour éviter tout problème d'influence mutuelle entre projets voisins.
6. Inclure le développement des géostructures dans la conception cantonale de l'énergie et dans le plan directeur de l'énergie comprenant les mesures décrites ci-dessus.

6.6 Bibliographie

Adam, D., Markiewicz, 2009: *Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers*. Géotechnique 59, pp 229-36.

Amstein+Walthert, 2006 : *Concept énergétique du projet de valorisation foncière des terrains de la Praille propriété des CFF (SOVALP)*. Décembre 2006

Anstett, M., 2001 : *Pieux énergétiques du centre scolaire de Fully* ; Comptes-rendus de la 12^{ème} journée technique et d'information de la SSG, 20 avril 2001, Berne.

Bassetti, S., Rohner, E., Rybach, L. & Sellami S., 2004 : *Erfolgskontrolle und Wirtschaftlichkeitsanalyse von Messkampagnen zu P&D Anlagen*. Projet OFEN No 100'275. Geowatt Zurich: 34 pp.

BG Ingénieurs-conseils SA, 2009 : *Evaluation du potentiel lié aux énergies renouvelables sur le périmètre du projet Praille-Acacias-Vernets (PAV). Etude énergétique et économique du potentiel géothermique. Première partie : Note d'accompagnement des cartes de prélocalisation des technologies*. Genève, 10 mars 2009.

BG Ingénieurs-conseils SA, 2009 : *Evaluation du potentiel lié aux énergies renouvelables sur le périmètre du projet Praille-Acacias-Vernets (PAV). Etude énergétique et économique du potentiel géothermique. Deuxième partie : Etude de localisation possibles des technologies et évaluation de leur potentiel énergétique théorique*. Genève, 14 juillet 2009.

Boënnec, O., 2009. *Piling on the energy*. Geodrilling International, March 2009.

Bonvin, M. & Cordonier, P., 2001 : *Centre scolaire de Fully. Pieux énergétiques avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure*. Rapport OFEN.

Borel, J-P., 2009 : *Centre de logistique Aldi – Chauffage-rafraîchissement géothermique avec 378 pieux énergétiques*. Bulletin Géothermie.CH, no 47, pp. 19-21.

Charollais J., Plancherel R., Monjuvent G, Debelmas J., 1998. *Carte géologique de la France et carte géologique spéciale de la Suisse* : Annemasse.

CREGE, 2008 : *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel - PGN*. Etude pour la Fondation Pro Techno Neuchâtel, 2 vol. : 206 & 88 pp.

CREGE, 2010 : *Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel - PDGN*. Etude pour le canton de Neuchâtel, 2 vol. : 263 & 131 pp.

Fromentin, A., Pahud, D., Jaquier, C. & Morath M., 1997 : *Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs ; Rapport final*, Programme de recherche : géothermie, Office fédéral de l'Energie (OFEN), Lausanne.

GADZ, 1997, révisé 2009 : *Sols Genevois ; Etude statistique des sols de la cuvette genevoise ; rapport de synthèse*. Géotechnique appliquée Dériaz S.A., Carouge, Genève

GADZ, 2008 : *Liaison ferroviaire CEVA. Evaluation des géostructures énergétiques*. Géotechnique appliquée Dériaz SA, Genève

GADZ, 2011 : *Projet Praille Acacias Vernets (PAV) – Secteur Etoile. Sondages et étude géotechnique*. Géotechnique appliquée Dériaz SA, Genève.

GEOWATT AG, 2008 : *Liaison ferroviaire CEVA : potentiel géothermique. Quantification de l'énergie apportée par des géostructures énergétiques*. Rapport final. Zurich, Nov. 2008.

- Haka Gerodur, 2009: *Nouvelle halle logistique du comité international de la Croix-Rouge - CICR à Satigny*. Reportage de chantier, 14 septembre 2009 (site internet www.hakagerodur.ch).
- Hofinger H., Markiewicz R., 2005. *Running hot and cold in Vienna*, Tunnels and Tunnelling International, February 2005.
- Hubbuch M., 2001: *Dock Midfield, Zürich Flughafen, Planung und Ausführung der Energiepfähle* ; 12. Journées techniques de la SSG, Berne, 20 avril 2001
- Joliquin P., 2002 : *Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques. Méthodologie de détermination des zones potentielles*. Diplôme d'études postgrades en géologie de l'ingénieur et de l'environnement. GEOLEP, Lausanne.
- Laloui, L., Nuth, M. & Vuillet, L., 2006 : *Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile*. Int. J. Nimer. Anal, Meth. Geomech., 2006; 763-781.
- Morath, M., 2005 : *Erweiterung Dividella AG, Grabs - Energiepfahlanlage*. Projet OFEN No 46'914. Rapport final, 36 pp.
- Nicholson, D., 2010 : *Efficient design of piled foundations for low-rise housing*. Drilling International.
- OFEN, 2004 : *Chauffage et climatisation de l'école primaire de Fully*. Office fédéral de l'Energie (OFEN), Berne.
- OFEN, 2006 : *L'utilisation de la chaleur terrestre. Aperçus, technologies, visions*. Office fédéral de l'Energie, Berne.
- OFEV, 2009 : *Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol. Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie*. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Pahud D., 2001 : *Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs* ; 12^{ème} journée technique et d'information de la SSG, 20 avril 2001, Berne.
- Pahud D. Fromentin A. & Hubbuch M., 2001 : *Système de chauffage et de refroidissement avec pieux échangeurs, L'aéroport de Zurich – exemple d'approvisionnement en énergie axé sur l'avenir* ; Bulletin ASE/AES 7/01, Fehraltorf.
- Pahud D, 2005. *Energie géothermique – systèmes à basse enthalpie*, cours de la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.
- Pahud D., 2007. *PILESIM2, outil de simulation pour des systèmes de chauffage ou de refroidissement avec des pieux énergétiques ou des sondes géothermiques*, User Manual, traduit par GADZ (2008), 51 pp.
- Pahud D. & Hubbuch M., 2007 : *Mesures et optimisation de l'installation avec pieux énergétiques du Dock Midfield de l'aéroport de Zurich*. Projet OFEN No 37'373. Rapport final. SUPSI, Canobbio, 93 pp.
- PAVéne, 2009 (Groupe de planification énergétique Praille-Acacias-Vernets) : *Demande d'énergie et courbes de charge de Praille-Acacias-Vernets - Situation en 2008 et à l'horizon 2030*. EPFL ENAC, Réf. EPFL-BPE 436.114a.
- Rybach, L., Pahud, D., & Wilhelm, J., 2006 : *Energetische Geostrukturen. Die neue SIA Dokumentation D 0190*. Géothermie CH, No 40 : pp. 12-13.
- Schneider, M., Vermeer, P., 2007 : *Geothermie im Tunnelbau – Stand der Technik und Entwicklungen*. Symposium HfT, Stuttgart, 19 Oktober 2007
- Schroeder J.-W., 1958. *Géologie du pays de Genève. Le Globe*, Mémoires de la Société de géographie de Genève (Publication du Centenaire). Tome 97, 277pp.
- SIA, 1988 : *Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température, Documentation D 025* ; Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich, 91 pp.

SIA, 2005 : *Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance*. Documentation D 0190, Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 99 pp.

SSG, 2007 : *Géostructures énergétiques. Fiche technique*. Société Suisse pour la Géothermie (SSG) : 2 pp.

Von der Hude, N., & Kapp, C., 2001 : *Energiepfähle für Hochhäuser in Frankfurt am Main – Ausführungsbeispiele – aus der Sicht einer Spezialtiefbaufirma* ; 12. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie, 20. April 2001, Bern.

Von der Hude, N., & Völkner, R., 2004. *Erdwärmennutzung und Ausführung auf einer U-Bahnbaustelle in Wien*, in: bbr - Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau, Juni-Ausgabe 2004, S. 36-41.

Von der Hude, N., & Sauerwein, M., 2007 : *Energiepfähle in der praktischen Anwendung*, Vorträge zum 14. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 15. März 2007, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 76, 2007, S. 95-109.

Von der Hude, N., & Wegner, W., 2009 : *Energiepfähle als Schnittstelle zwischen Spezialtiefbau und Haustechnik*. 1. Darmstädter Ingenieurkongress, 14/15. September 2009.

Vuataz, F.-D., Bossy, F., Colliard, B. & Wilhelm, J., 2005 : *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg. Géostructures énergétiques, implantation des sondes géothermiques verticales, ressources en aquifères profonds, géothermie haute énergie*. Rapport pour le Service des transports et de l'énergie, canton de Fribourg, 2 vol., 162 & 90 pp.

Wilhelm, J., Bianchetti, G. & Vuataz, F.-D., 2003 : *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud. Géostructures énergétiques, aquifères profonds, géothermie haute énergie*. Rapport pour l'Etat de Vaud (projet OFEN No 46'094) : 171 pp.

Sites internet

- Société Suisse pour la Géothermie (SSG) : <http://www.geothermie.ch/>
- Groupement promotionnel suisse pour les pompes à chaleur (GSP) : <http://www.pac.ch/>
- Aéroport international de Zürich : <http://www.aeroport-de-zurich.com>

7. Exploitation des nappes phréatiques peu profondes (<100 m)

7.1 Introduction

Le sous-sol genevois contient de nombreuses nappes, à diverses profondeurs et de caractéristiques variées (chapitre 3.6). Ces nappes peuvent présenter des conditions d'exploitation thermiques intéressantes, pour autant qu'elles puissent fournir des débits suffisants et ne soient pas une ressource en eau potable protégée par la législation sur la protection des eaux souterraines.

L'exploitation thermique des nappes phréatiques, bien qu'en développement, est encore peu utilisée en Suisse. A Genève, les installations existantes se comptent sur les doigts d'une main.

Le but de ce chapitre est de faire le point sur l'utilisation thermique des nappes phréatiques, de mettre en évidence les secteurs exploitables dans le canton et d'évaluer leur potentiel énergétique.

7.2 Description des systèmes

Les nappes d'eaux souterraines sont en contact direct avec les terrains qui constituent l'aquifère et ont généralement des températures équivalentes. L'exploitation de la chaleur des nappes phréatiques est considérée comme une utilisation directe de la chaleur géothermique, car l'eau souterraine transmet sa chaleur directement au fluide de la PAC, sans passer par un liquide caloporteur, comme dans le cas des sondes géothermiques.

L'eau souterraine est pompée à l'aide d'un ou plusieurs puits de prélèvement, puis acheminée vers la pompe à chaleur. Celle-ci en extrait la chaleur et abaisse sa température de plusieurs degrés. L'eau est ensuite réinjectée dans la nappe afin de maintenir son bilan hydrogéologique constant (Figure 7-1). Afin d'éviter les interactions entre l'eau pompée et l'eau réinjectée, le puits de restitution (ou tranchée d'infiltration) doit se trouver à une distance suffisante du puits de prélèvement, de préférence à l'aval hydraulique, ce qui n'est pas toujours réalisable selon la configuration de la parcelle et la capacité hydraulique des puits.

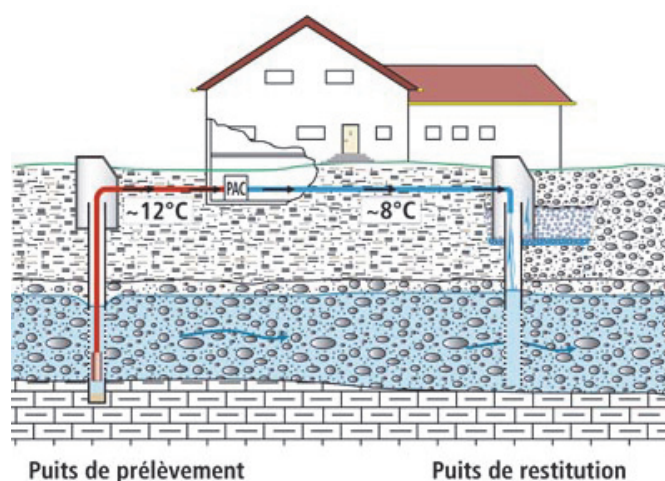


Figure 7-1 . Schéma d'une exploitation de l'eau souterraine

A Genève, comme ailleurs sur le plateau suisse, la température annuelle moyenne des nappes phréatiques peu profondes varie le plus souvent entre 8 et 15°C.

L'ampleur des variations saisonnières ainsi que leur décalage par rapport à la température de l'air dépend principalement de la profondeur de la nappe, les nappes proches de la surface présentant la plus grande variabilité.

Les installations peuvent également être utilisées pour produire du froid en été, en transmettant le froid de la nappe directement au fluide de circulation du système de chauffage / refroidissement. En cas de besoins importants, un refroidissement encore plus efficace, à l'aide d'une PAC réversible est également réalisable.

Dans le cas d'une nappe à perméabilité limitée, il peut être nécessaire de mettre en place une installation réversible avec stockage de chaleur aux puits, permettant d'atteindre un équilibre d'exploitation. Dans ce cas les puits servent alternativement de puits de pompage et de réinjection. Un puits « chaud », si possible situé en amont, est utilisé comme puits de pompage pendant l'hiver puis l'eau refroidie est réinjectée dans le puits « froid ». En été ce même puits « froid » est exploité comme puits de pompage et l'eau réchauffée est alors réinjectée dans le puits « chaud ». Un stock thermique est alors constitué dans le sous-sol. Il permet une exploitation durable de l'aquifère. Cependant les puits doivent être dimensionnés de façon à pouvoir servir à la fois de puits d'exploitation et de réinjection. Relevons qu'il est également possible d'utiliser un doublet comme une boucle, en adaptant l'écoulement des puits par rapport au stock et à la vitesse de déplacement de la nappe. Pendant la période de chauffage, le stock froid constitué se rapproche progressivement du puits de pompage, et l'atteint au début de la période de refroidissement. Le stock chaud est alors constitué au puits de réinjection. Notons qu'une telle installation doit cependant faire l'objet d'un dimensionnement très soigné.

La profondeur-seuil de rentabilité de l'exploitabilité des nappes souterraines se situe le plus souvent entre 20 et 50 m de profondeur (OFEV, 2009), selon la taille de l'installation et les caractéristiques du sous-sol.

Le rendement des systèmes d'exploitation de l'eau souterraine est supérieur à celui d'une SGV, d'une part car il s'agit d'une exploitation directe de la chaleur (pas de liquide caloporteur intermédiaire), et d'autre part parce que la température de la source ne diminue pas au cours de l'exploitation comme c'est le cas pour les SGV. Ceci se traduit par un coefficient de performance (COP) des pompes à chaleur eau-eau élevé, pouvant atteindre 5 par rapport à celui des PAC sol-eau qui est de l'ordre de 4, ce qui correspond à une économie de 20% d'énergie électrique par an (PGN, 2008).

7.3 Exemples et projets de réalisation

Plusieurs projets ont été réalisés en Suisse, dont la plupart en région alémanique. Ces installations restent cependant encore assez peu nombreuses (14% de la production géothermique, OFEN 2009). On peut citer les exemples suivants :

- Le bâtiment du service du feu à Sisseln (AG) se trouve au-dessus d'un aquifère d'une épaisseur de 10 m, dont le niveau de l'eau montait avant la restauration au-dessus du niveau de la dalle de fondation du bâtiment. En plus d'assurer le chauffage du bâtiment, l'installation permet également de rabattre le niveau de l'aquifère.
- La banque Valiant à Suhr (AG) est un bâtiment récent. Il se situe au-dessus d'un aquifère profond de 12 m, avec une épaisseur de 17 m, dont la température se situe entre 11 et 12°C. Le bâtiment est à la fois chauffé et rafraîchi (géocooling) par pompage dans l'aquifère.
- Une ancienne installation de chauffage au mazout de l'Eglise et de la cure de Bremgarten (AG) a été remplacée à 50% par une installation de type pompe à chaleur. Les bâtiments reposent sur un aquifère de faible épaisseur (1,5 m, 30-40 cm en période d'été). Dans ces circonstances une injection directe dans la PAC n'est pas possible, et un circuit intermédiaire a été inséré avec un échangeur de chaleur.
- Le dépôt des trains TRN à Fleurier (NE) permet d'accueillir et d'entretenir tout le parc des véhicules ferroviaires TRN. Trois puits prélèvent l'eau souterraine à une température de 7 à 12°C dans la nappe à une profondeur de 2 m. L'eau est pompée avec un débit de 12 m³/h et alimente une pompe à chaleur dont l'électricité est fournie par un couplage chaleur-force modulant à moteur à gaz naturel.

Sur le canton de Genève, on peut citer les exemples suivants :

- Groupe d'habitations (3 villas) à Cartigny (chauffage, sans production d'eau chaude). Cette installation est implantée au-dessus de la nappe superficielle de la Champagne. A cet endroit, la nappe se situe dans des graviers et des sables de retrait würmien, à une profondeur d'environ 4,5 m sur une épaisseur allant d'environ 1,5 m à 3.2 m. Les essais de pompage ont permis de mesurer la perméabilité de la nappe à $3 \cdot 10^{-3}$ m/s.
- Ancienne bâtisse villageoise à Chancy, rénovée et transformée en petit immeuble locatif et abritant également un restaurant. Pompage et rejet dans la nappe superficielle de Chancy. Les puits sont profonds de 7.8 m et 6.3 m et distants de 35 m. Débit de 60 l/min pour une pompe à chaleur d'une puissance totale de 35 kW.
- Installation pour immeuble administratif à Jargonnant (Eaux-Vives) exploitant l'eau de la nappe du Genevois. Ce cas est traité plus en détail dans le chapitre suivant car il comprend une partie importante de stockage.

Localité	Sisseln (AG)	Suhr (AG)	Bremgarten (AG)	Fleurier (NE)	Cartigny (GE)	Genève
Bâtiment	Service du Feu	Banque Valiant	Eglise et Cure	Dépôts des trains TRN	Maisons Dériaz	Jargonnant
Type de locaux	Habitation atelier	Entreprise	Eglise, habitation	Dépôt de trains	Habitation (3 villas)	Bureaux
Surface de référence énergétique (m ²)	713	2410	780 + 720	4'500	540	~19'000 (estimé)
Aquifère						
Profondeur du forage (m)	5 (puits)	30	6		8	
Profondeur de l'eau souterraine (m)	3	12	3.5	1.6 - 2	4.5	10
Epaisseur de l'aquifère (m)	10	17	1.5/3	4 - 5	3.5	30
Débit de production (m ³ /h)	6	17	5.4 - 0.6	12	6	80 (estimé)
Pompe à chaleur (PAC)						
Puissance à l'évaporateur (kW)	14	53	20		20	-
Puissance calorifique / frigorifique (kW)	21 / -	67 - 67	25	52 / 38	28 / -	-
Heures de fonctionnement annuelles (h)	2'400	1'640	4'000		2'500	-
Demande thermique (MWh/an)	50	110	100	150	73	-
Coefficient de performance annuel (COPA)	4.0	4.7	3.8	4.5	2.7	-
Couverture par la PAC (%)	100	100	50	80	100 (sans EC)	-
Mise en service	2002	2003	2002	2003	1994	1988

Tableau 7-1. Résumé des principales caractéristiques de six installations géothermiques sur aquifères (SSG, GADZ)

7.4 Lois, normes et directives

Au niveau fédéral, l'exploitation des aquifères de faible profondeur est limitée par la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) et par l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux). Au niveau cantonal, elle l'est par la loi sur les eaux (LEaux-GE), le règlement d'exécution de la loi sur les eaux (REaux-GE) et le règlement sur l'utilisation des eaux superficielles et souterraines (RUESS).

La directive de la confédération (OFEV-2009) sur l'exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol contient les recommandations légales et techniques vis-à-vis de l'exploitation géothermique de basse température, incluant les nappes peu profondes.

Il n'existe pas encore de norme suisse liée à l'exploitation thermique des nappes souterraines. Il est toutefois prévu qu'une norme SIA sur le sujet soit établie d'ici quelques années.

7.5 Avantages

Bien qu'encore peu utilisée, l'exploitation des nappes peu profondes est une méthode élégante de valoriser un potentiel géothermique.

Le rendement d'une installation eau-eau est meilleur que pour une sonde : pas de fluide caloporteur intermédiaire et la température de la source ne diminue pas au cours de l'exploitation.

Elle offre la possibilité de rafraîchissement de type « géocooling » (sans passer par la PAC), à grande puissance.

L'installation nécessite peu de forages et l'entretien est peu important.

Comme dans le cas des sondes, ces systèmes sont très peu polluants et leur durée de vie est en principe illimitée (hormis les parties mécaniques, pompe et PAC), aussi longtemps que les conditions de la nappe ne sont pas modifiées.

7.6 Risques et contraintes associées

7.6.1 Risques environnementaux

L'exploitation thermique des aquifères présente des risques pour la qualité des eaux souterraines lorsque la construction et l'exploitation des installations ne sont pas appropriées. Des polluants peuvent emprunter le dispositif de restitution pour atteindre les eaux souterraines en cas de défaut dans le système ou d'accident avec des liquides pouvant polluer les eaux. Par ailleurs, le rejet des eaux après exploitation entraîne une modification plus ou moins localisée de la température de la nappe pouvant générer des modifications de ses caractéristiques.

Les contraintes générales pour la protection de l'environnement selon la directive de l'OFEV et la LEaux sont les suivantes :

- Les exploitations ne peuvent pas être installées dans les zones de protection des puits de captage S1, S2 et S3 (chapitre 3.7), ainsi que dans les périmètres comprenant des eaux souterraines artésiennes.
- Les exploitations ne peuvent pas être installées dans les secteurs A_u de protection des eaux exploités ou exploitables pour l'eau potable (critère important à Genève).
- Dans certains périmètres, l'exploitation peut être admise moyennant des obligations spécifiques. Il s'agit des périmètres contenant des aquifères superposés, ceux dans lesquels la constitution géologique et hydrogéologique du sol est insuffisamment connue, les périmètres exposés à un

danger de crue, à densité élevée d'exploitations souterraines, équipés d'exploitations souterraines, ou les sites pollués.

- L'eau doit être en principe restituée dans son intégralité, sans avoir été polluée, dans l'aquifère où elle a été prélevée.
- L'apport ou le prélèvement de chaleur ne doit pas modifier la température des eaux souterraines de plus de 3°C à 100 m de l'installation par rapport à l'état naturel. Ce point ne se limite pas à l'installation projetée mais à l'ensemble des installations existant sur la nappe. Il s'agit là d'une des limitations majeures de ces systèmes.

7.6.2 Risques techniques liés à l'hydrogéologie du site.

Une installation d'exploitation thermique des eaux souterraines nécessite une connaissance pointue des caractéristiques hydrogéologiques locales effectives. Les paramètres essentiels, c'est-à-dire la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère, sont généralement des paramètres très variables dans le canton. Pour cette raison, une étude hydrogéologique de détail pour toute nouvelle installation est indispensable afin de s'assurer de la faisabilité du projet et de son bon dimensionnement.

Le tableau suivant liste les paramètres nécessaires pour l'établissement d'un projet et les risques liés à leur mauvaise estimation.

Paramètres décisifs devant faire l'objet d'investigations détaillées		
Paramètres hydrogéologiques	Problème possible	Risques pour l'installation
Perméabilité et épaisseur	Sur-estimation	Débit de pompage insuffisant. L'installation fonctionne mal, voire pas du tout.
	Sous-estimation	Surdimensionnement de l'installation (trop de forages). Elle fonctionne bien mais a coûté trop cher.
Gradient d'écoulement	Paramètres faux	Modèle d'équilibre thermique de la nappe erroné. Risque de rejeter les eaux exploitées à l'amont du pompage. Baisse éventuelle du rendement de l'installation.
Paramètres pouvant être estimés par documentation et/ou modélisation		
Température de la nappe	Mauvaise prise en compte des variations saisonnières (marquées dans les nappes superficielles)	Mauvais fonctionnement.
Propriétés chimiques des eaux souterraines	Eaux incrustantes ou corrosives	Colmatage ou vieillissement prématuré du circuit.
Teneurs en particules fines	Pas de prise en compte de ce paramètre.	Usure du circuit, encrassement des conduites, colmatage de l'ouvrage de restitution.
Effet thermique du rejet des eaux utilisées dans la nappe	Mauvaise estimation.	Conflit avec le voisinage. Installation non réglementaire à modifier ou à abandonner.
	Bilan thermique mal estimé et non équilibré	Baisse progressive du rendement de l'installation.
Autre utilisation de la nappe dans le secteur.	Conflit avec le voisinage (voir point 7.6.3).	Opposition au projet, demandes d'indemnisation, etc.

Tableau 7-2. Liste des paramètres nécessaires pour l'établissement d'un projet et les risques de leur mauvaise estimation.

7.6.3 Conflits avec le voisinage, le bâti existant et futur.

La ressource hydrogéologique n'est pas infinie ni homogène. Il existe ainsi plusieurs possibilités de conflits d'exploitation.

On citera tout d'abord celui d'une exploitation déjà existante de la nappe dans le secteur du projet : autre installation thermique, pompage agricole ou même d'agrément. La législation (Code Civil Suisse) prévoit en effet qu'une nouvelle installation ne devra pas porter préjudice à des installations existantes sous peine de dommages-intérêts.

Dans le cas d'une nouvelle installation thermique, le risque quantitatif est faible si l'eau est restituée à la nappe. Il sera plus important si l'eau est restituée dans un autre émissaire (rivière, lac).

D'un point de vue qualitatif (température principalement), il faudra bien évaluer les effets éventuels d'une modification de la température de la nappe pour l'utilisateur préexistant.

On rappellera que la problématique liée au panache thermique créé par le rejet des eaux exploitées est un critère fondamental de faisabilité d'une installation (pas de modification de plus de 3°C à 100 m de l'installation par rapport aux conditions naturelles). A cet égard, les effets des exploitations voisines doivent également être pris en compte : en effet il ne s'agit pas seulement de limiter le panache de chaleur d'une seule exploitation mais de prendre en compte la totalité des installations sur une seule nappe afin de limiter un changement de température trop important (OFEV, 2009).

La concurrence hydrogéologique n'est pas forcément liée uniquement à une autre exploitation de la nappe. Elle peut également exister (ou apparaître a posteriori) avec des projets de pompages ou de drainages en relation avec des bâtiments, des ouvrages souterrains, etc. La construction de bâtiments atteignant la nappe peut également créer des modifications dans les écoulements de celle-ci, bien qu'en principe chaque projet doit être conçu de façon à ne pas modifier les écoulements.

Dans certaines zones, notamment industrielles, il existe des puits de pompage dans la nappe souterraine pour du refroidissement par exemple. Ces ouvrages, parfois relativement anciens, ne sont pas tous recensés. En cas d'arrêt d'exploitation, il peut s'en suivre une remontée de la nappe qui modifiera sensiblement les niveaux à la hausse, entraînant ainsi toute une série de conséquences, comme par exemple des infiltrations dans les sous-sols de bâtiments ou, dans le cas qui nous occupe, une moins bonne capacité d'infiltration des eaux de rejet.

Il est donc très important, pour tout projet, de recenser le mieux possible les ouvrages existants pouvant influencer le régime de la nappe souterraine, de même que les projets en cours susceptibles de le faire et d'en évaluer l'effet. Ces situations soulignent l'importance de la coordination de la construction et de l'exploitation dans le sous-sol (Blunier, 2009).

7.7 Procédure d'autorisation et contraintes légales

Pour procéder à une installation dans le canton de Genève, si on se trouve en dehors des secteurs d'interdiction (chap. 7.6), il faut directement procéder à une requête en autorisation de construire auprès du Département des constructions et des technologies de l'information (DCTI), conformément à la loi sur les constructions et les installations (LCI).

Une autorisation particulière du département en charge de l'application des législations fédérales et cantonales sur les eaux est également nécessaire (en 2011, il s'agit du DSPE - Service de géologie, sols et déchets - GESDEC) en vertu du règlement d'exécution de la loi sur les eaux (L2 05.01 - REaux-GE) et du règlement sur l'utilisation des eaux superficielles et souterraines (L2 05.04 RUESS).

Les demandes d'autorisation pour exploiter la chaleur des eaux souterraines nécessitent un rapport hydrogéologique préalable qui décrira l'extension, l'épaisseur, la perméabilité et la productivité de l'aquifère, ainsi que la courbe de température, la direction d'écoulement, la vitesse d'écoulement et la

composition chimique des eaux souterraines. L'extension du panache d'eau chaude ou d'eau froide restitué devra également être estimée.

Le règlement sur l'utilisation des eaux superficielles et souterraines (L2 05.04 - RUESS) fixe un seuil pour l'utilisation hydrothermique des eaux souterraines à 300 litres/minute. Au-dessus de ce seuil, l'utilisation est soumise à une concession délivrée par le Conseil d'Etat. Au-dessous, elle est soumise à une autorisation du département (DSPE).

Enfin, une redevance annuelle ainsi qu'un émolument administratif sont prélevés par le département :

- La redevance annuelle est calculée (art. 23 RUESS) :
 - pour le prélèvement dans les eaux superficielles : 0.- CHF (domaine privé).
 - pour le captage des eaux souterraines du domaine public, à raison de 2 centimes par m³ d'eau pompée (en 2011).
- L'émolument administratif (art. 25 RUESS) est prélevé une seule fois. Il est calculé en fonction de la complexité et de l'ampleur du travail occasionné (varie officiellement entre 100.- et 500'000.- CHF !). En réalité, dans le cas des installations hydrothermiques, les montants auront les ordres de grandeurs suivants :
 - Pour des installations individuelles : quelques centaines de francs
 - Pour des installations plus importantes : quelques centaines à quelques milliers de francs.

Les forages préliminaires de moins de 400 m de profondeur destinés à l'étude du projet peuvent être exécutés sans autorisation formelle des autorités (GESDEC). Ils devront toutefois leur être annoncés par l'entreprise exécutante ou le mandataire spécialisé (hydrogéologue, géotechnicien) au moins 48 heures avant le début des travaux et leurs résultats transmis à cette même autorité dans un délai maximum de 3 ans (art.3 RUESS).

En vue du chantier, les installations dûment autorisées et leur mise en œuvre doivent être conformes aux directives de l'Office fédéral de l'environnement sur l'exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol (OFEV - 2009). Elles devraient notamment être conçues en collaboration avec un spécialiste des eaux souterraines (hydrogéologue, géotechnicien). L'exécution des ouvrages définitifs (forages ou puits) doit également être déclarée par l'entreprise exécutante 48 heures au moins avant le début des travaux et faire l'objet d'un suivi.

Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des ouvrages de l'installation devront être soigneusement relevées et consignées dans un rapport de synthèse à transmettre à l'autorité au plus tard 1 mois après la fin des travaux (art. 8 RUESS).

7.8 Dimensionnement des installations

7.8.1 Principes de dimensionnement

Les nappes phréatiques sont souvent une ressource localisée dont l'exploitation dépend de caractéristiques hydrogéologiques comme le gradient hydraulique et la perméabilité. Une expertise hydrogéologique locale comportant au moins 2 forages est indispensable lors de toute étude de projet, l'un au futur point de pompage et l'autre au futur point de rejet, ce qui rend l'investissement de départ plus important que pour un projet de SGV. Les points suivants détaillent les différents paramètres de dimensionnement d'une installation d'exploitation hydrothermique, révélant l'importance de leur bonne connaissance préalable.

PARAMETRES DES AQUIFERES

Le comportement des eaux souterraines contenues dans des aquifères dépend des caractéristiques physiques et structurales du terrain. Les aquifères sont caractérisés par leur lithologie (type de terrain), leur structure (épaisseur, morphologie des couches), et leur perméabilité. D'un point de vue qualitatif, leur température et leur chimie sont également importantes pour leur utilisation thermique.

Le coefficient de perméabilité K [m/s] traduit l'aptitude du milieu aquifère à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique. Il correspond au débit de fluide par unité de surface de terrain traversée sous un gradient hydraulique unitaire. Selon la loi de Darcy :

$$V = -K \cdot i \text{ [m/s]}$$

V (ou vitesse de Darcy) est une vitesse fictive qui ne correspond pas à la vitesse réelle de l'eau dans le sous-sol car elle s'exprime par unité de surface, sans prise en compte de la porosité du milieu (voir plus loin) ; i est le gradient hydraulique ; K est un facteur de proportionnalité qui dépend du terrain : c'est le coefficient de perméabilité.

Le tableau suivant donne une indication des gammes de perméabilité

Perméabilité K [m/s]	Appréciation
$> 10^{-3}$	Très perméable
10^{-3} à 10^{-5}	Perméabilité moyenne
10^{-5} à 10^{-7}	Perméabilité faible
10^{-7} à 10^{-9}	Perméabilité très faible
$< 10^{-9}$	Imperméable

La perméabilité est déterminée par essais de pompage dans des puits ou des forages. Elle peut également être estimée à partir d'essais granulométriques sur les terrains récupérés lors des forages mais les débits doivent ensuite être testés en vraie grandeur.

La perméabilité d'un aquifère peut présenter une grande hétérogénéité, notamment dans les nappes superficielles, et il est donc de première importance de la déterminer à l'aide d'essais au droit même du projet.

La transmissivité T [m²/s] est le produit de la perméabilité par la hauteur de la nappe h :

$$T = h \cdot K$$

L'épaisseur de la nappe peut être très variable. Il est très important de la connaître pour dimensionner l'installation. Elle est déterminée à l'aide des forages préliminaires.

La température de la nappe est un des paramètres de base pour le dimensionnement de l'installation. Elle présente des variations saisonnières, dont il faut tenir compte. Un aperçu des températures des nappes genevoises est donné plus loin dans ce chapitre.

Il existe plusieurs types de réservoirs : poreux, fissuraux ou karstiques. Dans le Bassin genevois, les aquifères de faible profondeur exploitables pour la géothermie sont à porosité d'interstices (sables et graviers quaternaires - voir chapitre 3.6).

Les nappes peuvent être libres ou captives : une **nappe captive** est « piégée », en pression, sous une couverture géologique peu perméable ; elle n'a pas de surface libre. Sa surface piézométrique sera donc plus élevée que le toit de l'aquifère qui la contient. Une nappe captive est **artésienne** lorsque son niveau

de pression est supérieur à celui du sol. En cas de forage dans une telle nappe, l'eau s'écoule alors spontanément à la surface du sol.

Une **nappe libre** est celle dont le niveau supérieur subit seulement la pression atmosphérique. Son niveau peut fluctuer, et on distingue ainsi une zone saturée et une zone non saturée dans la couche aquifère. La surface piézométrique est donc inférieure au toit de la couche aquifère. Une nappe peut être libre à un endroit donné et captive à un autre, en fonction de la configuration du terrain (Figure 7-2).

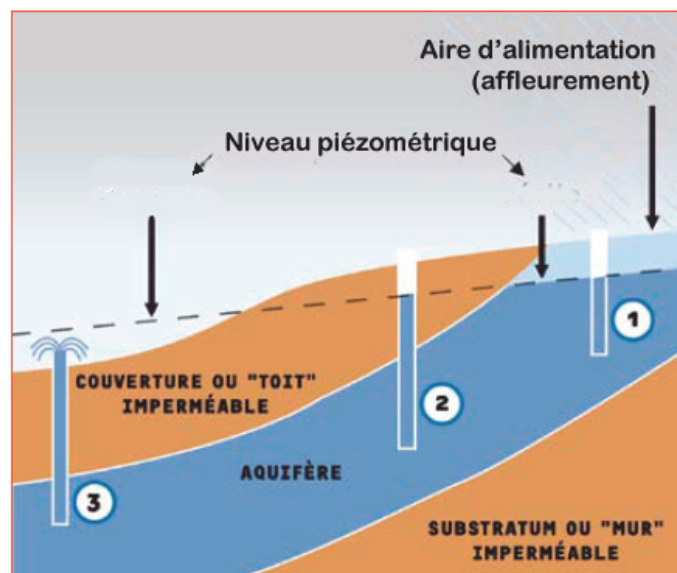


Figure 7-2. Représentation schématique d'une nappe phréatique : 1) nappe libre, 2) nappe captive, 3) nappe captive et artésienne (d'après Lemale, 2008)

Si la productivité d'un puits de pompage varie en fonction de l'aspect libre ou captif d'un aquifère, ce sont surtout les capacités de réinfiltration qui seront différentes. Il est donc primordial de connaître cet aspect de la nappe étudiée.

Sous l'effet du pompage on constate l'abaissement de la surface de la nappe libre ou de la surface piézométrique. Ce phénomène est désigné sous le terme de **rabattement**. Celui-ci est plus important lorsque la perméabilité est faible ou que le débit de pompage est élevé. Le rabattement ne doit pas être trop important afin d'éviter un dysfonctionnement du puits. Pour un puits complet (puits traversant complètement l'aquifère), le rabattement ne dépasse généralement pas 1/3 de l'épaisseur totale de la nappe, exceptionnellement 2/3 à 3/4 pour des nappes peu épaisses.

Les performances du puits peuvent également être affectées par la chimie de l'eau contenue dans l'aquifère : les principaux problèmes rencontrés sont le colmatage et la corrosion. Le **colmatage** est causé par des incrustations de matières et de corps étranger qui se déposent et s'accumulent dans les forages et les conduits du système. Il peut s'agir :

- Des dépôts formés par des carbonates et des sulfates.
- Des précipités formés par des composés ferreux et manganés, qui à terme peuvent obstruer totalement l'ouverture des crépines. Ces dépôts apparaissent lorsque le fer est mis en condition aérobie, provoquant la précipitation d'hydroxydes ferriques (phénomène souvent lié aux nappes captives).
- Des boues engendrées par le développement de bactéries.
- Des colmatages provoqués par des particules fines (par exemple limono-argileuses) de l'aquifère qui se déposent soit dans le fond de l'ouvrage, soit autour de la crépine.

La **corrosion** est le phénomène faisant apparaître des perforations des tubages métalliques, qui entraînent la fragilisation et la perte de l'étanchéité des ouvrages. Cela entraîne à terme l'introduction de particules dans l'ouvrage, qui peuvent ensuite provoquer un colmatage. Les principales causes de corrosion sont des phénomènes chimiques ou électrochimiques.

Les conditions hydrochimiques d'un aquifère doivent donc être connues et faire l'objet, en cas de doutes, d'analyses préliminaires de contrôle à adapter aux conditions locales (dureté de l'eau, fer, manganèse, turbidité de l'eau). La température, la teneur en oxygène dissous et le pH sont également des paramètres à mesurer.

PARAMETRES DE L'INSTALLATION

Le **débit d'eau à prélever de l'aquifère Q** dépend de la puissance thermique à extraire de l'aquifère (P_{eau}), de la différence de température de l'eau entre l'entrée et la sortie de la PAC (ΔT) et de la capacité calorifique volumique de l'eau ($C_{V(eau)}$) selon la formule suivante :

$$Q = \frac{P_{eau}}{\Delta T \cdot C_{V(eau)}}$$

Le débit dépend donc linéairement de la puissance thermique extraite de l'aquifère. On calcule généralement ce débit à en admettant un ΔT de 4°C.

Pour un aquifère de trop faible perméabilité, il peut être nécessaire d'installer plusieurs puits pour obtenir les débits souhaités. Ceci permet également de diminuer la vitesse de circulation dans le puits et d'éviter une trop grande turbidité de l'eau. L'installation de réinjection (puits, tranchée) doit se trouver à une distance suffisante des puits de pompage afin d'éviter les interactions entre les deux, sauf configuration particulière (stockage ou manque de place). Lors d'une utilisation en doublet réversible, il faut prévoir une distance entre les puits assez grande pour éviter un percement thermique, c'est-à-dire que le stock de chaud formé à l'amont atteigne le stock de froid situé à l'aval (sauf fonctionnement en boucle). Dans ce cas, la distance minimale nécessaire se calcule à partir de la vitesse réelle de l'eau souterraine ($V_{réelle}$ en m/s) :

$$V = \frac{K \cdot i}{\varphi}$$

Où K est la perméabilité du milieu (m/s), i est le gradient hydraulique de la nappe et φ la porosité du milieu.

Le front du panache thermique se déplace plus lentement que l'eau souterraine : sa vitesse (V_{th} en m/s) est diminuée d'un facteur R , appelé **retard thermique** :

$$V_{th} = \frac{V}{R}$$

Le retard thermique dépend de la porosité du milieu φ et des capacités calorifiques de l'eau et de l'aquifère ($C_{V(eau)}$ et $C_{V(sol)}$ en MJ/m³/K)

$$R = 1 + \frac{C_{V(sol)}}{C_{V(eau)}} \cdot \frac{(1-\varphi)}{\varphi}$$

La valeur de ce retard thermique est généralement comprise entre 2 et 5 pour des aquifères à porosité d'interstices (PGN, 2008).

Les doublets réversibles peuvent être installés dans le cas où l'écoulement ou la perméabilité sont insuffisants pour assurer la recharge du terrain au puits de pompage. Dans ce cas, en plus de la vitesse de l'eau souterraine, l'épaisseur de la couche de couverture a également une influence sur le rendement de l'installation : si elle est épaisse, elle forme une bonne isolation d'avec l'air ambiant, ce qui augmente la capacité de stockage du sous-sol. Les doublets réversibles ont de plus l'avantage d'un meilleur rendement (car une partie de la chaleur est réutilisée), et évitent une trop grande dispersion des panaches thermiques.

De façon générale, les installations utilisant les nappes phréatiques refroidissent localement moins le terrain que les sondes géothermiques, car leur influence est évacuée au fur et à mesure par l'écoulement de l'eau souterraine. Il s'agit donc d'atteindre un équilibre annuel entre le prélèvement de chaleur et son renouvellement, principalement dans le cas d'une utilisation en doublet réversible (PGN, 2008).

7.8.2 Logiciels de dimensionnement

Le logiciel **GED (Ground Energy Designer)** a été développé par l'entreprise Colenco Power Engineering avec le soutien de l'Office fédéral de l'énergie. Ce logiciel reprend les principes utilisés par des logiciels de simulation d'écoulements plus complexes tels que Feflow ou Tough2 mais les simplifie à l'aide de solutions analytiques. Il a été développé pour pouvoir être utilisé rapidement par une large gamme d'utilisateurs, sur la base d'un minimum de données techniques et hydrogéologiques. Il permet ainsi d'effectuer des simulations rapides de cas simples, pouvant donner une bonne appréciation du type d'installation à prévoir et de son impact thermique sur les eaux souterraines lors d'un avant-projet d'implantation. Les données utilisées par le logiciel sont synthétisées dans la figure 7-3 (PGN, 2008).

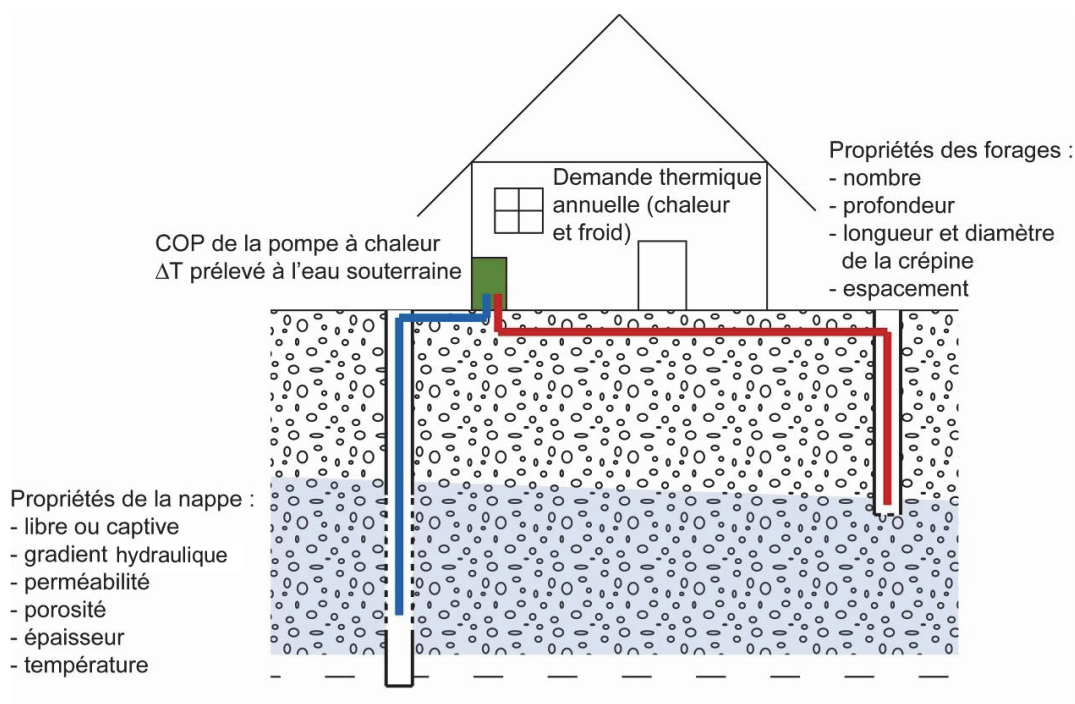


Figure 7-3. Paramètres pris en compte lors d'une simulation par le logiciel GED

Le logiciel calcule la puissance thermique nécessaire de la PAC selon la demande thermique annuelle choisie par l'utilisateur, sur la base de 1800 heures de fonctionnement par an. A partir de la puissance thermique et du COP, il détermine le débit à soutirer à la nappe. Sur la base des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, il fournit également une distance minimale à respecter pour éviter toute interaction entre le puits de pompage et le puits d'injection et entre deux puits de pompage et d'injection dans le cas où plusieurs groupes de puits existent. Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère déterminent l'extension du panache thermique, tandis que le gradient hydraulique a surtout une influence sur son extension dans le sens de l'écoulement.

Lors d'une simulation avec GED il faut tenir compte des limites du logiciel : certains aspects du système ne sont pas pris en compte, comme la chimie de l'aquifère ou l'échangeur de chaleur. La modélisation est simplifiée en 2D, pour un domaine infini et homogène, sans couplage écoulement/thermique, avec un débit permanent et des paramètres environnementaux constants (Badoux et Peguiron, 2009).

D'autre part, GED permet de prendre en compte une demande de rafraîchissement en été. Dans ce cas, il calcule une demande thermique annuelle moyenne sur la base de la demande en chaud de l'hiver et de la demande en froid de l'été.

GED ne permet par contre pas de simuler des situations plus complexes telles que l'utilisation des puits en doublet réversible. Pour des configurations d'études impliquant plus de paramètres, il existe un grand nombre de logiciels disponibles sur le marché parmi lesquels on peut citer :

- MODFLOW (Modular FLOW)
- GMS (Groundwater Modeling System)
- Visual MODFLOW (Schlumberger)
- PMWIN (Processing MODFLOW for WINDOWS)
- NAMMU (Serco)
- GroundWater (CHYN- Neuchâtel)
- VPAC (AF-Colenco)
- FEFLOW (DHI-WASY)

7.9 Caractéristiques générales des nappes phréatiques à Genève

Les nappes phréatiques genevoises sont assez bien documentées et certaines d'entre elles font l'objet d'un suivi régulier grâce à un important réseau de piézomètres. Leur connaissance reste toutefois en constante évolution, au fur et à mesure des nouvelles campagnes de forages.

A Genève, on peut distinguer trois types de nappes phréatiques non profondes : les nappes principales, de forte capacité, toutes contenues dans la formation de l'Alluvion ancienne, les nappes superficielles, situées en général à moins de 10 mètres de profondeur, souvent dans des formations d'alluvions récentes ou de retrait glaciaire, et enfin les nappes temporaires, souvent contenues dans des couches sablo-limoneuses à faible transmissivité.

7.9.1 Nappes principales

On recense quatre nappes principales à Genève : la nappe du Genevois, la nappe de Montfleury, la nappe du Rhône et la nappe de l'Allondon, qui se trouvent toutes dans la couche aquifère graveleuse et sableuse de l'Alluvion ancienne (Figure 7-4). Les nappes principales sont situées en secteur A_U ou B de protection des eaux (chapitre 3.7).

Une autre nappe, celle de Collonge-Hermance, existe également dans l'Alluvion ancienne mais peu de données existent encore à son sujet. Elle est sur le point de faire l'objet de reconnaissances hydrogéologiques afin de mieux la caractériser.

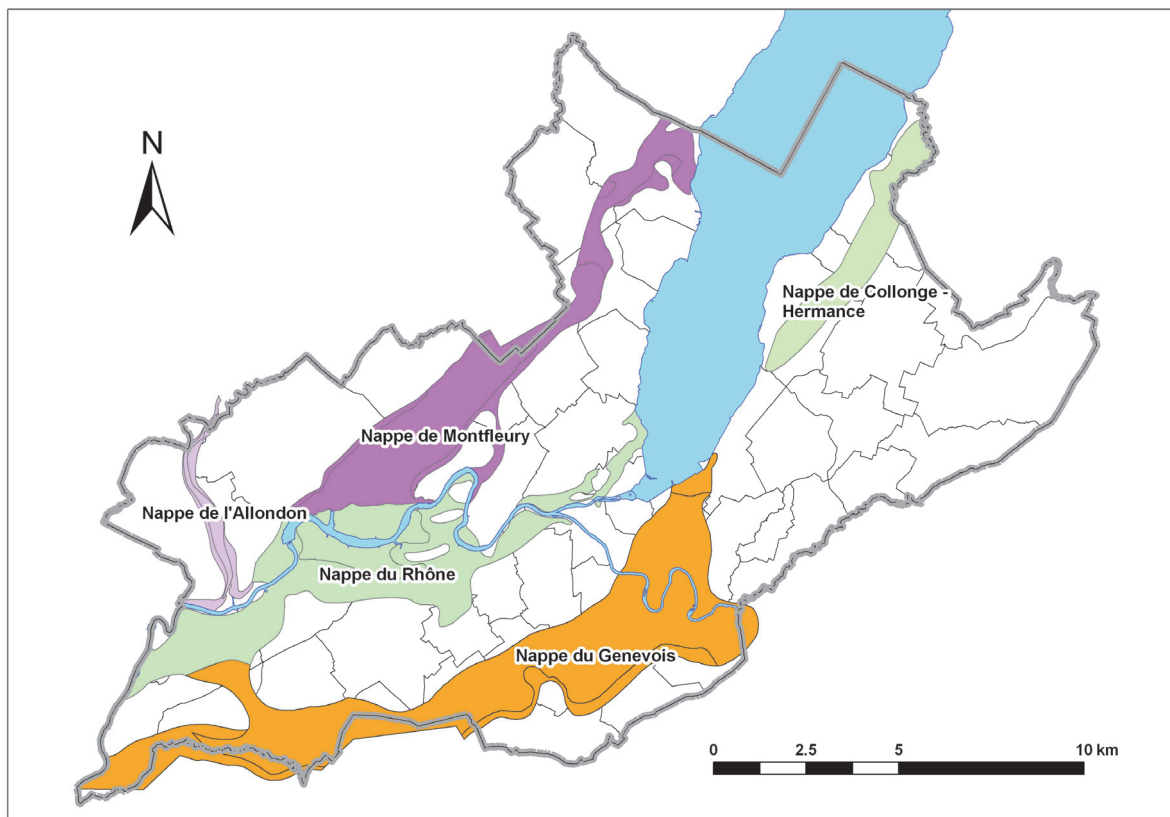


Figure 7-4. Etendue des nappes principales sur le canton de Genève

Ces nappes sont à priori idéales pour l'exploitation géothermique : en effet la formation de l'Alluvion ancienne a une bonne perméabilité, et une épaisseur conséquente, ce qui est favorable pour une exploitation géothermique. De plus, elles sont très étendues. En revanche, leur profondeur est souvent importante (plusieurs dizaines de mètres), ce qui implique des frais plus élevés pour forer les puits de pompage et de réinfiltration, et une demande d'énergie plus élevée pour pomper l'eau.

Deux d'entre elles sont actuellement exploitées pour l'alimentation en eau potable (nappes du Genevois et de l'Allondon), et leur utilisation à des fins thermiques n'est pas autorisée en raison des risques induits (voir point 7.4).

Pour celles où l'exploitation thermique est envisageable, les nappes principales peuvent être des ressources très intéressantes, en particulier pour des installations de grande taille, avec une demande très élevée en énergie de chauffage et/ou de refroidissement qui nécessiteraient des débits importants.

7.9.2 Nappes superficielles

Les nappes superficielles sont généralement de taille bien plus réduite que les nappes principales. Elles se trouvent en principe à faible profondeur, et leur épaisseur dépasse rarement quelques mètres. Leur perméabilité est très variable, car la granulométrie des terrains encaissants peut changer rapidement latéralement, allant de graviers très perméables à des limons peu perméables en quelques mètres.

Certaines nappes superficielles peuvent néanmoins se prêter à l'exploitation géothermique, en particulier pour de petites installations. En effet, bien que leurs caractéristiques soient moins favorables que celles des nappes principales, elles sont généralement plus proches de la surface et nécessitent donc moins d'énergie de pompage et des forages moins profonds. De plus, elles ne sont pas exploitables pour l'alimentation en eau potable, ce qui réduit les conflits possibles d'exploitation.

Il en existe une vingtaine sur l'ensemble du canton, dont les plus importantes sont la nappe de la Champagne, la nappe de l'Aire, la nappe de Carouge - La Praille et la nappe de Puplinge (Figure 7-5).

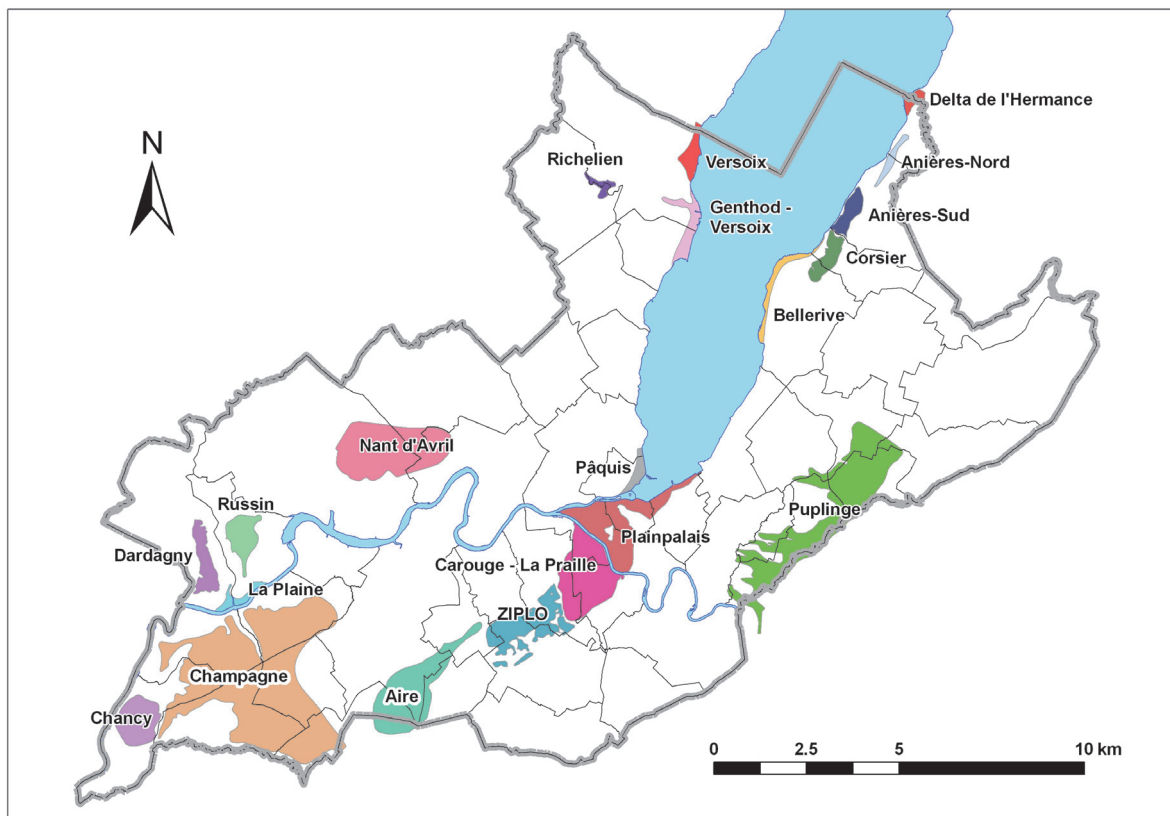


Figure 7-5. Etendue des nappes superficielles du canton de Genève

7.9.3 Nappes temporaires

Au nombre d'une petite vingtaine dans le canton, les nappes temporaires sont pour la plupart contenues dans des terrains de faible perméabilité (limons sableux par exemple). Leur profondeur est très variable, et leur épaisseur généralement faible. Ces nappes sont peu indiquées pour des installations géothermiques même si, localement, il est toujours possible de trouver une zone favorable à une petite installation.

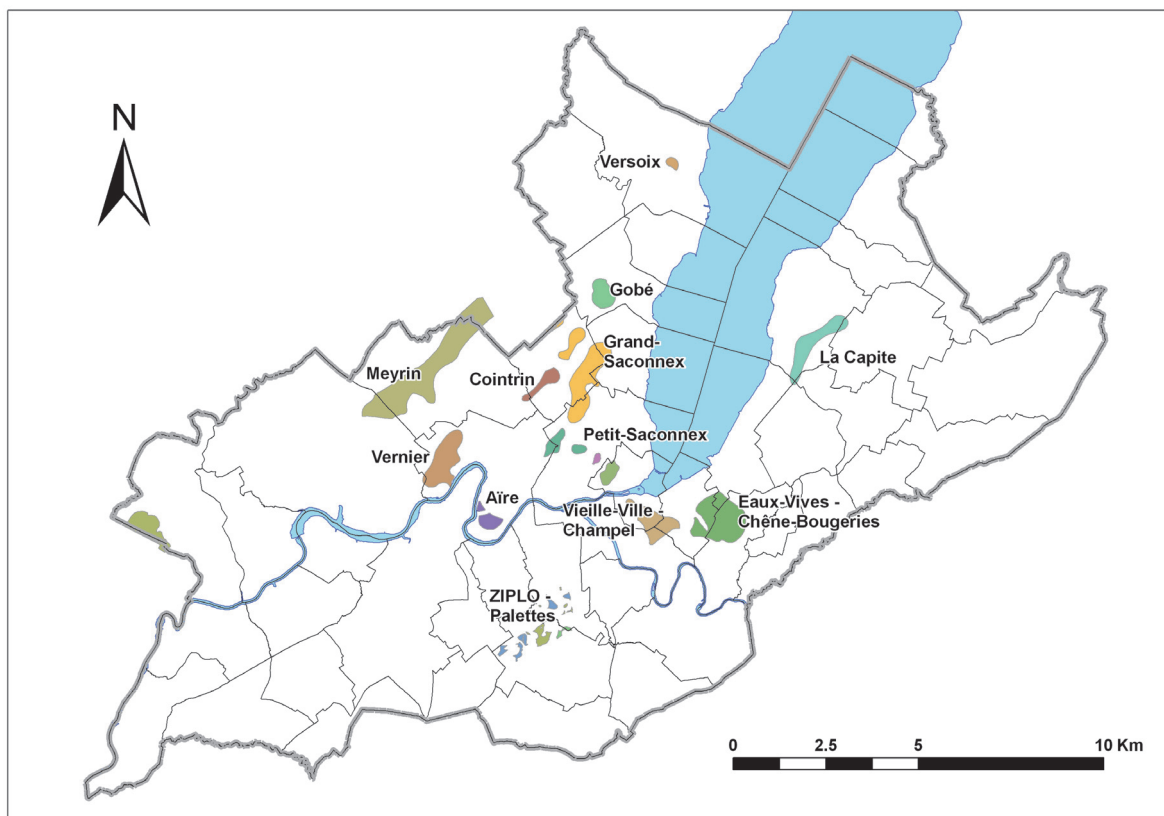


Figure 7-6. Principales nappes temporaires sur le territoire genevois

7.9.4 Température des nappes

Les températures des nappes phréatiques ne sont pas constantes. En fonction de leur profondeur, elles présentent en effet des variations saisonnières plus ou moins importantes. A faible profondeur, l'influence de la température de l'air ambiant est importante, alors que les différences saisonnières s'estompent lorsque la profondeur de la nappe augmente (Figure 7-7).

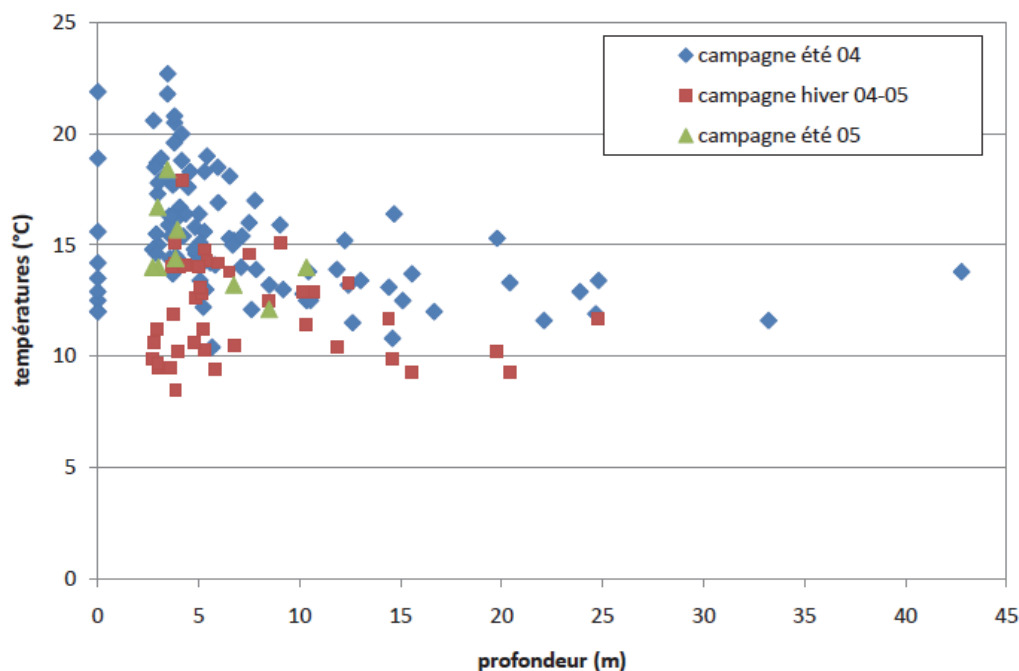


Figure 7-7. Température des nappes genevoises en fonction de la profondeur. Les mesures sont tirées de trois campagnes de prélèvement durant l'été 2004, l'hiver 2004-2005 et l'été 2005. Les points avec une profondeur nulle correspondent à des sources.

Dans le canton de Genève, les températures les plus élevées enregistrées dans les nappes sont d'environ 23°C, et les températures les plus basses d'environ 8°C. Les écarts sont, logiquement, plus marqués dans les nappes les plus superficielles.

Une nappe avec une couverture imperméable importante est également moins sujette aux variations de température, car cette couverture constitue un isolant thermique.

Les nappes principales montrent ainsi des écarts de températures moins élevés que les nappes superficielles, grâce à leur profondeur souvent importante et à leur couverture. Leur température oscille généralement entre 10 et 15°C (Figure 7-8 et Figure 7-9). Dans le cas de la nappe du Rhône, on peut toutefois supposer que la température du Rhône aura une certaine influence sur la température de sa nappe d'accompagnement.

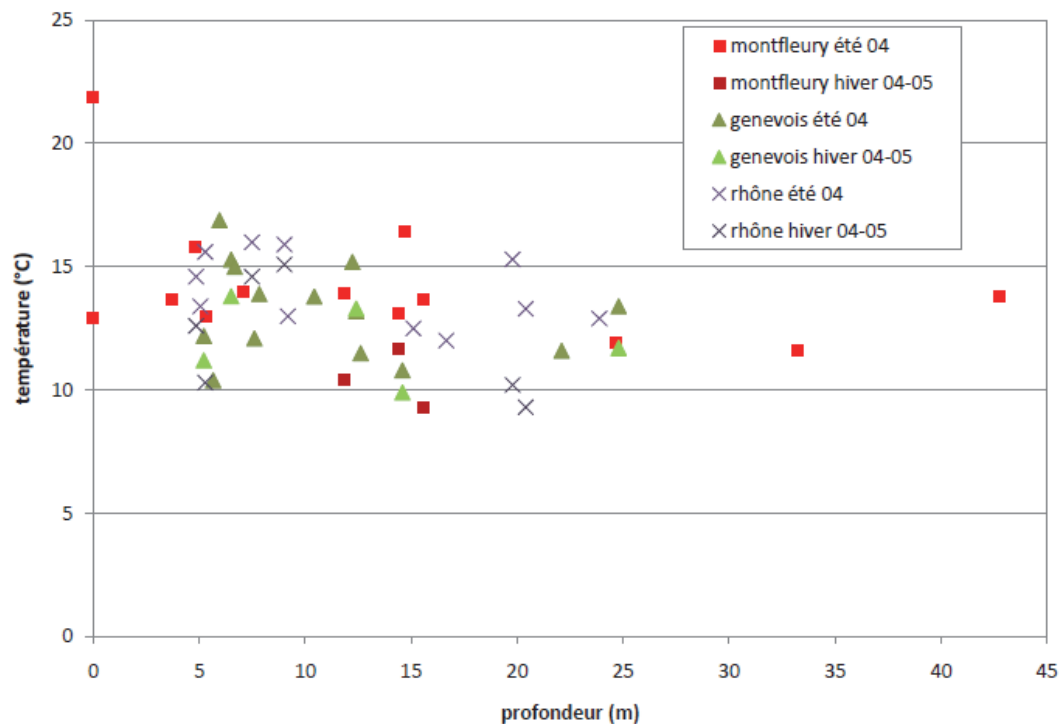


Figure 7-8. Températures des nappes principales en fonction de la profondeur

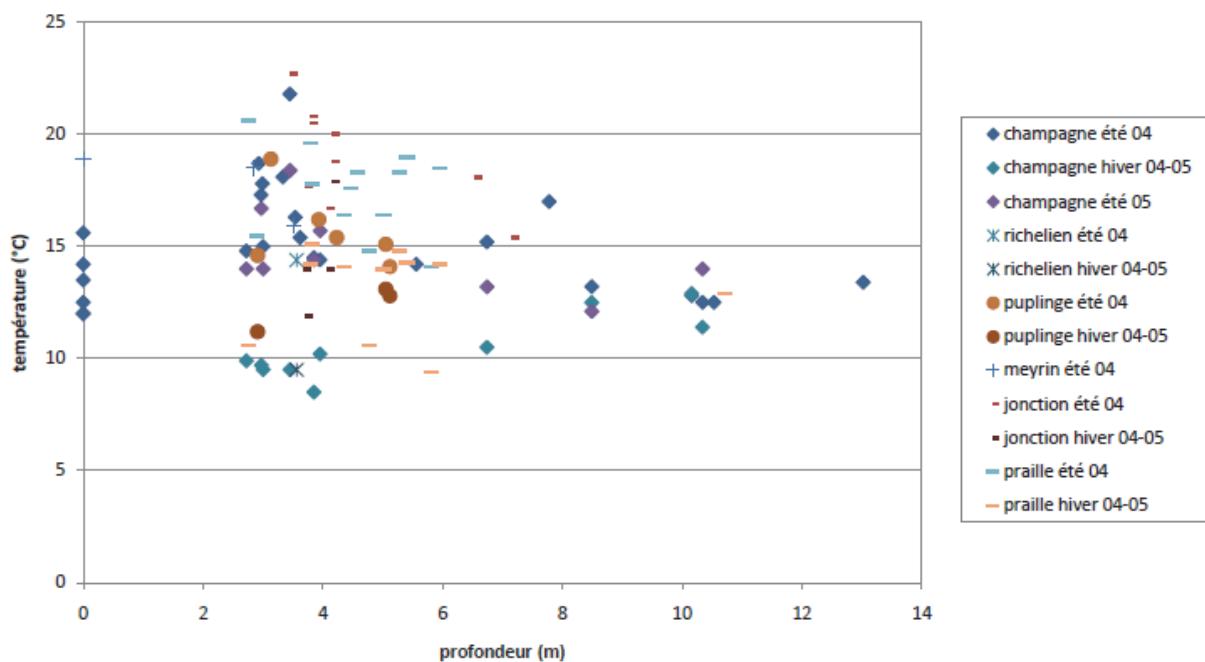


Figure 7-9. Températures des nappes superficielles en fonction de la profondeur

7.9.5 Chimie des nappes

La chimie des nappes peut entraîner des problèmes de corrosion ou de dépôts dans les puits et dans les conduites. Les facteurs de corrosion sont liés à la température, au pH, au potentiel électrochimique, à une faible teneur en oxygène dissous (nappes captives) et à de fortes teneurs en chlorures, nitrates et sulfates. Les facteurs d'encroûtement dépendent principalement de l'équilibre calco-carbonique de l'eau entre le pH, la température et la dureté de l'eau. Selon les conditions hydrogéologiques, des précipitations d'oxydes de fer peuvent également apparaître (nappes captives peu oxygénées).

Dans les nappes exploitées pour l'eau potable de très nombreuses mesures sont faites chaque année afin d'en surveiller la qualité. La nappe du Genevois, par exemple, a une dureté comprise entre 24 et 38 °F³, ce qui correspond à une eau dure à très dure (sig-ge.ch). Plus une eau est dure et plus elle est susceptible de précipiter des minéraux encroûtants. La situation est probablement équivalente pour les nappes de Montfleury et de Collonge-Hermance. La nappe du Rhône est légèrement moins minéralisée de par son équilibre avec le Rhône. En effet, les eaux de surface sont moins minéralisées que les eaux souterraines : la dureté des eaux du lac se situe entre 13.3 et 14.7°F (eau douce). L'exploitation des nappes principales peut donc entraîner des problèmes d'encroûtement des installations de restitution, par exemple suite à l'augmentation de la température de l'eau résultant d'une utilisation pour du rafraîchissement de bâtiment.

Dans les nappes superficielles, les données sur les composants chimiques principaux sont relativement peu nombreuses pour donner des indications directement utilisables sur le potentiel encroûtant ou corrodant des eaux. Des campagnes d'analyses réalisées par le canton en 2002 et 2003 permettent néanmoins d'avoir quelques indications sur les teneurs en ions principaux des nappes superficielles les plus importantes :

Nappes	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO ₃	SO ₄
Champagne	112-146	3.6-18.2	3.7-36.5	1.0-7.8	5.7-62.7	13.4-74.3	10.0-41.4
Aire	75-241	8.5-55.7	7.2-39.4	0.8-15.0	3.0-54.1	1.8-105.3	15.6-291
Richelien	282	12.2	29.3	2.8	15.1	7.0	359.4
Chancy	116-129	6.1-7.3	3.0-3.7	0.6-1.5	3.3-10.6	23.3-34.8	9.0-12.6
Carouge-La Praille	96-288	12.2-31.6	11.6-80.7	1.4-12.7	13.6-247.6	4.1-74.0	70.0-269.9
Puplinge	96-184	7.3-19.5	6.6-40.5	1.4-11.1	9.0-65.7	6.1-41.2	19.6-115.2
Plainpalais	163	9.7	42.9	10.5	47.6	54.7	66.6

Tableau 7-3. Teneurs indicatives en ions principaux des nappes superficielles genevoises (teneurs min et max en mg/l)

L'examen des valeurs de ce tableau révèle, sans grande surprise, une très forte variabilité des teneurs en différents ions. En raison de leur faible profondeur et de leur faible protection naturelle, ces nappes sont en effet très vulnérables par rapport aux activités de surface (agriculture, salage des routes, etc.). Pour ces nappes, il convient dès lors de prendre en compte ces variations.

D'une manière générale, la chimie des nappes genevoises n'est toutefois pas de nature, en elle-même, à exclure une utilisation thermique. Cependant, par ses aspects capricieux, elle nécessite un contrôle préalable afin de prévenir toute mauvaise surprise. Ces analyses de contrôle doivent être effectuées lors des reconnaissances hydrogéologiques préliminaires.

³ Un degré français (°F) correspond à une concentration équivalente de 10 mg/l de CaCO₃.

7.9.6 Débits exploitables

L'exploitabilité thermique d'une nappe est principalement dépendante des débits que l'on peut lui soutirer à l'aide de puits de pompage. Le débit est proportionnel à la perméabilité de la nappe et doit donc être testé avant d'établir un projet définitif.

Il est néanmoins possible et utile d'estimer la gamme de débits potentiellement exploitables à partir d'hypothèses simples sur les caractéristiques de la nappe et du pompage. Le calcul se fait grâce à la formule de Dupuit :

$$Q = \pi K \frac{H^2 - h^2}{\ln R / r} \quad \text{ou} \quad Q = 1.366K \frac{H^2 - h^2}{\log R / r}$$

avec Q = débit [l/s] ; K = perméabilité [m/s] ; H = épaisseur de la nappe [m] ; h = épaisseur de la nappe rabattue dans le puits [m] ; r = rayon du puits [m] ; R = rayon d'action du pompage [m].

Le rayon d'action du pompage étant difficile à estimer, la formule de Porchet admet que le rapport R / r a une valeur constante égale à 100. Le débit peut alors être formulé de la manière suivante :

$$Q = \frac{2}{3} K (2H - s_0) s_0$$

avec s_0 = rabattement au puits. Les débits ainsi obtenu s'expriment en m^3/s . Pour simplifier la lecture ils ont été convertis en l/min dans les graphiques suivants.

Ces formules ont été utilisées pour modéliser des débits avec des conditions-types de perméabilité et d'épaisseur. Le rabattement a été fixé à 20% de l'épaisseur totale de la nappe. Les résultats sont regroupés dans le graphique ci-dessous :

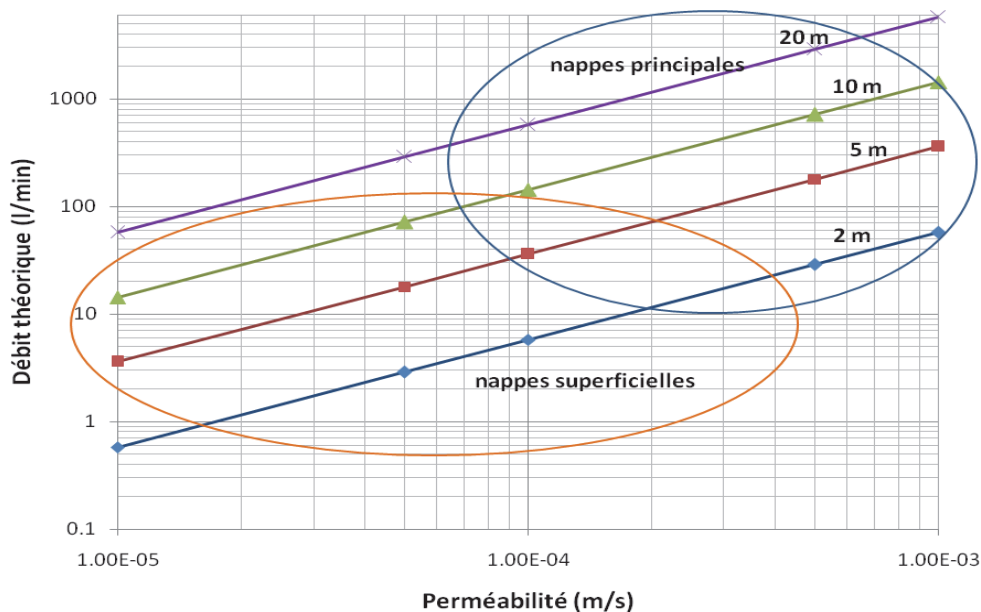


Figure 7-10. Simulation du débit (en l/min) d'un puits traversant complètement la nappe, avec 20% de rabattement, suivant la perméabilité, pour des épaisseurs de nappes de 2, 5, 10 et 20 mètres.

Les nappes principales, qui combinent une perméabilité importante et une épaisseur conséquente fournissent donc les débits potentiels les plus importants pouvant atteindre plusieurs milliers de l/min.

Les nappes superficielles offrent des potentialités plus variables avec des débits allant de moins de 10 l/min à plus de 100 l/min. L'emplacement des puits y est donc très important, étant donné la variabilité des terrains dans ces nappes. Il peut parfois être nécessaire d'y effectuer plusieurs essais.

Il en est de même pour la restitution des eaux à la nappe, puisque la réinfiltration dans le sol suit les mêmes règles théoriques que le pompage, à la différence qu'elle peut s'effectuer dans la zone non saturée de l'aquifère.

Le débit à pomper est généralement défini par la puissance requise dans une installation. La puissance thermique « globale » instantanée fournie par l'eau (sans traitement par la pompe à chaleur) s'exprime de la façon suivante (Allen et al., 2003 ; Courtois et al., 2007) :

$$P_g = C_{v_e} \cdot Q \cdot \Delta T$$

Avec P_g = puissance globale extractible (kW) ; C_{v_e} = capacité calorifique de l'eau (kJ/m³/K) ; Q = débit de pompage/injection ; ΔT = réduction de température dans la pompe à chaleur.

Les résultats de ce calcul seront donc proportionnels principalement aux débits qu'il est possible de pomper dans l'aquifère, et augmenteront avec la différence de température.

7.10 Exploitabilité géothermique des nappes genevoises

7.10.1 Cas général

Les possibilités techniques d'exploitation des nappes reposent sur 3 critères principaux :

- la perméabilité des terrains qui peut varier énormément en fonction de leur teneur en particules fines. Elle peut passer de 10⁻⁵ à 10⁻⁶ m/s dans des terrains limoneux et argileux à plus de 10⁻³ m/s dans des graviers propres. Ce paramètre peut donc varier d'un facteur 10, 100 ou 1'000, parfois au sein d'une même nappe (notamment dans les nappes superficielles). On rappellera que le débit qu'il est possible de soutirer à la nappe est proportionnel à la perméabilité de celle-ci. Les perméabilités moyennes des nappes, assez bien connues à Genève, permettent d'estimer un potentiel, lui aussi moyen. Cependant, la variabilité évoquée implique pour un projet particulier qu'il faut préalablement définir les paramètres à considérer par des reconnaissances détaillées (voir chapitre 7.8.1)
- l'épaisseur de la nappe, paramètre important dont la variabilité est également importante (1 m à quelques dizaines de mètres à Genève). Dans les nappes superficielles, cette variabilité est de l'ordre de l'épaisseur de la nappe, et délimite des zones où l'épaisseur est favorable et d'autres où l'imperméable remonte jusqu'au toit de la nappe.
- le gradient hydraulique, qui varie peu à Genève : de l'ordre de 0.3 à 1 %.

Pour une installation de puissance donnée et dans des conditions cadres bien définies, il est possible de calculer une puissance exploitable unitaire en W/m² en fonction de l'emprise thermique après 30 ans d'exploitation, ceci dans l'hypothèse où on ne pratique pas de recharge thermique.

Des simulations de cas généraux ont été faites avec le logiciel GED dans le cadre du PGN (2008), en faisant varier ces paramètres de la manière suivante :

- perméabilité de 10⁻³, 10⁻⁴ et 10⁻⁵ m/s
- épaisseur de 5, 10 et 15 m
- gradient hydraulique de 0.5% et 1%

Pour chacun de ces cas, des installations de 10, 50, 100 et 200 kW thermique ont été simulées avec un coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur de 5⁴, sur une période de 30 ans. L'emprise a été estimée en mesurant la distance latérale et longitudinale à laquelle la température de l'eau est inférieure de 1°C par rapport à l'état initial depuis le ou les puits de réinjection de l'eau. L'exploitation a été jugée impossible lorsque plus de 5 puits sont nécessaires pour éviter que la zone d'un diamètre de 100 m autour des puits ne se modifie de plus de 3°C. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 7-4.

Il s'agit d'une première estimation très générale et schématique, basée uniquement sur une installation pour du chauffage, ce qui n'est pas le cas le plus favorable, mais donne néanmoins un premier ordre de grandeur des potentiels en jeu.

Ce tableau met en évidence la grande influence de la perméabilité sur les possibilités d'exploitation thermique d'une nappe phréatique. Si la perméabilité est suffisamment élevée (10^{-3} m/s), il est toujours possible d'exploiter beaucoup d'énergie. Plusieurs puits de rejet peuvent être prévus dans le cas où le panache est trop étendu. En effet, dans ces conditions le panache thermique a une très faible extension latérale mais s'étend très loin à l'aval. Les zones à perméabilité élevées sont peu limitées par le rabattement au puits. Elles sont très adaptées pour alimenter de grandes exploitations.

Lorsque la perméabilité est moyenne (10^{-4} m/s), de grandes quantités d'énergie sont encore exploitables. Dans ce cas, l'épaisseur et le gradient hydraulique ont plus d'influence et peuvent limiter les possibilités d'exploitation s'ils sont trop faibles. Il est important de noter que dans ce cas, le potentiel est sous-estimé, puisque les simulations tiennent compte d'une utilisation pour le chauffage uniquement. Des quantités plus importantes d'énergie peuvent être exploitées dans ces gammes de perméabilité si une utilisation estivale de la nappe phréatique ou un stockage thermique par une utilisation en doublet réversible sont réalisés. Le panache thermique s'étend surtout vers l'aval mais également latéralement. Dans certains cas (grande demande d'énergie), plusieurs puits de pompage sont nécessaires pour obtenir des débits suffisants.

Lorsque la perméabilité est faible (10^{-5} m/s), les possibilités d'exploitation sont très limitées, à cause du rabattement induit aux puits de pompage et de l'extension du panache thermique. Il n'est souvent pas possible de prélever de grandes quantités d'énergie du sous-sol et la surface d'influence est en général assez importante. La distance à respecter entre les puits est en conséquence très élevée, ce qui implique d'avoir une grande surface à disposition pour installer le système. Si une installation simple n'est pas envisageable, un doublet thermique peut être utilisé dans ces zones à faible perméabilité. Ici, c'est la faible perméabilité des terrains qui constitue le facteur limitant principal en ne permettant plus de pomper ni d'infiltrer le débit nécessaire pour une exploitation thermique.

⁴ soit une puissance extraite dans la nappe de 8, 40, 80 et 160 kW

Tableau 7-4. Surface d'emprise d'une installation d'exploitation de la chaleur de la nappe phréatique, en fonction de la perméabilité, de l'épaisseur et du gradient hydraulique de l'aquifère, ainsi que de la puissance thermique installée.

P_{th} (P_n) [kW]	E [m]	Nb	D P-I [m]	D P-P [m]	DLong [m]	DLat [m]	S [m²]	P_{th}/S [W/m²]
Perméabilité de 10⁻³ m/s, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique ~ 1000 m/an								
50 (40)	5	2	20	10	5000	40	200'000	0.25
	10	1	20	-	1200	20	24'000	2.08
	15	1	20	-	500	15	7500	6.67
100 (80)	5	3	20	20	8500	80	680'000	0.15
	10	2	20	20	4200	45	189'000	0.53
	15	1	20	-	2000	30	60'000	1.67
200 (160)	5	4	20	25	10000	145	1'450'000	0.14
	10	3	20	25	8500	80	680'000	0.29
	15	2	20	25	7000	55	385'000	0.52
Perméabilité de 10⁻³ m/s, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique ~ 2000 m/an								
50 (40)	5	1	20	-	2100	20	42'000	1.19
	10	1	20	-	490	11	5390	9.28
	15	1	20	-	115	6	690	72.46
100 (80)	5	2	20	10	9000	40	360'000	0.28
	10	1	20	-	2100	20	42'000	2.38
	15	1	20	-	900	14	12'600	7.94
200 (160)	5	3	20	25	17000	80	1'360'000	0.15
	10	2	20	20	8500	45	382'500	0.52
	15	1	20	-	3900	24	93'600	2.14
Perméabilité de 10⁻⁴ m/s, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique ~ 100 m/an								
50 (40)	5	5	100	75	950	410	389'500	0.13
	10	4	50	30	1000	170	170'000	0.29
	15	3	50	25	950	120	114'000	0.44
100 (80)	5							
	10	5	100	75	950	410	389'500	0.26
	15	5	50	50	950	260	247'000	0.40
200 (160)	5							
	10							
	15							

P_{th} (P_n) [kW]	E [m]	Nb	D P-I [m]	D P-P [m]	D _{Long} [m]	D _{Lat} [m]	S [m ²]	P_{th}/S [W/m ²]
Perméabilité de 10⁻⁴ m/s, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique ~ 200 m/an								
50 (40)	5	8	50	25	2000	170	340'000	0.15
	10	3	50	25	1800	100	180'000	0.28
	15	2	50	25	1600	65	104'000	0.48
100 (80)	5							
	10	4	50	30	2000	170	340'000	0.29
	15	3	50	25	1900	120	228'000	0.44
200 (160)	5							
	10							
	15	5	50	50	1900	270	513'000	0.39
Perméabilité de 10⁻⁵ m/s, gradient hydraulique de 0.5 %, vitesse du front thermique ~ 10 m/an								
50 (40)	5							
	10							
	15	5	100	75	230	460	105'800	0.47
100 (80)	5							
	10							
	15	5	100	50	280	600	168'000	0.60
200 (160)	5							
	10							
	15							
Perméabilité de 10⁻⁵ m/s, gradient hydraulique de 1 %, vitesse du front thermique ~ 20 m/an								
50 (40)	5							
	10							
	15	5	50	75	250	410	102'500	0.49
100 (80)	5							
	10							
	15							
200 (160)	5							
	10							
	15							

- P_{th} : puissance thermique de la pompe à chaleur installée [kW]
 P_n : puissance à l'évaporateur de la PAC prélevée à la nappe souterraine [kW]
 E : épaisseur de l'aquifère [m]
 Nb : nombre de doublets
 D P – I : distance entre le puits de pompage et le puits de réinjection [m]
 D P – P : distance entre deux doublets [m]
 D_{Long} : distance longitudinale d'influence de l'installation [m]
 D_{Lat} : distance latérale d'influence de l'installation [m]
 S : surface d'influence de l'installation [m]
 P_{th}/S : puissance unitaire

7.10.2 Méthodologie

Remarques préalables

L'exploitabilité géothermique des nappes repose sur quatre critères principaux :

- La **productivité** de l'aquifère : elle correspond au débit qui peut être prélevé. Elle dépend principalement de la perméabilité de l'aquifère et de son épaisseur.
- La **profondeur d'accès à la ressource** : cette profondeur correspond au niveau piézométrique de la nappe dans le cas d'un aquifère libre, et au toit de la nappe si l'aquifère est captif. Ce critère est dit « économique » car il permet d'appréhender le coût d'une opération géothermique, qui est fonction, entre autres, de la profondeur de forage nécessaire pour atteindre la ressource.
- La **température de la ressource** : le rendement d'une opération géothermique avec pompe à chaleur dépend de la température de la ressource exploitée ; plus celle-ci est élevée, meilleur est le rendement de l'installation.
- La **demande énergétique** : une nappe située dans une partie du canton non habitée et à faible développement n'aura qu'un faible potentiel d'installation géothermique, même si des conditions hydrogéologiques favorables sont réunies. De même, une nappe avec des caractéristiques qui ne permettent son exploitation que par de petites installations ne sera pas utile si elle se situe sous un centre de développement important (immeubles et bâtiments industriels par exemple).

Les points suivants de ce chapitre proposent une approche plus détaillée des estimations des potentiels thermiques des différentes nappes genevoises. Les résultats des calculs effectués restent toutefois indicatifs car réalisés à partir d'hypothèses simplificatrices des conditions naturelles. Ils doivent donc être considérés comme des ordres de grandeur et non pas comme des valeurs limites d'exploitation, d'autant plus que dans les cas se révélant moins favorables, une recharge thermique à basse enthalpie par des moyens simples pourra toujours être envisagée.

Bases pour le calcul du potentiel

La puissance exploitable dans une nappe phréatique dépend principalement de la perméabilité des terrains, de l'épaisseur de la nappe et du gradient hydraulique. Ces valeurs déterminent non seulement le débit exploitable dans un ouvrage donné mais également, et surtout, une emprise thermique théorique d'une installation de captage avec rejet dans la nappe. Ce facteur devient en effet prépondérant pour limiter ou éviter l'interaction d'un ouvrage sur l'autre.

Le calcul du potentiel des nappes s'appuie sur les résultats obtenus grâce au logiciel GED pour une installation et dont les résultats figurent dans le tableau 7-4 et parmi lesquels on trouve l'extension du panache thermique et la puissance exploitable unitaire en W/m^2 .

Cette extension comparée à celle totale utilisable de la nappe fournit un ordre de grandeur du nombre d'installations possibles (Figure 7-11). On peut ensuite y appliquer la puissance unitaire dans chaque nappe ou secteur de nappe ayant des caractéristiques hydrauliques équivalentes.

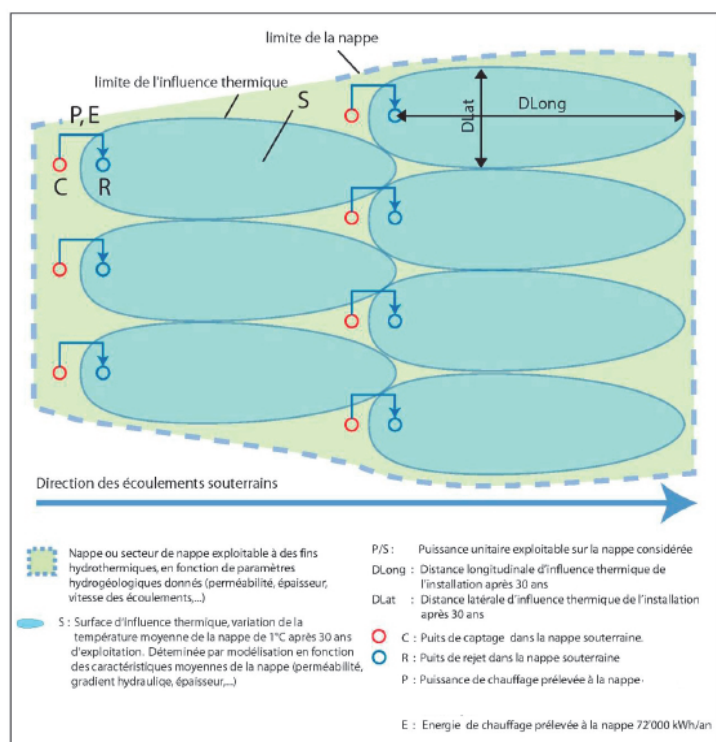


Figure 7-11. Méthode de calcul du potentiel d'exploitation de chaleur de la nappe phréatique par modélisation de la surface d'influence thermique après 30 ans d'exploitation au moyen du logiciel GED (PDGN, 2010)

En principe, la surface de l'emprise thermique varie avec la puissance de l'installation de façon non linéaire. Ainsi, en théorie, la puissance unitaire exploitable par unité de surface est inférieure dans le cas de grandes installations. En réalité, il faut tenir compte de l'efficacité accrue des grandes installations et de la diminution des risques d'influences thermiques mutuelles. Le calcul a été fait sur les bases suivantes :

- **Nappes principales** : installation de puissance faible à moyenne (50 kW) avec un prélèvement de 40 kW dans la nappe (COP=5)
- **Nappes superficielles** : installation de puissance faible (10 kW) avec un prélèvement de 8 kW dans la nappe (COP=5)
- Débit rejeté à l'aval des écoulements souterrains à une distance suffisante pour éviter les phénomènes de recyclage thermique (temps de percement thermique trop faible).

Il faut noter que les puissances utilisées (50 kW et 10 kW) représentent vraisemblablement la limite inférieure de l'exploitabilité économique de la nappe, des installations de plus grande taille étant économiquement plus rentables.

Les limites de l'influence thermique sont fixées à un refroidissement ou à un réchauffement de la nappe de 1°C par rapport à son état naturel après 30 ans d'exploitation (Figure 7-11).

L'impact thermique du rejet doit répondre aux exigences légales : la modification de la température de la nappe par rapport à son état naturel doit être inférieure à 3°C au-delà d'un rayon de 100 m à partir du point de rejet. Afin de répondre à cette exigence, notamment dans les terrains moyennement perméables, le nombre de doublets a parfois été augmenté (Figure 7-12). Bien que nous ayons simplement ajouté des doublets (ce qui est une contrainte du programme GED), il faut mentionner que dans un cas réel on peut prévoir un seul puits de pompage pour plusieurs puits de rejet, ce qui diminuerait de beaucoup le coût d'une telle installation.

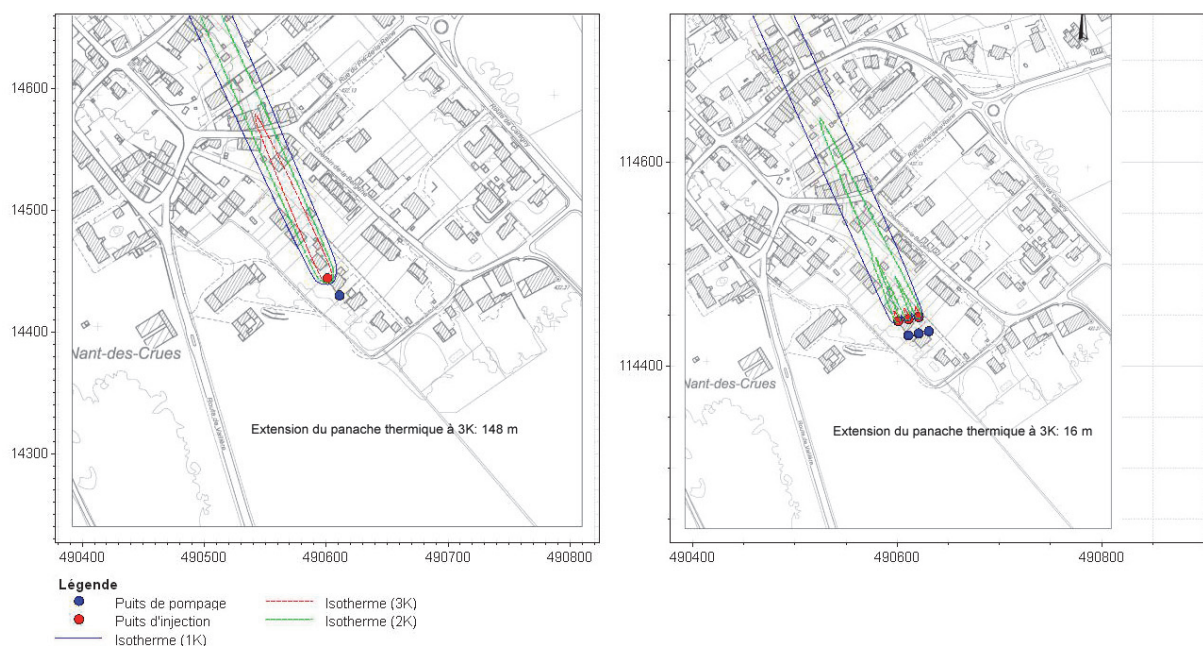


Figure 7-12. Comparaison de simulations GED pour une installation avec un ou trois doublets dans la nappe de la Champagne. Comme on peut le constater, les isothermes de 3°C et 2°C se réduisent considérablement dans le cas de puits multiples.

La simulation est réalisée dans un cadre très général, pour un milieu homogène et uniforme. Elle ne tient pas compte des conditions aux limites de l'aquifère, comme les phénomènes de recharge latérale, par les précipitations ou par les cours d'eau.

La simulation pour le calcul du potentiel unitaire est réalisée pour l'exploitation de la chaleur en hiver seulement. Elle ne tient pas compte des possibilités de recharge saisonnière et de gestion équilibrée de la chaleur et du froid de la nappe, qui peuvent permettre d'augmenter considérablement l'énergie exploitable durant la période de chauffage, tout en respectant les contraintes législatives.

L'exploitation de la nappe pour la production de froid doit naturellement être considérée. Cependant, comme la réponse du milieu à un rejet de chaleur (sans recharge) est identique à un rejet de froid (sans recharge), nous avons considéré que l'énergie soutirée à la nappe pour la production de froid sera égale à celle soutirée pour la production de chaleur. Les panaches thermique seront donc de même dimension (mais l'un chaud, et l'autre froid). Cette énergie pourra être exploitée directement par géocooling.

Approche choisie

- 1) Etude individuelle par nappe en séparant les nappes principales des nappes superficielles.
- 2) Evaluation du potentiel de la ressource - Calcul de l'énergie thermique exploitable pour l'ensemble d'une nappe - en utilisant la puissance unitaire exploitable par unité de surface de la nappe (selon 7.10.1).
- 3) Prise en compte du plan d'aménagement cantonal pour nuancer le potentiel d'utilisation des nappes.
- 4) Estimation de l'intérêt de la ressource en fonction du contexte local (possibilités de valorisation).
- 5) Recommandations particulières.

Il est à noter que nous n'avons pas privilégié une approche individualisée par commune, compte tenu de l'aspect intercommunal de l'extension des nappes. Pour chaque nappe, nous préciserons toutefois les communes concernées.

7.10.3 Exploitabilité des nappes principales

On rappellera que pour ces nappes, les simulations ont été effectuées pour une installation de puissance faible à moyenne (50 kW) avec un prélèvement de 40 kW dans la nappe (COP=5). Au vu des coûts de réalisation, il s'agit d'une limite inférieure de puissance. Les principaux résultats sont présentés dans les points suivants alors que le détail des calculs de potentiel est joint dans le cahier d'annexes.

Dans un premier temps, nous avons appliqué le potentiel unitaire à l'ensemble de la nappe concernée pour en estimer le potentiel total. Cependant, les installations par doublets traditionnels impliquent une utilisation de proximité. Nous avons donc calculé la surface couverte par les zones constructibles situées directement au-dessus de la nappe, ce qui donne une estimation plus réaliste du potentiel exploitable par doublets. Dans un second temps, seules les zones de développement ont été considérées, ce qui représente un potentiel applicable à court terme.

Les nappes principales offrent toutefois des possibilités de chauffage à distance. Dans ce cas, une installation de pompage de faible emprise en surface pourrait se trouver dans les zones non constructibles (bois et forêts et zones agricoles), avant d'acheminer l'eau sur le site d'utilisation. Avec de telles installations, l'ensemble de la surface de la nappe peut être prise en compte.

NAPPE DE MONTFLEURY

La nappe de Montfleury baigne un remplissage d'Alluvion ancienne dans un important sillon molassique, dit sillon de Montfleury, dont l'axe est orienté NE - SO. Le long de cet axe, la Molasse se trouve à une centaine de mètres de profondeur. La longueur de la nappe est d'environ 12 km pour une largeur moyenne de 1,5 km, et une épaisseur pouvant atteindre 20 à 30 m.

Elle est principalement alimentée par la Versoix à travers la nappe superficielle de Richelien, et se divise en deux branches, l'une partant au sud, en direction de l'aéroport et de Peney et l'autre au N- NW en direction de Versoix pour se déverser dans le lac (Figure 7-13). Dans le bassin de la Versoix, sa profondeur est faible et elle ne possède pas de protection naturelle (secteur A_U de protection des eaux). Elle est en revanche recouverte par une épaisse couche de moraine dans la région de l'aéroport, de Meyrin et de Satigny (secteur B de protection, autorisant l'exploitation géothermique).

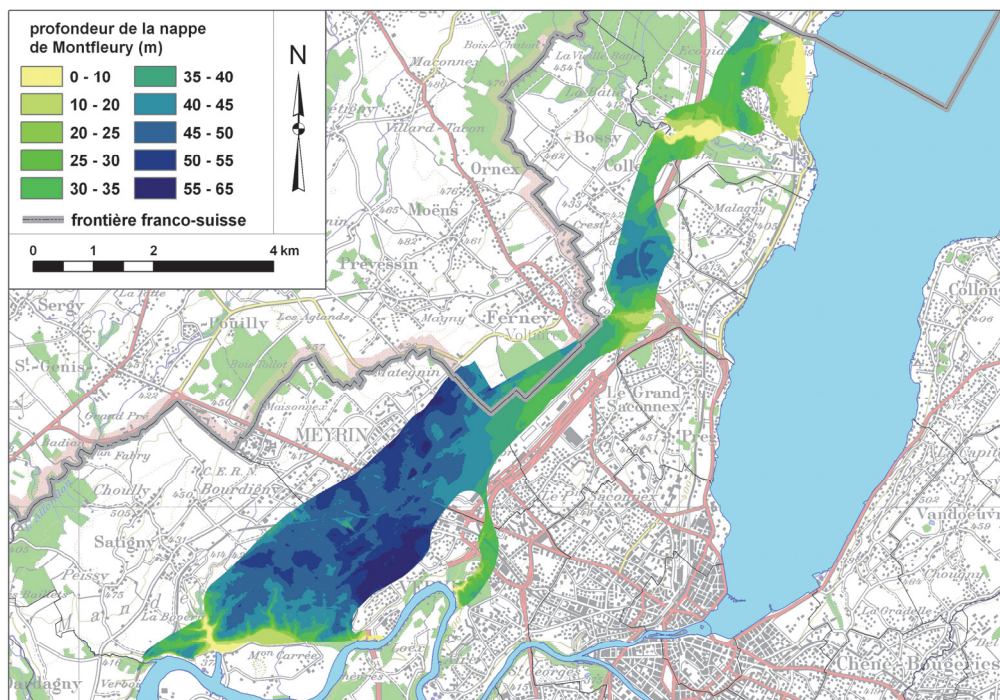


Figure 7-13. Etendue et profondeur de la nappe de Montfleury

La perméabilité de la nappe est estimée entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s, avec une pente piézométrique faible (0.03% sous l'aéroport) pouvant être localement plus importante (1% à Versoix). En considérant une porosité efficace de 10 à 15%, la vitesse d'écoulement réel serait de l'ordre de 0.1 à 5 m/j selon la pente locale de la nappe.

La nappe de Montfleury présente des caractéristiques hydrogéologiques favorables pour une utilisation thermique (perméabilité, épaisseur). Un bémol pourrait cependant être le fait de sa forte profondeur (jusqu'à une cinquantaine de mètres sous l'aéroport et les zones industrielles de Meyrin-Vernier), qui impliquera des frais importants de mise en œuvre (ouvrages de captage et de restitution profonds, énergie de pompage élevée), toutefois largement acceptables pour des projets d'une certaine envergure.

Sur la base des paramètres connus ou estimés de la nappe, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de Montfleury Stot 17'923'444 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
	1.87	33.5	84	67

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation par doublets, la surface totale de la nappe est subdivisée de la manière suivante selon le plan d'aménagement cantonal (Figure 7-14) :

- 55% de zones non constructibles (forêt, agriculture) dans lesquelles une installation géothermique pourrait être envisagée mais impliquant alors un transport de l'eau vers des secteurs d'utilisation (chauffage à distance).
- 45 % de zones constructibles dont :
 - 20 % de zones de développement
 - 13% de zones industrielles

Dans les zones constructibles, l'eau peut être directement utilisée sur place.

En ne considérant que la surface correspondant aux zones construites et constructibles (zones 2, 3, 4 et 5, zones industrielles et aéroportuaire), le potentiel disponible ne représente donc qu'un peu moins de la moitié de celui sur la nappe totale (45%). La puissance potentielle se monte ainsi à environ 15.5 MW, ce qui permet une production potentielle de chaleur de 31 GWh/an. Avec la PAC, la production de chaleur monte à 39 GWh/an. La production de froid soutirée à la nappe équivaut à celle de chaud, donc 31 GWh/an. Une production combinée de chaud et de froid (avec PAC et géocooling) équivaudrait donc à environ 70 GWh/an.

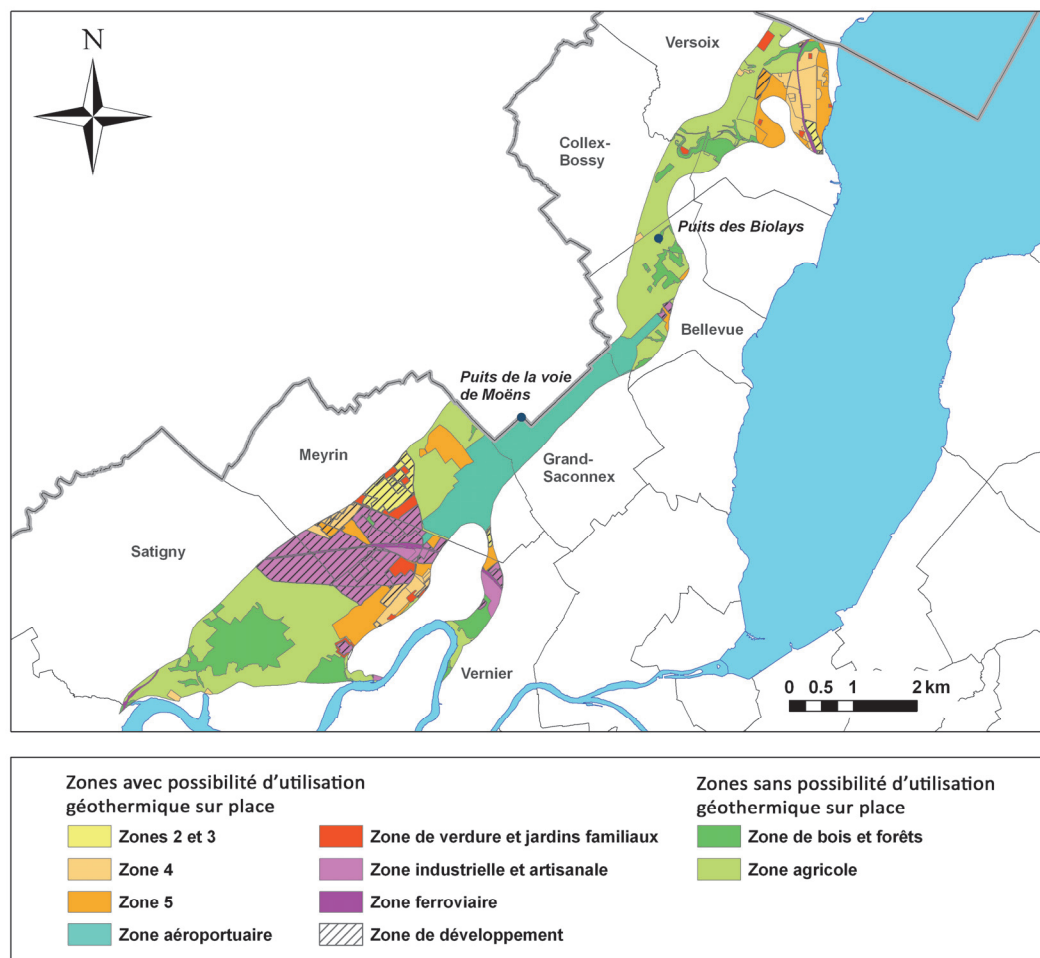


Figure 7-14. Répartition des zones d'aménagement sur la nappe de Montfleury. Les zones 2, 3, 4 et 5 représentent les zones d'habitation.

Les principales zones industrielles situées au droit la nappe de Montfleury se trouvent sur les communes de Meyrin et de Vernier: la ZIMEYSA (Zone Industrielle de Meyrin-Satigny), La ZIMOGA (Zone Industrielle de Mouille-Galand), la ZIRIAN (Zone Industrielle de Riantbosson), la ZILI (Zone Industrielle du Lignon) et d'autres zones moins importantes.

Ces zones industrielles représentent environ 13% de la surface totale de la nappe. Les puissances et énergies obtenues en considérant cette surface représentent donc 13% de l'énergie disponible sur la surface totale de la nappe (cas d'une utilisation sur place, sans considérer un éventuel transport depuis une zone voisine ou plus éloignée). La puissance potentielle est alors de 4.5 MW, et l'énergie potentielle obtenue avec une exploitation de 2000 h/an équivaldrait à 9 GWh/an de production potentielle de chaleur, 11 GWh/an avec la PAC. La production combinée de chaud et de froid se monterait pour sa part à 20 GWh/an.

La nappe de Montfleury présente donc un potentiel thermique important, exploitable notamment dans les zones industrielles de Vernier, Meyrin et Satigny, à l'aéroport et à Versoix (où les conditions hydrogéologiques sont toutefois moins bien connues).

Il est à noter que des ouvrages de captage de grande dimension et en bon état existent déjà sur la nappe (puits de Moëns à l'Aéroport, puits des Biolays vers Collex-Bossy). Autrefois exploités pour l'eau potable, ces puits offrent des possibilités immédiates d'exploitation géothermique. Les puits de Peney, situés un peu plus au Sud dans l'emprise de la nappe du Rhône sont traités dans le chapitre suivant.

NAPPE DU RHÔNE

La Nappe du Rhône est une nappe d'accompagnement du fleuve qui s'étend sur environ 14 km de long, entre la Perle du Lac et Chancy, pour 1.5 km de largeur. Elle est alimentée par le lac et à la fois alimentée et drainée par le Rhône avec lequel elle est en équilibre. Son altitude varie entre 375 et 365 m, avec un gradient piézométrique de 0.2 à 1%. Aux environs du Rhône, sa profondeur est la plus faible. Lorsqu'on s'éloigne de son vallon, sa profondeur devient nettement plus importante sous les plateaux de St Jean, Cartigny, Avully, etc. (Figure 7-15).

L'épaisseur de la couche aquifère est également très variable, allant d'un ou deux mètres à plus de 50 mètres. La perméabilité de la nappe est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, et sa porosité efficace peut être estimée à 10-15%. La vitesse d'écoulement varie ainsi, selon la pente piézométrique de la nappe, d'environ 1 à 5 m/jour.

Elle fait l'objet d'un secteur B de protection des eaux pour l'ensemble de son emprise.

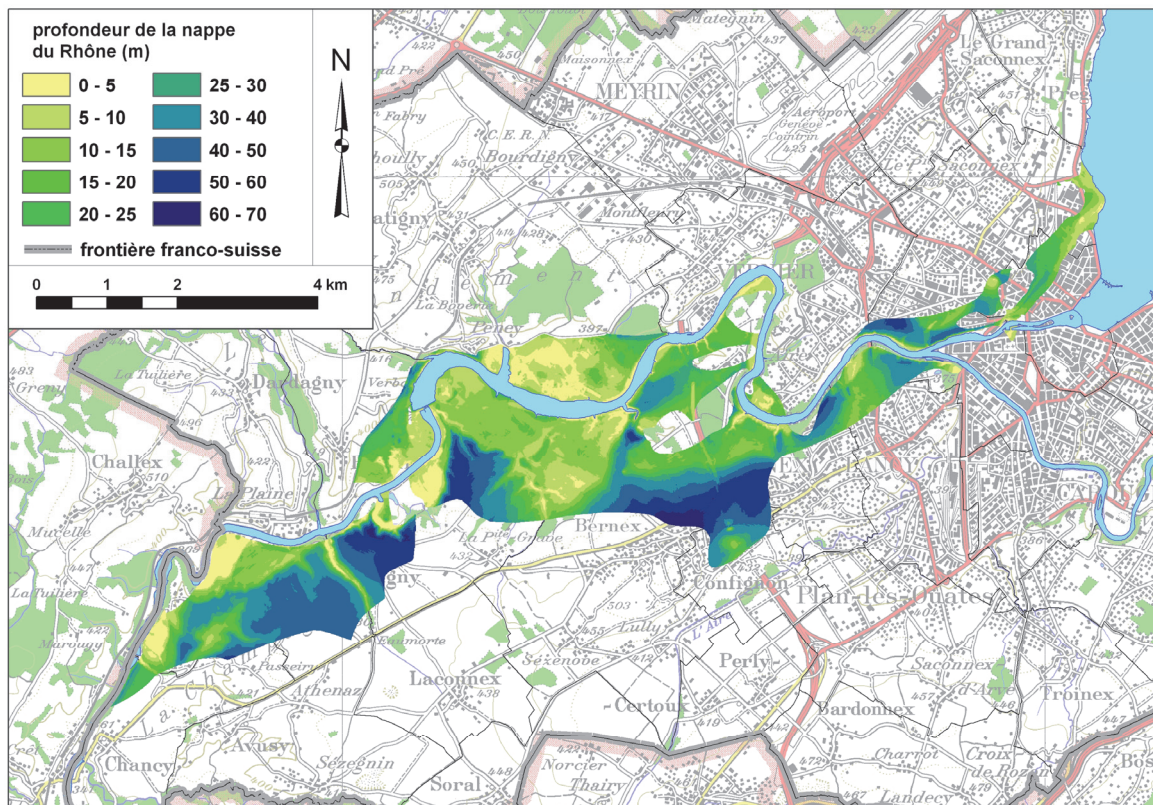


Figure 7-15. Etendue et profondeur de la nappe du Rhône

Comme la nappe de Montfleury, la nappe du Rhône présente des caractéristiques favorables pour une utilisation thermique de par ses dimensions, sa perméabilité et son épaisseur. La profondeur de la nappe est variable, se situant généralement proche de la surface à proximité du Rhône, et s'approfondissant en s'en éloignant.

Sur la base des paramètres connus ou estimés de la nappe, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe du Rhône Stot 22'462'516 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
	1.87	42	105	84

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation, la surface totale de la nappe est subdivisée de la manière suivante selon le plan d'aménagement cantonal (Figure 7-14) :

- 75% de zones non constructibles (forêt, agriculture) dans lesquelles une installation géothermique pourrait être envisagée mais impliquant alors un transport de l'eau vers des secteurs d'utilisation (chauffage à distance).
- 25 % de zones constructibles dont :
 - 13 % de zones de développement
 - 5% de zones industrielles

Dans les zones constructibles, l'eau peut être directement utilisée sur place.

En ne considérant que la surface correspondant aux zones construites et constructibles (zones 2, 3, 4 et 5 et zones industrielles), le potentiel disponible ne représente donc qu'un quart de celui sur la nappe totale (25%). La puissance potentielle se monte donc à environ 10 MW, ce qui permet une production potentielle de chaleur de 21 GWh/an. En considérant une PAC avec un COP de 5, la production potentielle de chaleur est de 26 GWh/an. La production de froid soutirée à la nappe équivaut à celle de chaud, donc 21 GWh/an. Une production combinée de chaud et de froid équivaudrait donc à environ 47 GWh/an.

Le calcul correspondant à ce cas de figure est assez conservatif, car il est possible pour les panaches thermiques de s'étendre au-delà de ces limites.

Relevons encore qu'une installation de pompage pourrait se situer en-dehors des zones constructibles au vu de sa faible emprise et ensuite alimenter les zones bâties grâce à un chauffage à distance.

Comme zones industrielles situées au droit la nappe du Rhône, on citera principalement celle du Bois-de-Bay sur la commune de Satigny (ZIBAY).

Les zones industrielles représentent environ 5% de la surface totale de la nappe. Les puissances et énergies obtenues en considérant cette surface représentent donc également 5% de l'énergie disponible sur la surface totale de la nappe (cas d'une utilisation sur place, sans considérer un éventuel transport depuis une zone voisine ou plus éloignée). La puissance potentielle est alors de 2 MW, et l'énergie potentielle obtenue avec une exploitation de 2000 h/an équivaudrait à 4 GWh/an de production potentielle de chaleur, 5 avec la PAC. La production combinée de chaud et de froid se monterait ainsi à 9 GWh/an.

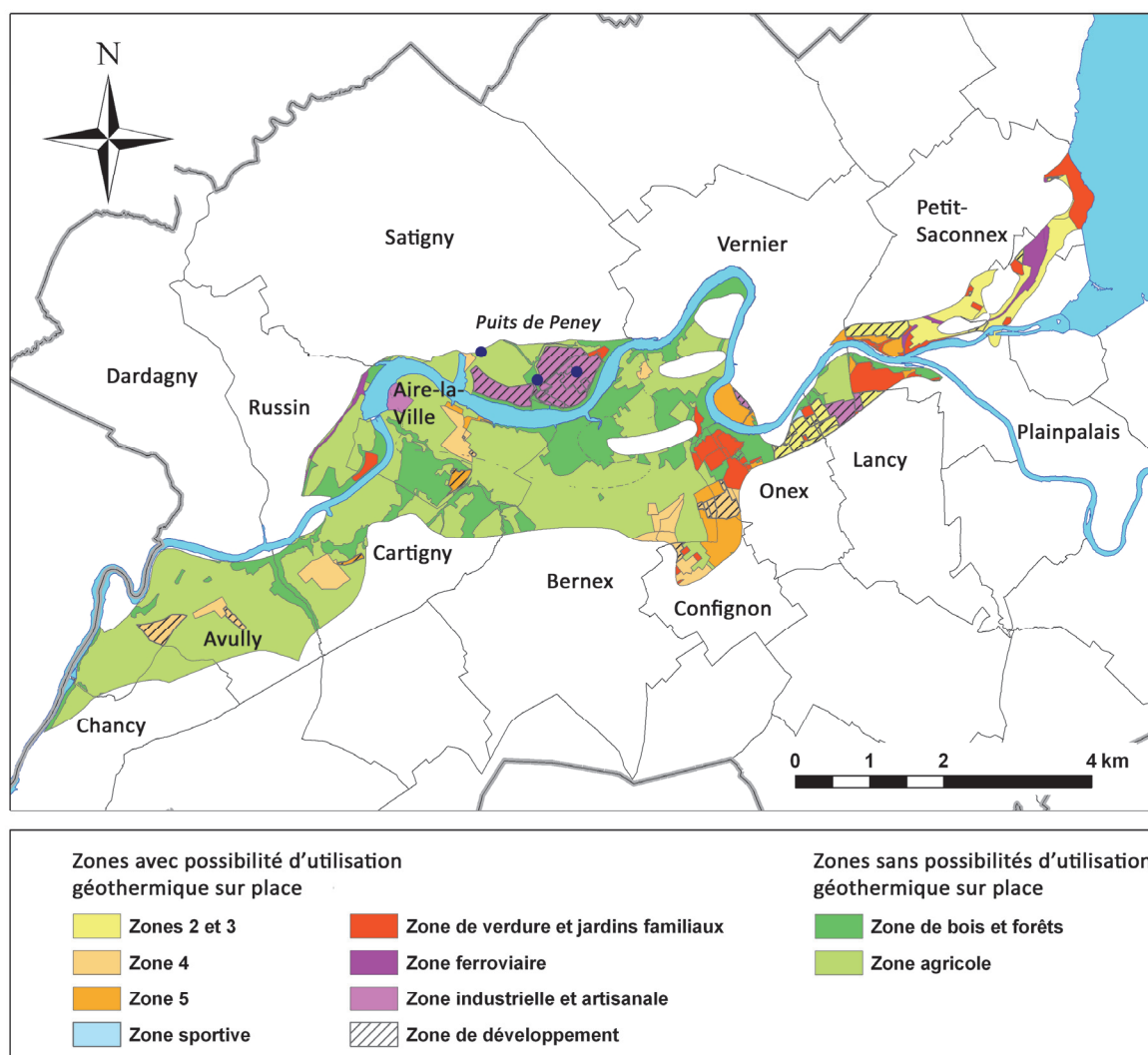


Figure 7-16. Répartition des zones d'aménagement sur la nappe du Rhône. Les zones 2, 3, 4 et 5 représentent les zones d'habitation.

La nappe du Rhône présente un potentiel thermique important, exploitable sur place notamment à la ZIBAY (Satigny), en Ville de Genève ou dans des communes suburbaines comme Lancy ou Onex. Elle pourrait également être utilisée au-delà de son emprise par le biais d'un chauffage ou d'un refroidissement à distance. A cet égard, on citera les trois puits de Peney dans le secteur du Bois-de-Bay, qui, il y a quelques années encore, alimentaient le CERN en eau de refroidissement, avec un débit total pouvant atteindre 800 m³/h. Ces puits offrent des possibilités intéressantes d'exploitation géothermique, et leur réutilisation est par exemple envisagée pour un réseau de chauffage à distance dans le nouveau PLQ des Vergers, situé sur la commune de Meyrin et en dehors de l'emprise de la nappe. Cette exploitation pourrait satisfaire à une puissance de 4'300 à 7'500 kW. Cependant, cela impliquerait d'abaisser la température d'au moins 4.5°C (voire même jusqu'à 8°C), et la réinjection dans la nappe n'est pas possible en raison de l'impact thermique et de la distance entre Les Vergers et la nappe (CSD, 2010).

NAPPE DU GENEVOIS

La plus grande des nappes principales est la nappe du Genevois. Elle se situe dans la partie sud du canton, avec une longueur d'environ 18 km pour une largeur d'environ 2 km. Son épaisseur est de 20 à 30 m en moyenne, mais peut aller jusqu'à 40 m. Ses sources d'alimentation sont l'infiltration naturelle des eaux de pluie, l'infiltration naturelle des eaux de l'Arve, en particulier en période de crues et enfin une réalimentation artificielle à Vessy. Depuis la région de l'Arve, elle s'écoule vers le nord (en direction du lac) et vers le sud-ouest (Bardonnex, Chancy).

Elle est située en secteur A_U de protection des eaux dans le Val d'Arve, car sa profondeur y est de quelques mètres seulement et sa protection naturelle très réduite. Ailleurs, sa profondeur est en revanche de plusieurs dizaines de mètres et elle fait alors l'objet d'un secteur B de protection des eaux. Elle s'écoule d'une altitude d'environ 374 m jusqu'à environ 365 m au niveau de Chancy, avec une pente piézométrique variant entre 0.05 % et 1%. La perméabilité de l'Alluvion ancienne dans la nappe est variable mais reste relativement élevée, allant de $5 \cdot 10^{-4}$ à $1 \cdot 10^{-2}$ m/s.

Cette nappe réunit de très bonnes conditions d'exploitabilité (bonne perméabilité, épaisseur conséquente) et d'utilisation (proportion importante de zones urbaines et suburbaines), mais son utilisation thermique n'est pas autorisée en raison de son exploitation prioritaire pour l'alimentation en eau potable.

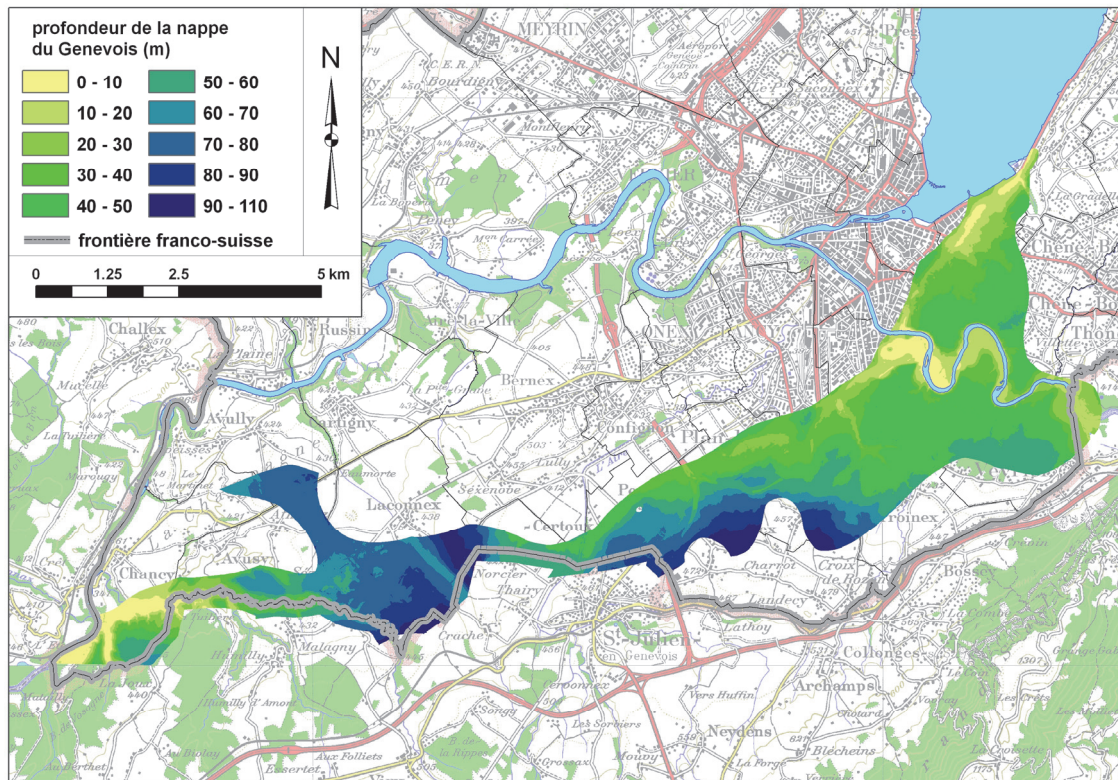


Figure 7-17. Etendue et profondeur de la nappe du Genevois

NAPPE DE L'ALLONDON

Cette nappe est connectée au bassin de l'Allondon, et suit la rivière jusque dans le Rhône. Contrairement aux autres nappes principales, relativement peu de données sont disponibles sur cet aquifère. Sa profondeur est faible à proximité de la rivière (Figure 7-18). Elle fait l'objet d'un secteur A_U de protection des eaux sur sa plus grande partie car elle est exploitée pour l'approvisionnement en eau potable.

La nappe s'écoule depuis une altitude maximale d'environ 388 m dans sa partie nord jusqu'à environ 339 m à la hauteur du Rhône à son extrémité sud. L'épaisseur de la couche aquifère varie entre 1 et 20 mètres et sa perméabilité est de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m/s.

Cette nappe, qui présente des caractéristiques hydrogéologiques plutôt favorables, est également utilisée pour fournir de l'eau potable. Son exploitation thermique n'est donc pas autorisée dans le secteur de Russin - Dardagny (secteur à faible demande). En revanche, elle pourrait être exploitée dans sa partie terminale à la Plaine, en bordure du Rhône, conjointement à la nappe superficielle de la Plaine.

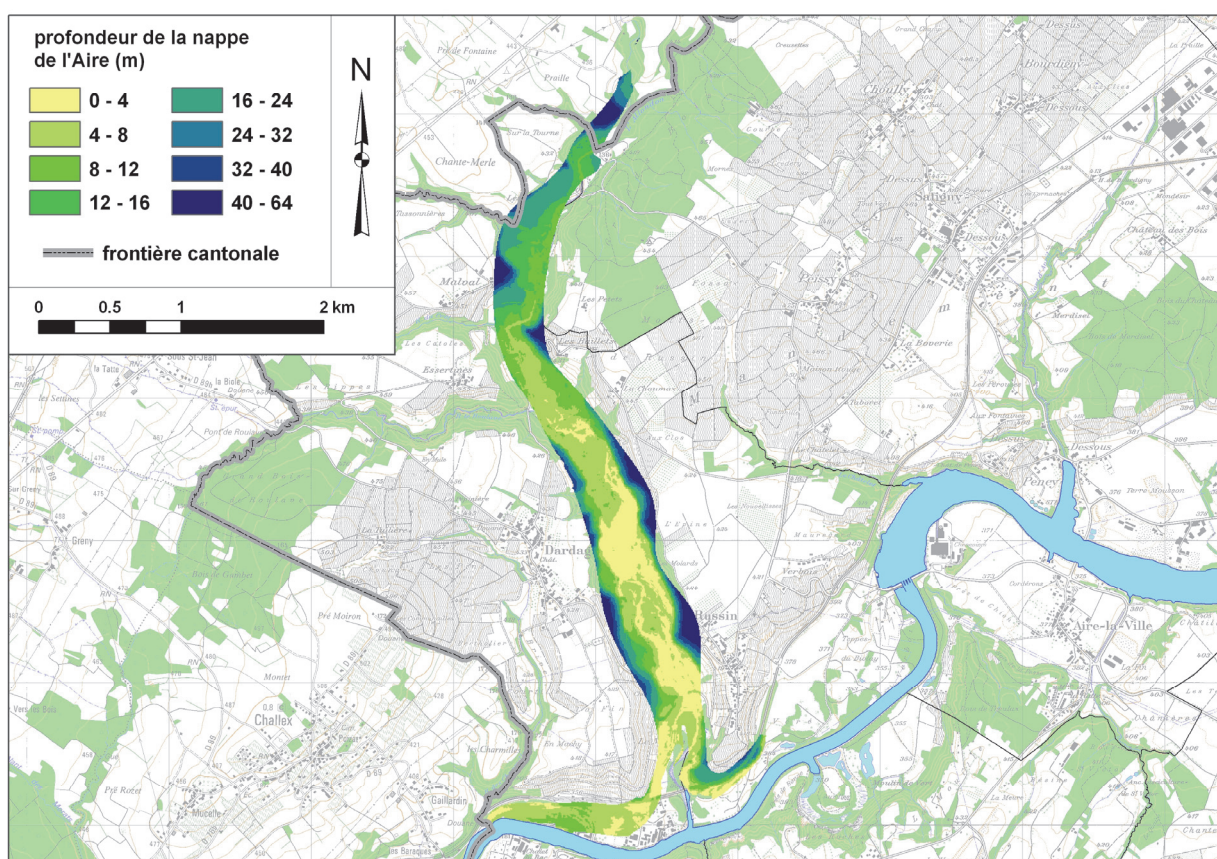


Figure 7-18. Etendue et profondeur de la nappe de l'Allondon

NAPPE DE COLLONGE-HERMANCE

Cette nappe n'a été caractérisée que très récemment. Bien que n'étant pas strictement classée comme « nappe principale », nous avons choisi l'option de l'intégrer à cette catégorie en raison de ses caractéristiques. Elle se situe dans un sillon d'Alluvion ancienne parallèle au lac sous les communes de Collonge-Bellerive, Corsier, Anières et Hermance. Elle a été exploitée au début du 20^{ème} siècle, mise en bouteille et vendue sous l'appellation « Eau d'Hermance ». Il n'en reste pas moins que son étendue est, pour l'heure, mal connue car il existe peu de forages l'ayant atteinte.

Il est donc difficile d'estimer son potentiel. Etant donné qu'elle se situe dans les graviers de l'Alluvion ancienne, ses caractéristiques hydrogéologiques sont probablement favorables mais il existe encore trop d'incertitudes qui rendent encore aléatoire la prise en compte de son exploitation pour un projet situé dans les communes concernées. Son cas devra toutefois être réévalué périodiquement en fonction des nouvelles données acquises au fil des ans (études diverses, forages).

Elle ne fait pour l'instant l'objet d'aucun secteur de protection particulier, et pourrait en principe être exploitée géothermiquement.

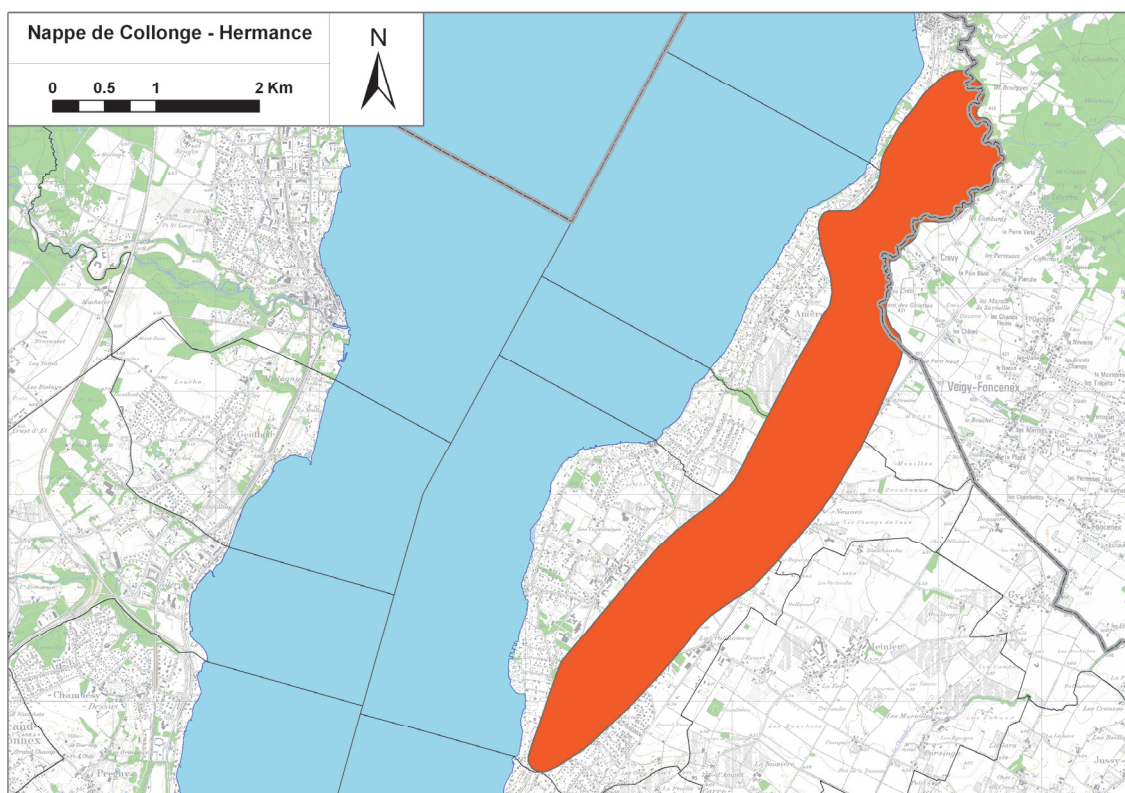


Figure 7-19. Etendue supposée de la nappe de Collonge - Hermance

NAPPES PRINCIPALES - SYNTHÈSE

A l'heure actuelle, seules 2 des 5 nappes principales genevoises (y compris la nappe de Collonge – Hermance) sont réellement exploitables pour la géothermie (nappe de Montfleury et nappe du Rhône). En effet, les nappes du Genevois et de l'Allondon sont interdites à cet égard en raison de leur exploitation pour l'eau potable et la nappe de Collonge-Hermance est à ce jour encore trop méconnue pour y considérer un projet de façon fiable.

En revanche, les propriétés hydrogéologiques des nappes du Rhône et de Montfleury, sont favorables à l'exploitation géothermique. Leur perméabilité et leur épaisseur permettent de considérer des pompages avec des débits importants, aptes à être utilisés pour des projets conséquents, soit au droit de leur emprise, soit délocalisés par l'intermédiaire d'un réseau de transport à distance (CAD). Pour des projets de plus petite envergure, la profondeur souvent importante des nappes représente la limitation principale en regard des coûts induits sur la réalisation des ouvrages de captage et de restitution.

Le tableau suivant résume **le potentiel thermique total des nappes principales** à l'échelle cantonale.

Nappe	Potentiel unitaire de la nappe (W/m ²)	Puissance thermique de la nappe (MW)	Energie thermique de la nappe (utilisation 2000h) (GWh/an)	Production avec PAC (COP = 5) (GWh/an)	Production potentielle rafaichissement (geocooling) (GWh/an)	Potentiel chaud + froid (GWh/an)
Montfleury	1.87	33.5	67	84	67	151
Rhône	1.87	42	84	105	84	189
Genevois	Interdiction d'utilisation					
Allondon	Interdiction d'utilisation (sauf la Plaine)					
Collonge - Hermance	Potentiel indéterminé					
total	-	75.5	151	189	151	340

Il s'agit là d'un potentiel total pour toute l'emprise des nappes, sans prise en compte des zones d'aménagement. **En considérant uniquement les secteurs de nappes situés sous les zones construites ou constructibles (donc avec l'hypothèse d'une exploitation sur place uniquement)**, les valeurs sont les suivantes :

Nappe	Potentiel unitaire de la nappe (W/m ²)	Puissance thermique de la nappe (MW)	Energie thermique de la nappe (utilisation 2000h) (GWh/an)	Production avec PAC (COP = 5) (GWh/an)	Production potentielle rafaichissement (geocooling) (GWh/an)	Potentiel chaud + froid (GWh/an)
Montfleury	1.87	16	31	39	31	70
Rhône	1.87	10	21	26	21	47
Genevois	Interdiction d'utilisation					
Allondon	Interdiction d'utilisation (sauf la Plaine)					
Collonge - Hermance	Potentiel indéterminé					
total	-	26	52	65	52	117

Au vu des possibilités de procéder à du chauffage à distance, ces dernières valeurs sont à considérer comme un potentiel minimum. Le potentiel réel est à prendre entre ces minima et les valeurs maximales du premier tableau. Le cas sera différent pour les nappes superficielles (voir point suivant).

Les données de base étant nécessairement très simplifiées, il convient de considérer ces résultats en termes d'ordre de grandeur. En effet, les caractéristiques des nappes telles que l'épaisseur et la perméabilité influencent le potentiel unitaire de façon importante, et peuvent varier considérablement sur une faible distance. De plus, le logiciel GED est également établi sur des bases simplificatrices ne prenant pas en compte, par exemple, la diminution de l'extension du panache thermique en cas d'alternance de production de chaleur et de froid.

Une autre manière d'estimer le potentiel des installations incluant une recharge est de calculer le débit maximum extractible de la nappe. En effet, dans les potentiels calculés, c'est l'équilibre thermique qui limite essentiellement le potentiel. En cas de recharge thermique ou de stockage, c'est la productivité des puits de pompage qui deviendra déterminante. Une estimation générale, se basant sur les mêmes valeurs de perméabilité et d'épaisseur, nous montre que le potentiel des nappes principales serait pratiquement multiplié par un facteur 10 (environ 2000 GWh/an).

7.10.4 Exploitabilité des nappes superficielles

On rappellera que pour ces nappes, des installations de puissance réduite (10 kW) ont été simulées. Cette puissance correspond à celle nécessaire pour chauffer une villa, ce qui représente la limite inférieure de puissance d'un point de vue économique. Il en résulte que la puissance unitaire calculée est souvent plus élevée que pour les nappes principales (voir point 7.10.1 et tableau 7-4) car la relation entre la puissance et la surface d'emprise thermique de l'installation n'est pas linéaire. Les principaux résultats sont présentés dans les points suivants alors que le détail des calculs de potentiel est joint dans le cahier d'annexes.

Sur toutes les nappes superficielles, l'installation devra être précédée d'une étude détaillée de dimensionnement, incluant au moins deux forages et un essai de pompage

NAPPE DE LA CHAMPAGNE

Il s'agit de la plus grande nappe superficielle du canton, avec une longueur de 5'300 m pour une largeur de 4'500 m. Elle ne présente pas de sens d'écoulement unique et alimente plus d'une dizaine de cours d'eau par des résurgences multiples, notamment de nombreuses sources. Son alimentation se fait principalement par infiltration des eaux de pluie.

Le point le plus haut de la nappe est situé dans la région de Soral avec une altitude d'environ 438 m. Elle s'écoule ensuite en éventail vers le sud-ouest (La Laire), le Nord-Ouest (Avully) et le Nord (Cartigny). Sa profondeur est variable mais se situe le plus souvent au-dessous de 5 à 10 m (Figure 7-20). Les perméabilités sont également très variables, passant de 10^{-3} m/s dans les graviers à 10^{-6} m/s dans les limons.

La nappe de la Champagne s'étend dans des sédiments graveleux et sableux à limoneux de la déglaciation würmienne (6a et 6b et 6c dans la classification des sols genevois) sur le vaste plateau du même nom situé entre les villages de Cartigny, Avully, Avusy, Sézegnin, Soral et Laconnex. Son épaisseur moyenne est de quelques mètres, mais elle peut varier de moins d'un mètre à plus de 20 m, avec également des zones où l'imperméable limono-argileux (6d et 6e) remonte plus haut que le niveau de la nappe.

Il faut noter que les graviers et sables de la région ont fait, et font encore, l'objet d'une exploitation intensive (gravières), ce qui entraîne probablement des modifications de l'écoulement des eaux souterraines, et bien entendu une forte modification de la perméabilité dans les zones remblayées. En effet les terrains de remblayage sont le plus souvent peu perméables.

Cette nappe présente globalement d'assez bonnes caractéristiques hydrogéologiques pour permettre son exploitation thermique avec des installations de taille petite à moyenne, correspondant bien au développement de la région.

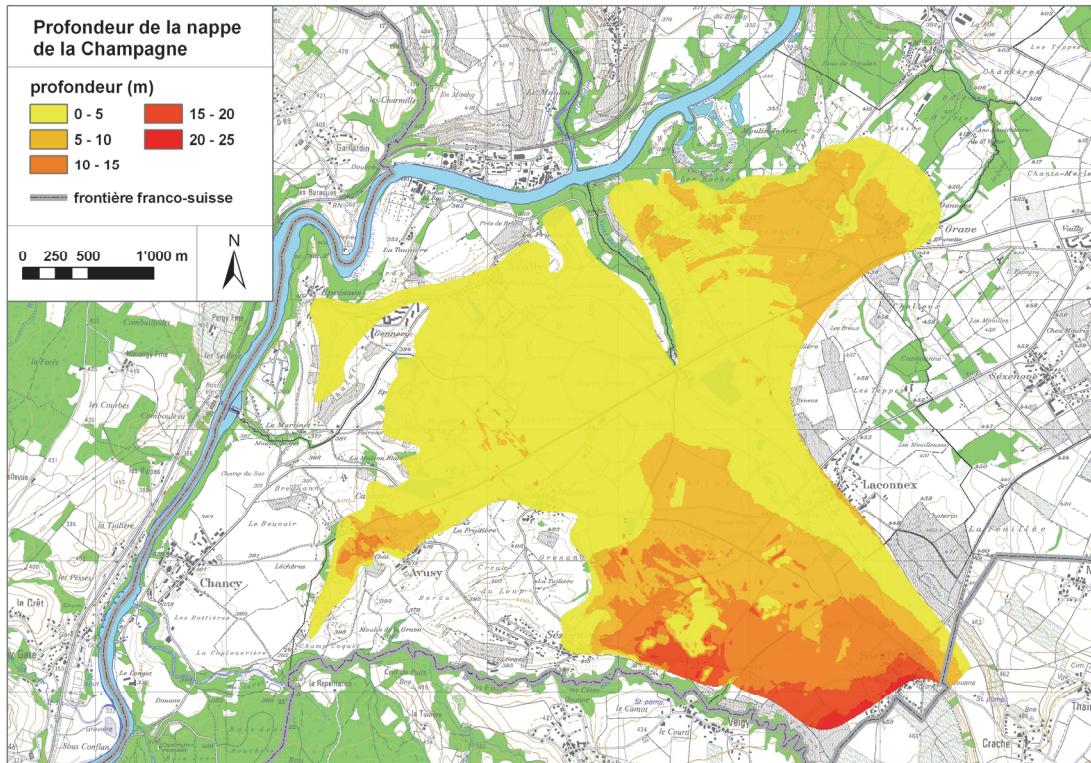


Figure 7-20. Etendue et profondeur de la nappe superficielle de la Champagne

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de la Champagne Stot = 11'909'750 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	2.90	34.5	86	69
Surface exploitable (7%)		2.5	6	4.8

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation, la surface à priori exploitable ne représente toutefois actuellement que 7% de l'étendue totale de la nappe en raison de la très grande proportion de zones agricoles (Figure 7-21). Les zones construites et de développement sont principalement les zones des villages.

Dans ce cas, comme pour les autres nappes superficielles, il ne semble pas réaliste d'envisager un CAD, compte tenu de caractéristiques hydrogéologiques correspondant à des installations de taille petite à moyenne qui devront donc être réalisées et exploitées à proximité des bâtiments concernés.

En conséquence, les valeurs du potentiel total indiquées dans le tableau ci-dessus sont largement surestimées si on considère le potentiel réellement exploitable. Celui-ci sera plutôt de l'ordre de 2.5 MW pour la puissance et de 6 GWh/an pour l'énergie thermique annuelle sur l'ensemble des zones villageoises.

A titre de comparaison, la nouvelle installation communale de chauffage à bois de Cartigny produit 7,9 GWh par an et dessert environ 80% de la population communale à travers un CAD. Sur la zone exploitable de Cartigny, le chauffage par exploitation thermique de la nappe pourrait atteindre à peu près 20% de cette production (environ 1,5 GWh par an). Toutefois il devrait s'agir d'installations individuelles sans CAD, au vu du nombre trop important de puits de pompage et de restitution qui seraient nécessaires dans ce dernier cas.

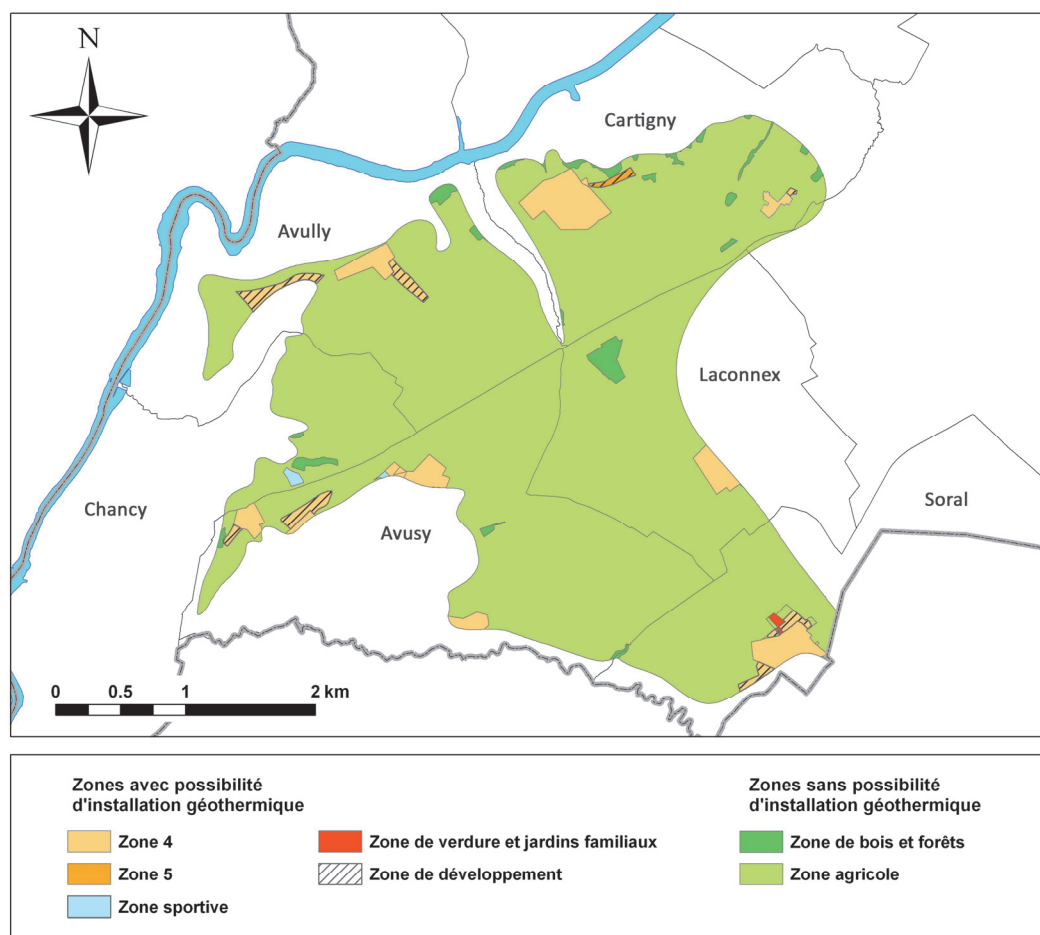


Figure 7-21 : Zones d'aménagement au-dessus de la nappe de la Champagne

En résumé, même si la nappe de la Champagne présente globalement un assez bon potentiel hydrothermique (pour des installations à petite puissance), sa surface exploitable très réduite diminue fortement son intérêt même si des projets individuels ou semi-individuels (2 à 3 maisons au maximum) peuvent parfaitement y être développés sous réserve d'études hydrogéologiques détaillées. La variabilité de la perméabilité et les ondulations du toit de l'imperméable nécessitent en effet une vérification de la faisabilité de tels projets.

NAPPE DE L'AIRE

Cette nappe transfrontalière s'étend sur 4,5 km de longueur pour une largeur de 1,5 km en moyenne dans la plaine de l'Aire. Elle est située dans des graviers alluvionnaires récents avec une altitude d'environ 420 m à l'amont jusqu'à 398 m en aval. Des fluctuations importantes de niveau s'opèrent essentiellement dans la partie haute de la plaine de l'Aire, où il existe une épaisseur plus importante de graviers non saturée. Elle est en charge (ou captive) dans sa partie aval, ce qui péjore les possibilités de réinfiltration (Figure 7-22). La perméabilité moyenne de la nappe est élevée ($5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$)

L'écoulement de la nappe se fait du Sud-ouest vers le Nord-est, avec une pente piézométrique d'environ 0.5%. Son alimentation se fait par infiltration directe des eaux de pluie, et partiellement (10-20%) par l'Aire. La nappe est drainée par la rivière dans sa partie aval, dans les environs de Lully, avec plusieurs résurgences.

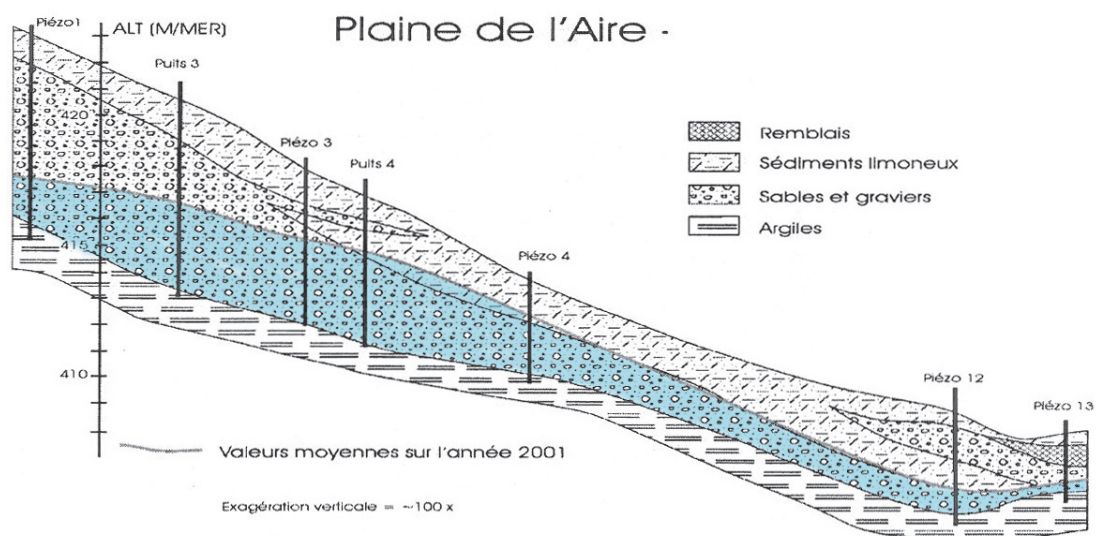


Figure 7-22. Coupe longitudinale à travers la plaine de l'Aire (d'après Meyer, 2004)

Sa profondeur varie entre 0.5 et 16 m, mais elle dépasse rarement 8 m (Figure 7-23). Son épaisseur est également variable, allant de 0.5 jusqu'à 7 m environ (

Figure 7-22). Des variations de niveau très importantes, mais de relativement courte durée peuvent avoir lieu lors de fortes pluies car le niveau de l'Aire en crue sature alors les drains et les exutoires de la nappe, l'empêchant de s'écouler normalement.

Les conditions hydrogéologiques de la nappe de l'Aire sont favorables à des installations géothermiques de taille petite à moyenne, ce qui correspond bien au développement de la région.

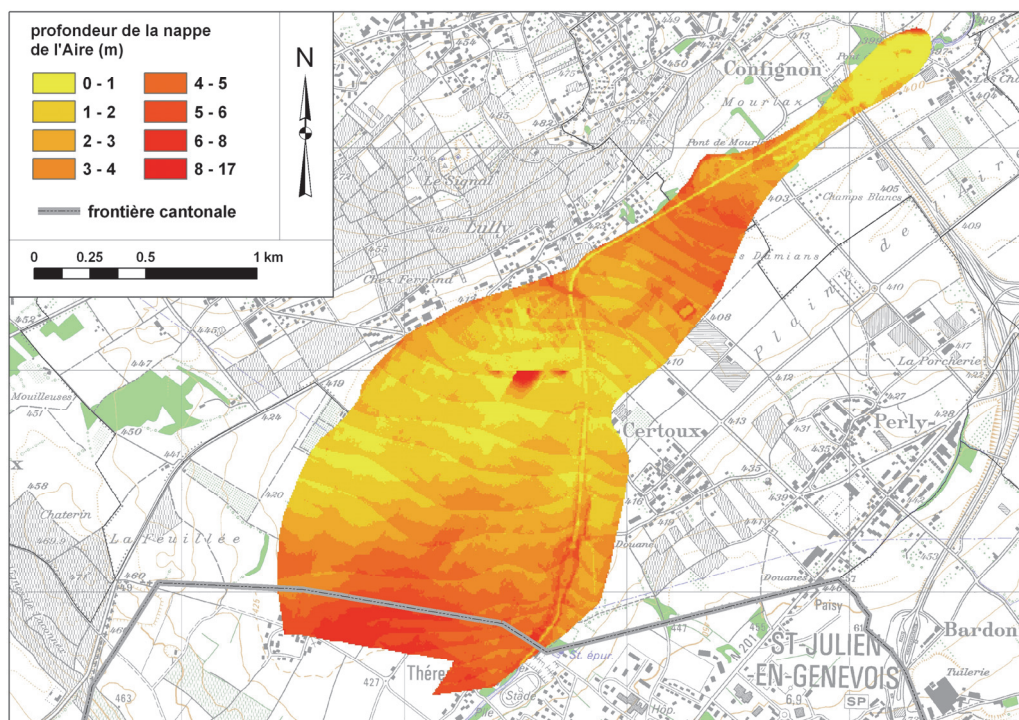


Figure 7-23. Etendue et profondeur de la nappe superficielle de l'Aire

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de l'Aire Stot = 2'850'315 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	3.49	10	25	20
Surface exploitable (5%)		0.4	1	0.8

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation, la surface sur laquelle il serait possible d'installer et d'exploiter un dispositif hydrothermique ne représente actuellement que 4 à 5% de la surface totale de la nappe, dans la zone de Lully (Figure 7-24).

Dans ce cas, comme pour les autres nappes superficielles, il ne semble pas réaliste d'envisager un CAD compte tenu de caractéristiques hydrogéologiques correspondant à des installations de taille petite à moyenne qui devront donc être réalisées et exploitées sur place. En conséquence, les valeurs du potentiel total indiquées dans le tableau ci-dessus sont largement surestimées si on considère le potentiel réellement exploitable. Celui-ci sera plutôt de l'ordre de 0.5 MW pour la puissance et de 1 GWh/an pour l'énergie thermique annuelle sur la zone de Lully.

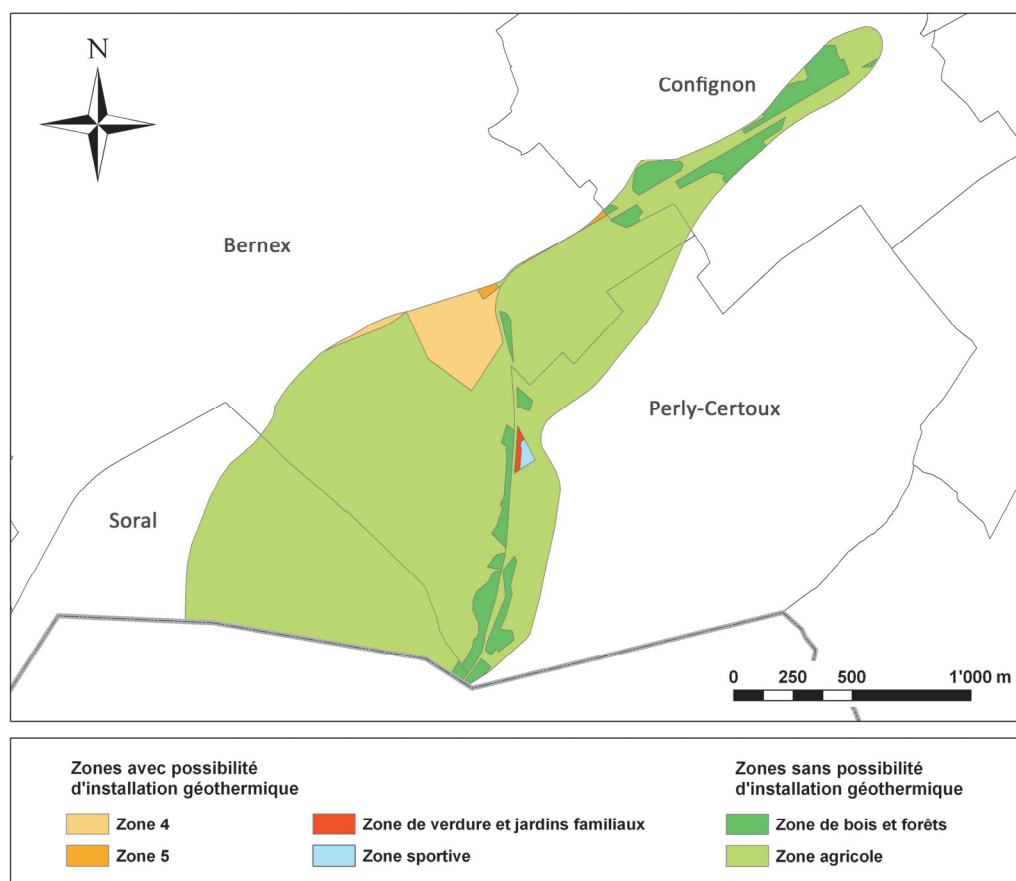


Figure 7-24 . Zones d'aménagement au-dessus de la nappe de l'Aire

En résumé, même si la nappe de l'Aire présente globalement un assez bon potentiel hydrothermique (installations de petite puissance), sa surface exploitable (zones avec besoins thermiques) très réduite (5% de la surface totale seulement) diminue fortement son intérêt même si des projets individuels ou semi-individuels (2 à 3 maisons au maximum) peuvent y être développés sous réserve d'études hydrogéologiques détaillées. On rappellera en effet que la partie aval de la nappe (moitié nord) est captive, ce qui peut poser des problèmes en matière de réinfiltration des eaux.

NAPPE DE CAROUGE – LA PRAILLE

La nappe de Carouge-la Praille est située sur la rive gauche de l'Arve entre la route de St-Julien et la Jonction. D'une longueur de 2600 m, elle atteint 1500 m dans sa plus grande largeur (Figure 7-25). Elle s'écoule du sud vers le nord avec une pente moyenne de 0.35%. Son alimentation se fait principalement par l'infiltration des eaux de pluie et également par les eaux de ruissellement des coteaux environnants. Son exutoire principal est aujourd'hui l'Arve, avec une inversion temporaire en cas de fortes crues.

Elle était initialement en contact avec les cours avals de l'Aire et de la Drize mais depuis la canalisation et l'enterrement de ces rivières, leur lien avec la nappe est probablement devenu inexistant. Elle est l'équivalent de la nappe de Plainpalais, située sur la rive droite de l'Arve.

La nappe de Carouge - La Praille est contenue dans les alluvions de terrasse de l'Arve. Sa profondeur peut atteindre 20 mètres mais dans sa grande majorité elle ne dépasse pas 10 m. Son épaisseur est variable, allant de moins de 50 cm à une dizaine de mètres, mais reste généralement inférieure à 5 m. Sa perméabilité varie entre 10^{-5} (limons sableux) et 10^{-3} m/s (graviers).

Cet aquifère possède globalement des caractéristiques favorables à des installations hydrothermiques de taille petite à moyenne. Cependant, il est situé dans des zones déjà densément urbanisées avec d'importants projets de développement comportant des bâtiments industriels et d'habitation de grande taille (la Praille) (Figure 7-26). Dans ces conditions, les ressources de l'aquifère ne seront en principe pas suffisantes (ou très rarement) pour assurer le chauffage ou le refroidissement de grands bâtiments et de pâtés de maisons denses. Rappelons que le potentiel est estimé pour de petites installations (puissance de 10 kW).

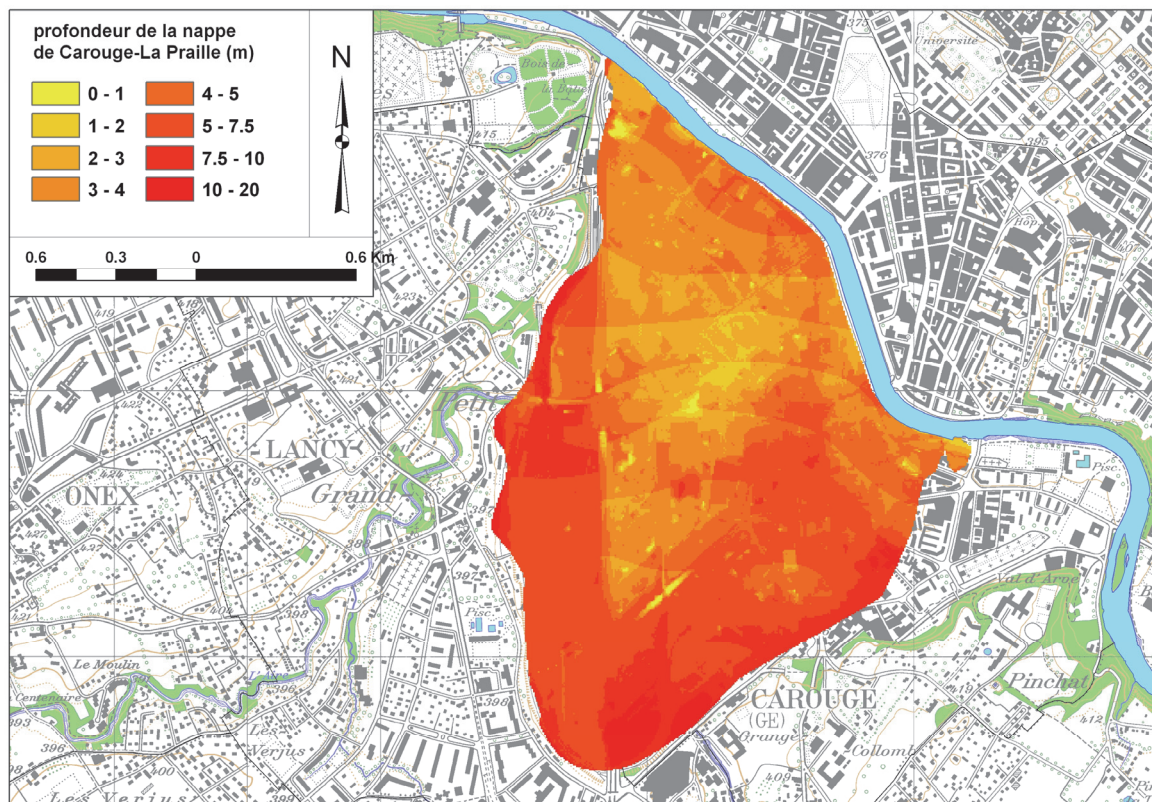


Figure 7-25. Etendue et profondeur de la nappe de Carouge-La Praille

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de Carouge – La Praille Stot = 2'591'309 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	1.43	3.5	9	7.5

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation, la surface à priori exploitable représente la totalité de la nappe. Les valeurs du tableau peuvent donc être prises en compte. Toutefois, la création d'un tel nombre d'ouvrage de captage et de restitution risque d'être problématique. En effet selon GED il conviendrait de réaliser environ 460 doublets.

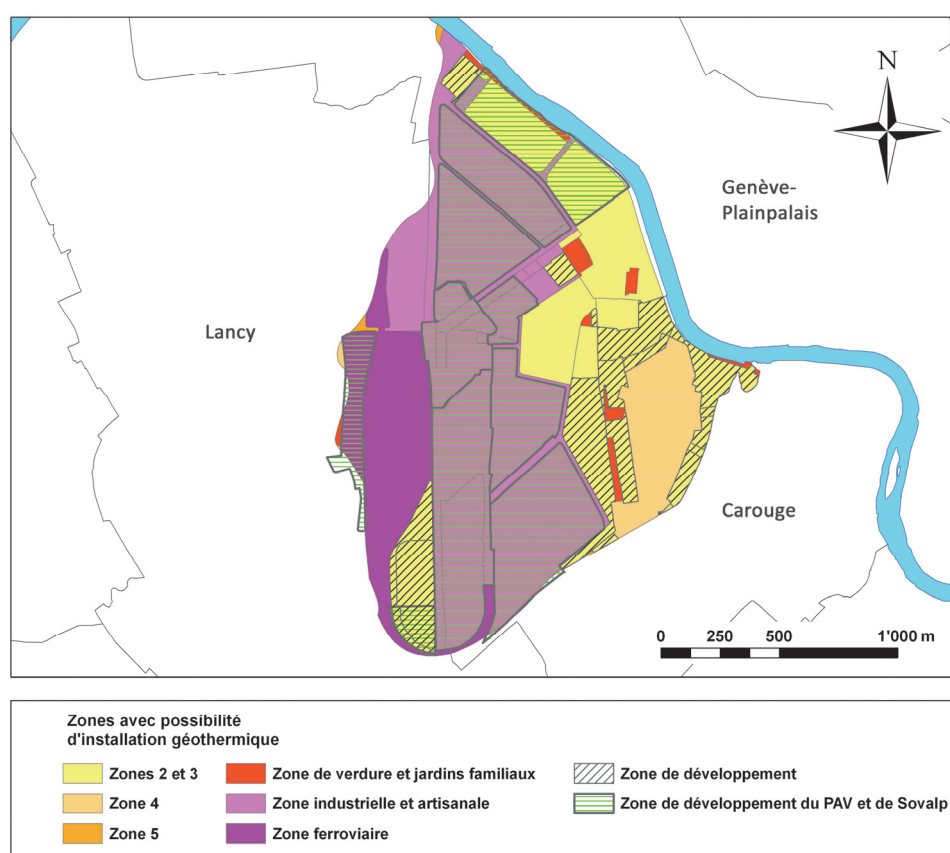


Figure 7-26. Zones d'aménagement au-dessus de la nappe de Carouge - La Praille

Globalement, la nappe de Carouge - La Praille présente un potentiel relativement élevé pour une nappe superficielle (pour des installations à puissance réduite). Cependant, étant donné la très forte densité de bâtiments sur la nappe et la haute demande énergétique, les éventuelles installations devront être dimensionnées avec soin, afin de ne pas dépasser la limite légale d'influence thermique (3° C à 100 m), ni d'occasionner des interactions entre plusieurs installations. Dans ce contexte, une recharge (ou du stockage) devrait être probablement systématiquement prévue. De plus, les installations de grande taille ne seront vraisemblablement que rarement possibles. Dans cette nappe urbaine, les études hydrogéologiques préliminaires de faisabilité nécessiteront également de se pencher sur les aspects de pollution des eaux au vu des nombreux sites pollués existant dans le secteur ainsi que sur les éventuelles conséquences des doublets de pompage - réinjection sur le bâti existant (sous-sols, drainages, etc.).

NAPPE DE PLAINPALAIS

La nappe de Plainpalais est l'équivalent sur la rive droite de l'Arve de la nappe de Carouge-La Praille. Elle a une longueur d'environ 2200 m pour 1500 m de largeur, et ses conditions d'écoulement naturel sont fortement liées aux niveaux du Rhône et de l'Arve, et donc au niveau du lac et de la consigne d'exploitation de Verbois. L'écoulement est également influencé par le bâti existant fondé dans les sables et les graviers. Une partie de son extension est située en bordure du lac et est en équilibre avec celui-ci.

Elle se développe principalement dans les alluvions de terrasse de l'ancien delta de l'Arve.

L'écoulement se fait d'est en ouest, d'une altitude d'environ 372 mètres jusqu'à 369 m. La nappe est principalement alimentée par les eaux de pluie et de ruissellement sur les coteaux à sa limite Est. L'Arve ne contribue que très partiellement à cette alimentation. Ses exutoires sont l'Arve, le Rhône et le lac. Le gradient hydraulique moyen est de 1 à 1.5% à l'amont de la plaine de Plainpalais, mais se réduit à 0.1% ou moins à l'aval. Sa profondeur est le plus souvent inférieure à 5 m (Figure 7-27). Son épaisseur est très variable en fonction des ondulations du substratum imperméable, variant de plusieurs mètres à un écoulement laminaire à la base des graviers.

Sa perméabilité peut varier de 10^{-5} (limons sableux) à 10^{-3} m/s (graviers).

Comme dans le cas de la nappe de Carouge-la Praille, la nappe de Plainpalais présente globalement des caractéristiques favorables à des installations de petite taille. Cependant, elle est également située dans une zone déjà densément urbanisée (Jonction - Plainpalais). Dans ces conditions, les ressources de l'aquifère ne seront que rarement suffisantes pour assurer le chauffage ou le refroidissement de grands bâtiments et de pâtés de maisons denses.

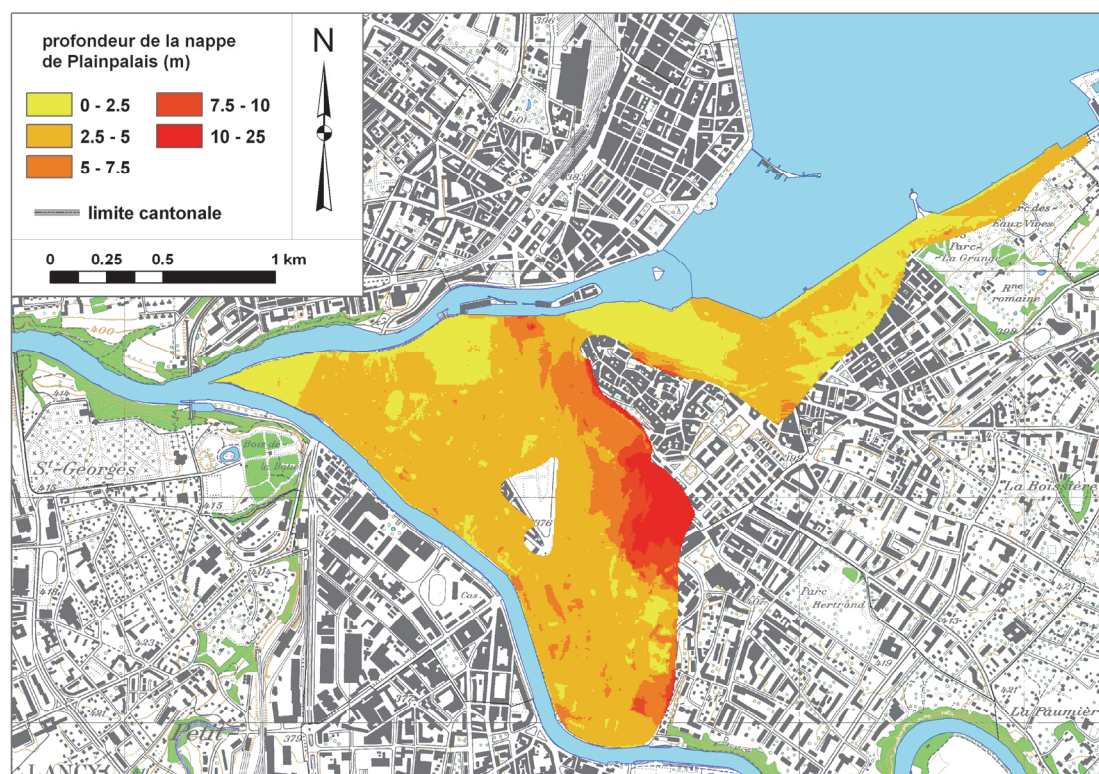


Figure 7-27. Etendue et profondeur de la nappe de Plainpalais

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de Plainpalais Stot = 2'359'907 m ²	Potentiel unitaire [W/m ²]	Puissance thermique totale [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement [GWh/an]
	1.08	2.5	6.5	5

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation, la surface à priori exploitable représente la totalité de la nappe : milieu urbain, dans des zones densément construites (zone 1 et 2), avec quelques zones de verdure (Figure 7-28). Les valeurs du tableau peuvent donc être prises en compte. Rappelons toutefois que, comme dans le cas de la nappe de Carouge, réaliser un tel nombre de petites installations n'est pas très réaliste.

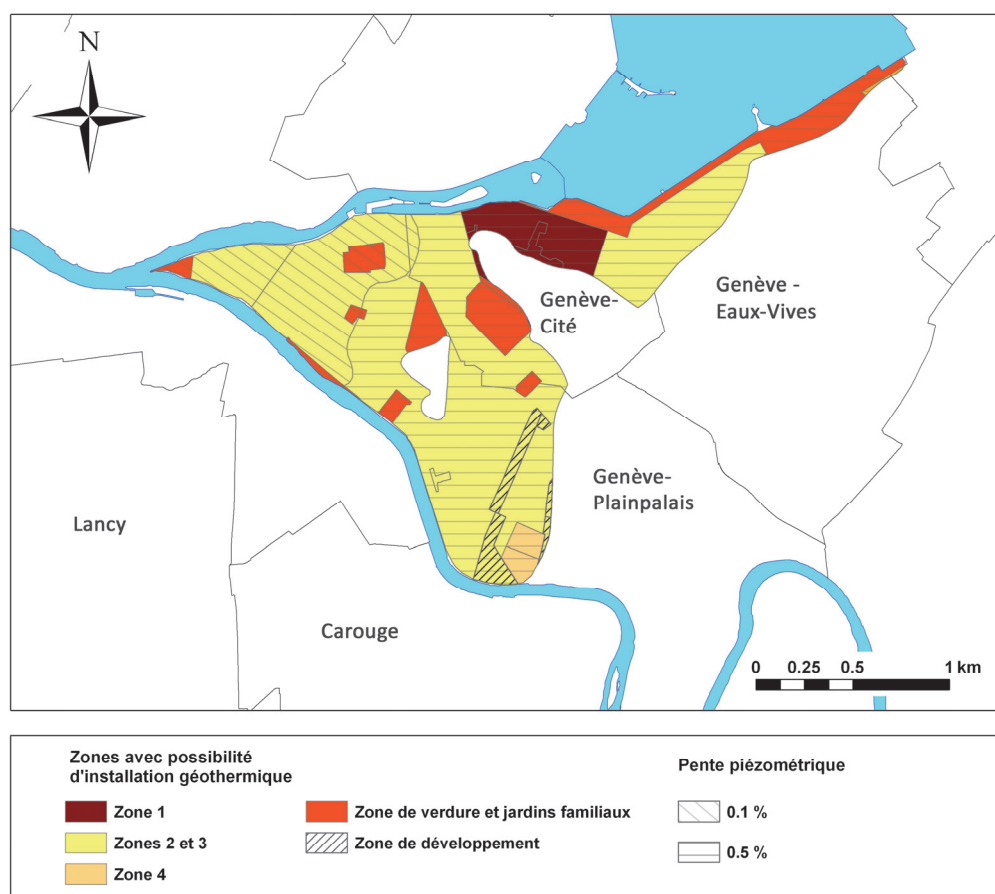


Figure 7-28. Zones de développement sur la nappe de Plainpalais

Globalement, la nappe de Plainpalais présente un potentiel relativement élevé pour une nappe superficielle. Cependant, étant donné la très forte densité de bâtiments au droit de la nappe et la haute demande énergétique, les éventuelles installations devront être dimensionnées avec soin, afin de ne pas dépasser la limite légale d'influence thermique (3° C à 100 m), ni d'occasionner des interactions entre plusieurs installations, ce qui peut être résolu par un doublet réversible. De plus, les installations de grande taille ne seront probablement que rarement possibles. Dans cette nappe urbaine, les études hydrogéologiques préliminaires de faisabilité nécessiteront également de se pencher sur les aspects de pollution des eaux ainsi que sur les éventuels conséquences des doublets de pompage - réinjection sur le bâti existant (sous-sols, drainages, etc.).

NAPPE DE PUPLINGE

La nappe de Puplinge est un vaste aquifère superficiel transfrontalier d'orientation NE-SW qui s'étend (sur le territoire suisse) entre la Seymaz et le Foron sur les communes de Choulex, Puplinge et Thônex. De forme oblongue, la nappe s'étend sur environ 6 km avec une largeur moyenne de 1,5 km dans sa partie suisse. Son étendue est moins bien connue sur le territoire français, où il semble qu'elle s'épaississe brusquement.

Elle s'écoule du NNE au SSW, avec environ 428-429 m d'altitude dans le secteur de Puplinge et Chevrier, et 392 m aux environs de Villette, à proximité de l'Arve. Elle est contenue dans les graviers et les sables d'anciennes rivières, mis en place lors du retrait glaciaire würmien.

Elle est principalement alimentée par les infiltrations directes d'eau de pluie. Il est aussi possible que les sédiments marécageux du secteur de Sionnet rendent régulièrement de l'eau aux sables et aux graviers de la nappe. Localement, il existe une relation hydraulique avec la Seymaz, mais celle-ci est mal connue, et la rivière peut aussi bien alimenter que drainer l'aquifère.

Sa profondeur est de l'ordre de 2 à 5 m (Figure 7-29) et son épaisseur va de quelques centimètres à plusieurs mètres mais ne dépasse en général pas 4-5 m.

Sa perméabilité varie de $6 \cdot 10^{-4}$ à $3 \cdot 10^{-3}$ m/s pour les graviers, et est d'environ $2 \cdot 10^{-5}$ m/s pour les sables.

Comme les autres nappes superficielles, cet aquifère possède donc des caractéristiques hydrogéologiques variables la rendant plus ou moins intéressante pour une utilisation hydrothermique, ciblée principalement pour des projets de petite taille.

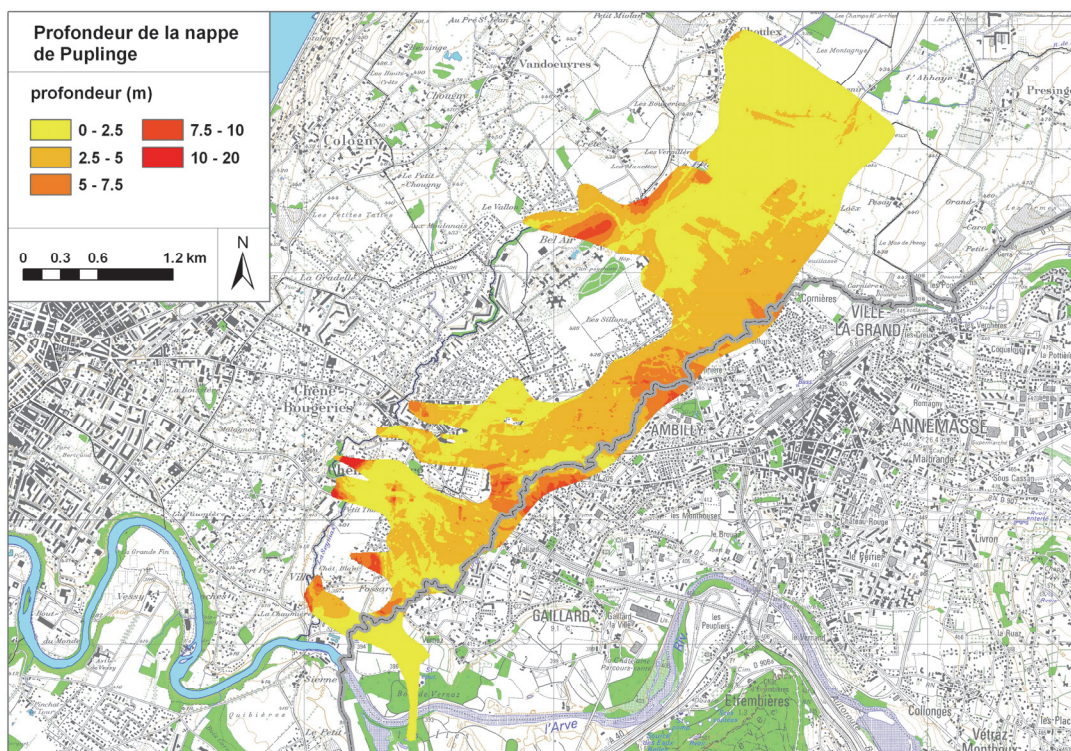


Figure 7-29. Etendue et profondeur de la nappe de Puplinge dans sa partie Suisse.

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de Puplinge (CH) Stot = 5'554'962 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	2.39	13	33	26.5
Surface exploitable (55%)		7	18	15

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation, la surface à priori exploitable représente actuellement 55% de l'étendue totale de la nappe, le reste étant occupé par des zones agricoles (Figure 7-21). Les zones construites et de développement sont de divers types : villageois à Puplinge, résidentiel et urbain à Thônex et Chêne-Bourg.

Dans ce cas, comme pour les autres nappes superficielles, il ne semble pas réaliste d'envisager un CAD compte tenu de caractéristiques hydrogéologiques correspondant à des installations de petite taille qui devront donc être réalisées et exploitées sur place.

En conséquence, les valeurs du potentiel total indiquées dans le tableau ci-dessus sont largement surestimées si on considère le potentiel réellement exploitable. Celui-ci sera plutôt de l'ordre de 7 MW pour la puissance et de 18 GWh/an pour l'énergie thermique annuelle sur l'ensemble des zones construites ou constructibles.

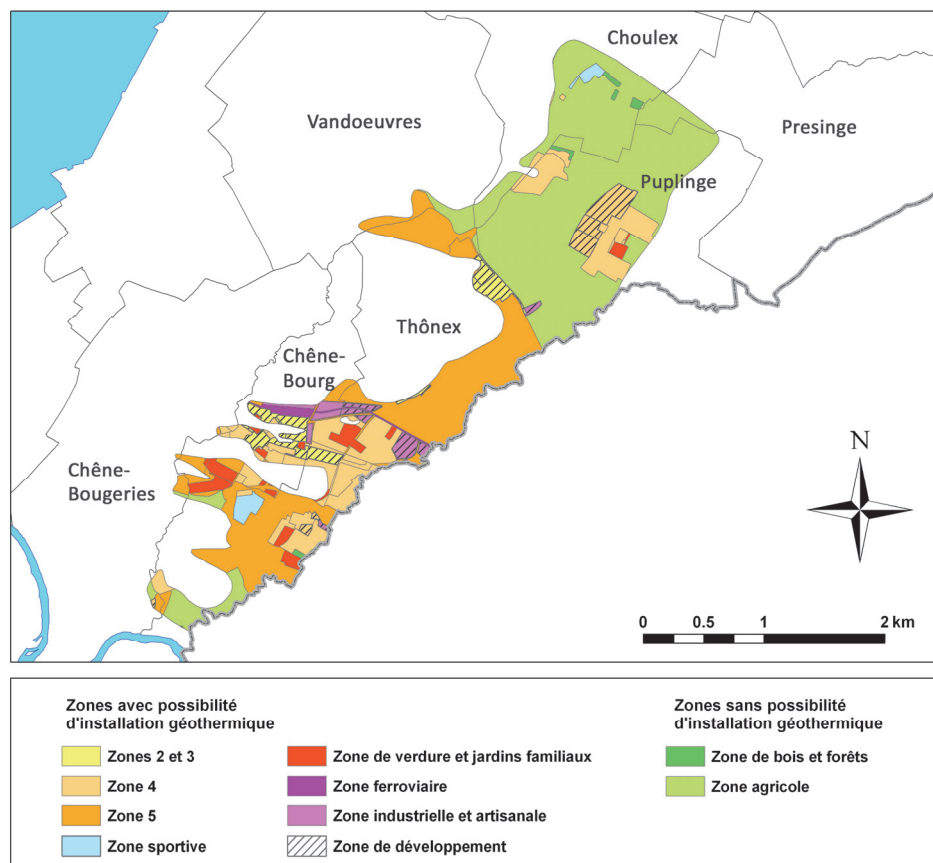


Figure 7-30. Zones d'aménagement de la nappe de Puplinge

En résumé, la nappe de Puplinge présente globalement un assez bon potentiel hydrothermique (pour des installations à petite puissance). Des projets individuels ou semi-individuels (2 à 3 maisons au maximum) peuvent y être développés sous réserve d'études hydrogéologiques détaillées. Les principales limitations pour cette nappe sont d'une part son hétérogénéité hydrogéologique (comme pour toutes les nappes superficielles) et d'autre part le fait que dans la zone urbanisée des communes concernées, elle ne présentera pas des capacités de pompage suffisantes pour des grandes installations. Seules les zones de village ou de villas présentent donc un éventuel intérêt pour une exploitation hydrothermique.

NAPPE DE LA ZONE INDUSTRIELLE DE PLAN-LES-OUATES (ZIPLO)

Cette nappe de forme irrégulière se situe dans des graviers, des sables et des limons de retrait würmiens dans la région de Plan-les-Ouates.

Les caractéristiques très hétérogènes de cette nappe ne sont pas favorables à une exploitation géothermique. En effet, elle présente de grandes variations lithologiques latérales avec une granulométrie allant de gravier à limon. Par ailleurs, la direction et la pente de l'écoulement sont mal connues.

Sa profondeur (Figure 7-31) et son épaisseur restent faibles (moins de 5 m de profondeur, 0,5 - 5 m d'épaisseur). La perméabilité peut être estimée entre $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (pour les limons) et $5 \cdot 10^{-4}$ m/s (pour les graviers).

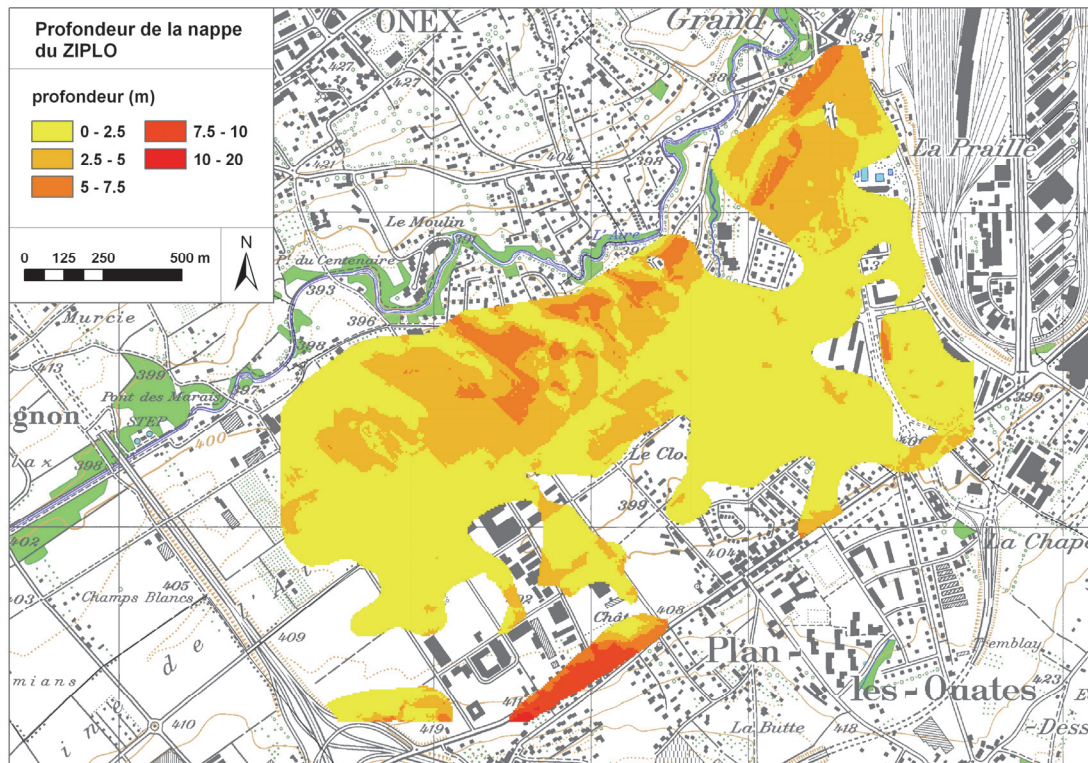


Figure 7-31. Etendue et profondeur de la nappe de la ZIPLO

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de la ZIPLO Stot = 1'831'191 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.09	0.17	0.41	0.33
Surface exploitable (81%)		0.14	0.33	0.27

Il s'agit là de valeurs très basses, permettant d'envisager au plus quelques petits projets mais excluant a priori toute utilisation pour des projets importants, tant pour du chauffage que pour du refroidissement.

Les zones d'aménagement et de développement représentent environ 80% de la surface de la nappe (Figure 7-32).

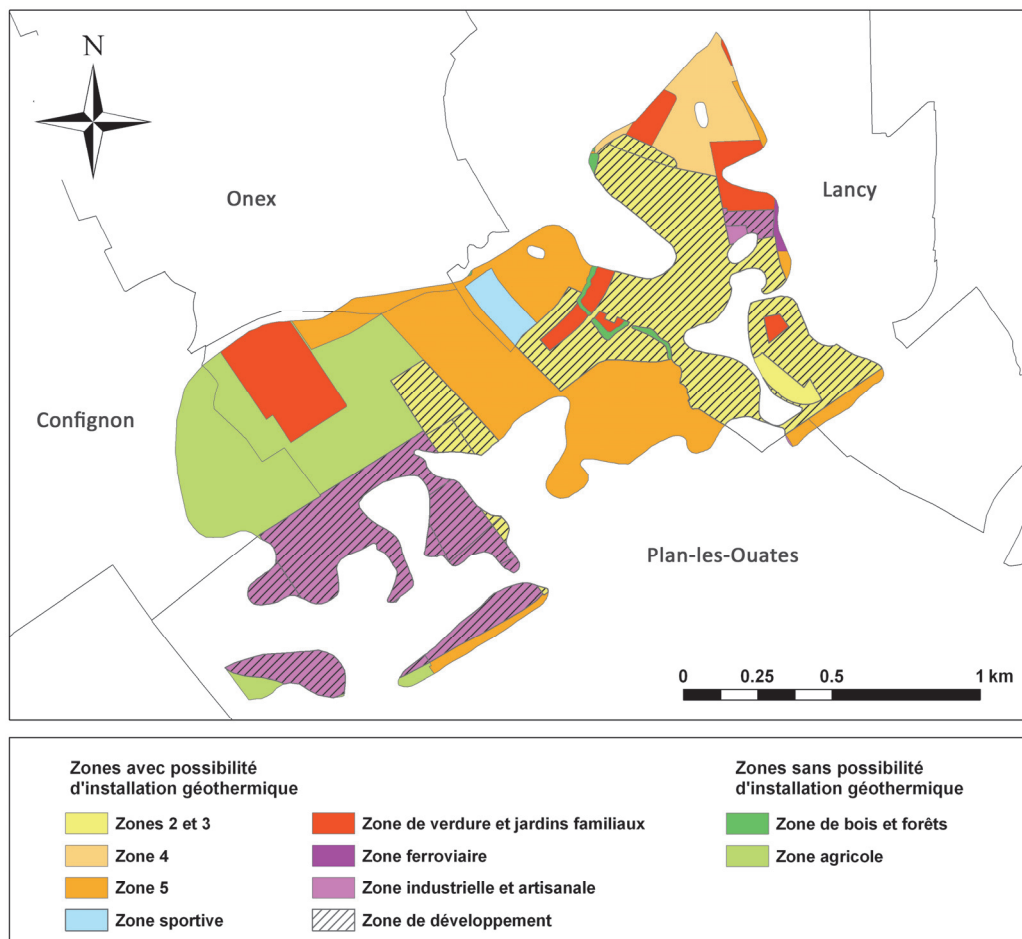


Figure 7-32 . Zones d'aménagement et de développement sur la nappe de la ZIPLO

Du fait de ses caractéristiques médiocres, cette nappe ne présente donc en principe aucun intérêt pour des bâtiments industriels qui ont des demandes élevées en énergie, particulièrement de refroidissement, ainsi que pour les quelques zones de développement de grandes maisons et immeubles (zone 2).

De petites installations seraient néanmoins possibles, particulièrement dans la zone résidentielle (zone 5), pour autant que les conditions locales soient favorables.

NAPPE DE CHANCY

Ce petit aquifère est situé dans les alluvions fluviales de terrasse du Rhône sur le plateau de Chancy. La mise en place de ces graviers date de la fin de la période de retrait glaciaire würmien, accompagnant la baisse de niveau du lac Léman et le creusement de la vallée du Rhône. De forme circulaire, la nappe mesure environ 1300 m de diamètre. Elle est principalement alimentée par l'eau de pluie ainsi que par des résurgences de la nappe de la Champagne, topographiquement plus élevée. Bien qu'alimentant le Rhône et la Laire par quelques résurgences, elle n'a de contact direct avec aucun cours d'eau. Elle s'écoule du Nord-est vers le Sud-ouest, avec des altitudes maximum de 359 m et minimum de 353 m, et sa profondeur est en général inférieure à 10 m.

L'épaisseur de la nappe est variable, allant de 50 centimètres à une dizaine de mètres. Peu d'études ont été menées sur cette nappe, et ses caractéristiques sont encore peu connues. Elle semble toutefois présenter une forte perméabilité (estimée à $5 \cdot 10^{-4}$ – 10^{-3} m/s) et est d'ailleurs déjà exploitée pour l'agriculture.

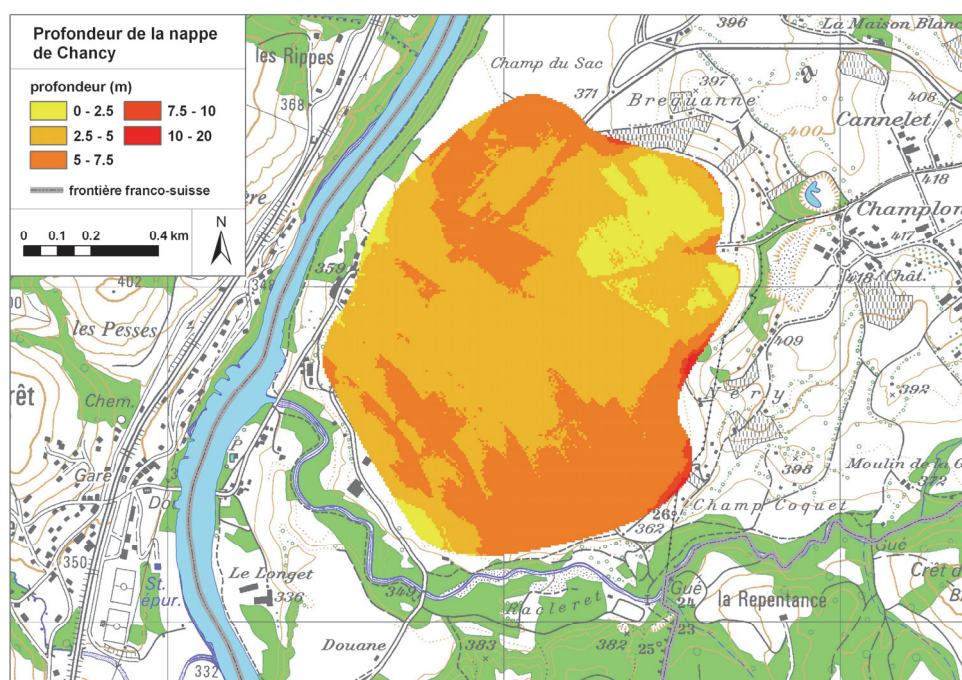


Figure 7-33. Etendue et profondeur de la nappe de Chancy

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe de Chancy Stot = 1'218'815 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	1.39	1.7	4.2	3.4
Surface exploitable (15%)		0.3	0.6	0.5

En ce qui concerne le potentiel d'utilisation, la surface sur laquelle il serait possible d'installer et d'exploiter un dispositif hydrothermique ne représente actuellement que 15% de la surface totale de la nappe, le reste étant en zone agricole (Figure 7-34).

En conséquence, les valeurs du potentiel total indiquées dans le tableau ci-dessus sont largement surestimées si on considère le potentiel réellement exploitable. Celui-ci sera plutôt de l'ordre de 0.3 MW pour la puissance et de 0.6 GWh/an pour l'énergie thermique annuelle.

Rappelons qu'il existe (au moins) une installation hydrothermique individuelle sur cette nappe, d'une puissance totale de 35 kW (voir chap. 7.3).

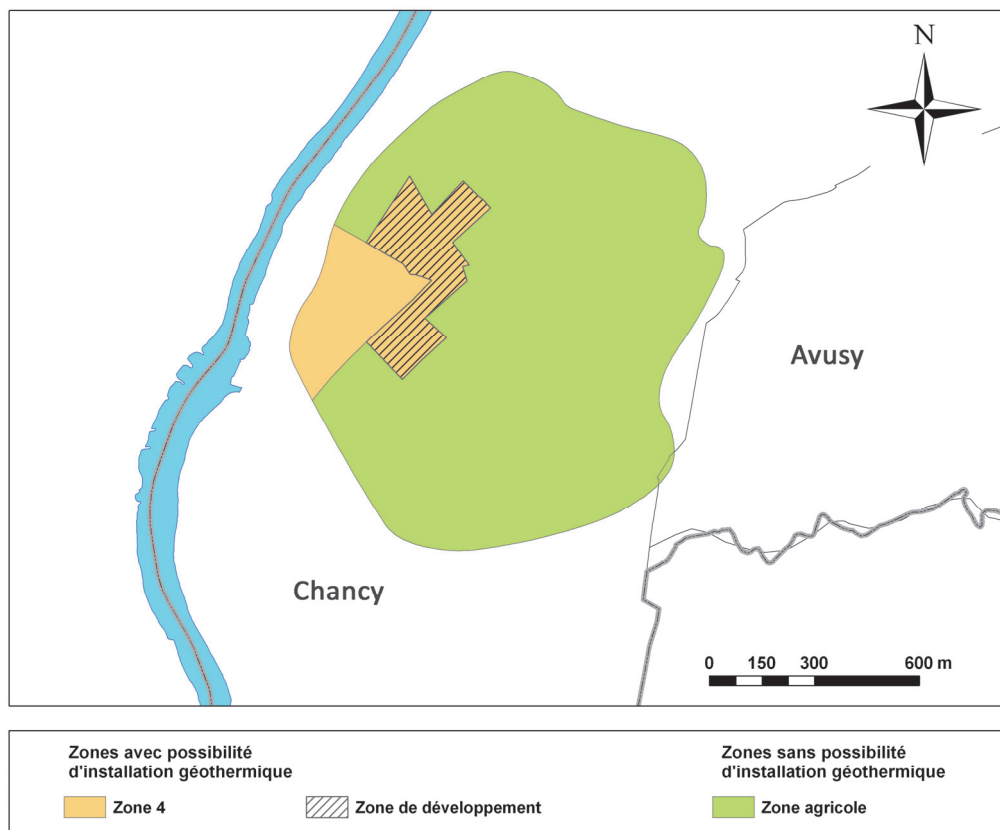


Figure 7-34. Zones d'aménagement de la nappe de Chancy

En résumé, la nappe de Chancy présente globalement un faible potentiel hydrothermique (installations de petite puissance) en raison de sa surface exploitable très réduite. Des projets individuels ou semi-individuels (2 à 3 maisons au maximum) peuvent toutefois y être développés sous réserve d'études hydrogéologiques détaillées, cette nappe restant encore mal connue.

NAPPES DE DARDAGNY ET DE RUSSIN

Ces nappes se situent respectivement dans les communes de Dardagny et de Russin, de part et d'autre du vallon de l'Allondon. Il est probable que les deux nappes aient fait partie de la même formation avant que la rivière ne les entaille. Les deux nappes sont situées sur des coteaux, et leur profondeur est relativement faible (2-3 m), ainsi que leur épaisseur (0.1 - 3 m). Les nappes se trouvent dans des graviers et des sables, et parfois des limons de retrait würmien. De même que pour la plupart des nappes superficielles, leur épaisseur et leur perméabilité sont extrêmement variables (entre $5 \cdot 10^{-5}$ et 10^{-3} m/s).

Elles sont situées majoritairement dans des zones agricoles, et seuls 10% de leur surface totale sont des zones d'habitation (zones des villages).

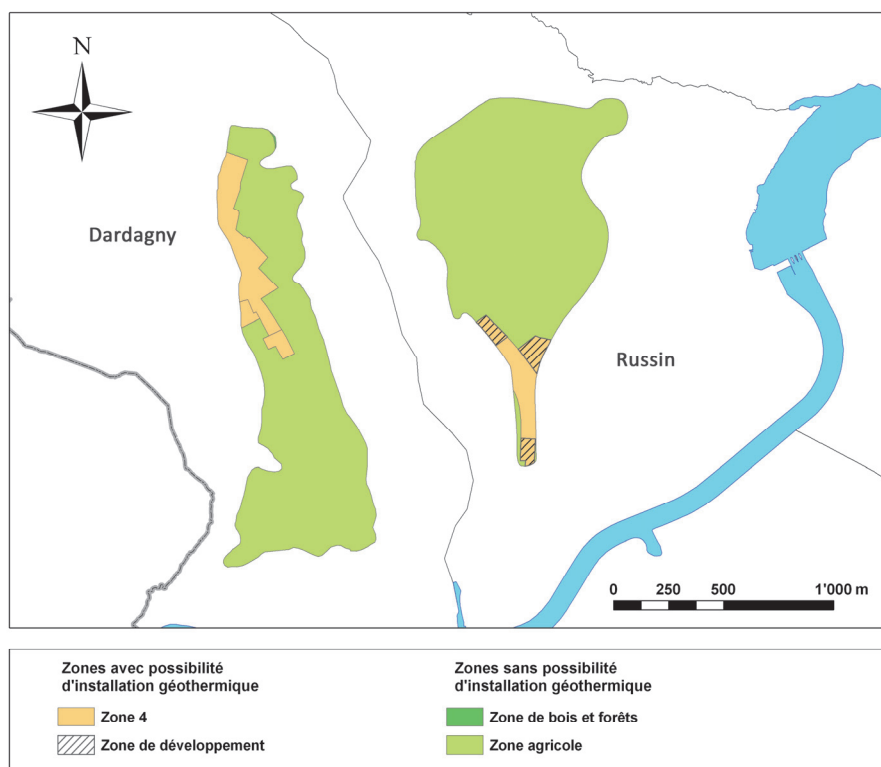


Figure 7-35 . Zones d'aménagement au droit des nappes de Dardagny et Russin

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble des 2 nappes :

Nappes de Russin et Dardagny Stot = 1'581'369 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.42	0.7	1.7	1.3
Surface exploitable (10%)		0.07	0.17	0.13

Le potentiel final est faible d'autant plus en tenant compte des zones d'exploitabilité réelle. Ces deux nappes sont donc relativement peu intéressantes, même du point de vue de l'exploitation par de petites installations individuelles qui devront être réalisées dans des secteurs hydrogéologiquement favorables pour être efficaces.

NAPPE DU NANT D'AVRIL

Cette nappe est située entre les communes de Meyrin, de Satigny et de Vernier. Sa profondeur est d'environ 2 mètres dans sa partie nord-ouest, mais elle s'approfondit jusqu'à 20 mètres environ dans sa partie Est où il semblerait qu'on la trouve alors en relation avec des niveaux intra-morainiques au sein même de l'Alluvion ancienne. Cette nappe reste toutefois encore peu connue. A priori elle ne présente pas de grand intérêt pour une utilisation géothermique en raison de caractéristiques trop variables et une profondeur pouvant être trop importante. La perméabilité a été estimée à environ $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ m/s.

Il est difficile d'estimer les propriétés de cette nappe : en effet aucun forage ne recoupe toute sa partie sud. Du fait du manque de données disponibles, l'estimation du potentiel reste donc très aléatoire. Presque la moitié de la nappe (40%) est recouverte par des zones industrielles (Figure 7-36).

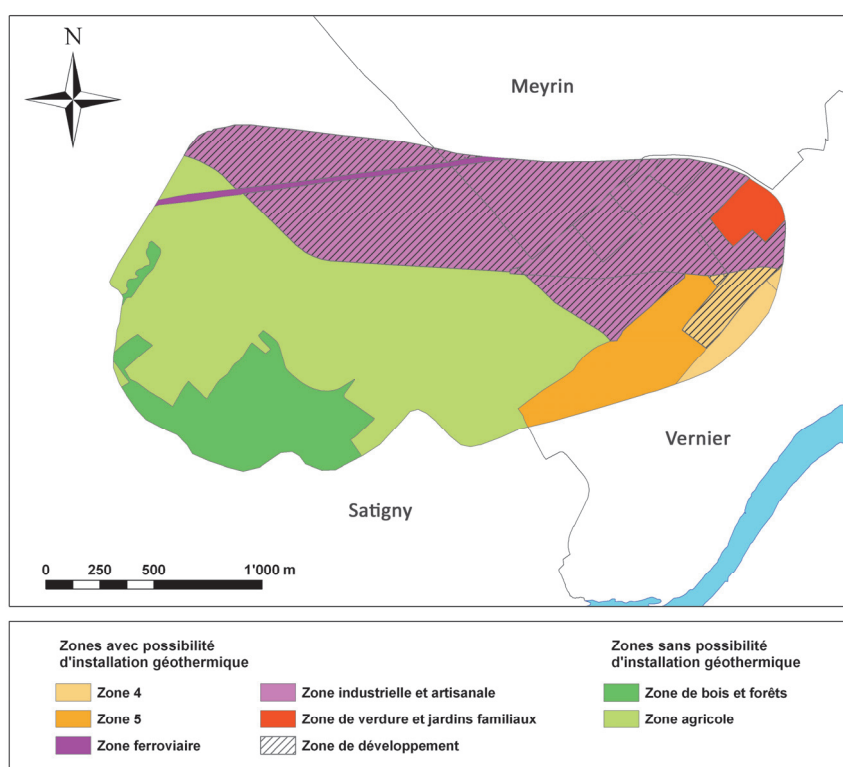


Figure 7-36. Zones d'aménagement au droit de la nappe du Nant d'Avril

Sur la base des paramètres hydrogéologiques connus ou estimés, les simulations réalisées donnent les résultats suivants pour l'estimation du potentiel thermique théoriquement exploitable sur l'ensemble de la nappe :

Nappe du Nant d'Avril Stot = 3'740'353 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.05	0.19	0.46	0.37
Surface exploitable (49%)		0.09	0.23	0.18

Le faible potentiel global de cette nappe ainsi que les incertitudes sur ses caractéristiques hydrogéologiques la rend a priori peu intéressante pour une exploitation hydrothermique, d'autant plus que 50% de sa surface est recouverte de zones agricoles et de forêts.

NAPPE DE CORSIER ET NAPPE D'ANIERES-SUD

Ces deux nappes sont principalement constituées d'eaux météoriques circulant dans des horizons sablo-limoneux superficiels. Leur profondeur est d'environ 2 mètres, et leur épaisseur est généralement faible. Dans leur ensemble, elles ne semblent pas posséder des caractéristiques favorables à l'exploitation : leur perméabilité est limitée, ainsi que leur épaisseur, ce qui est défavorable pour pomper des débits permanents et suffisants, de même que pour la réinfiltration.

Ces deux nappes sont séparées par le Nant d'Aisy, mais leur similarité est telle qu'on peut supposer qu'elles formaient une seule nappe avant d'être séparées par la rivière. Ces nappes présentent des conditions peu favorables à la géothermie, du fait de leurs très faibles perméabilités ($10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$ m/s). Elles se trouvent en effet majoritairement dans des terrains limoneux. Les simulations sur GED montrent donc des panaches thermiques avec de très grande surface, et il est parfois impossible de contraindre l'isotherme des 3°C dans un rayon de 100 m autour de l'installation. De plus, la limite technique du pompage est le plus souvent atteinte, montrant qu'il n'est pas possible de pomper assez d'eau pour faire fonctionner les installations, même avec plusieurs puits.

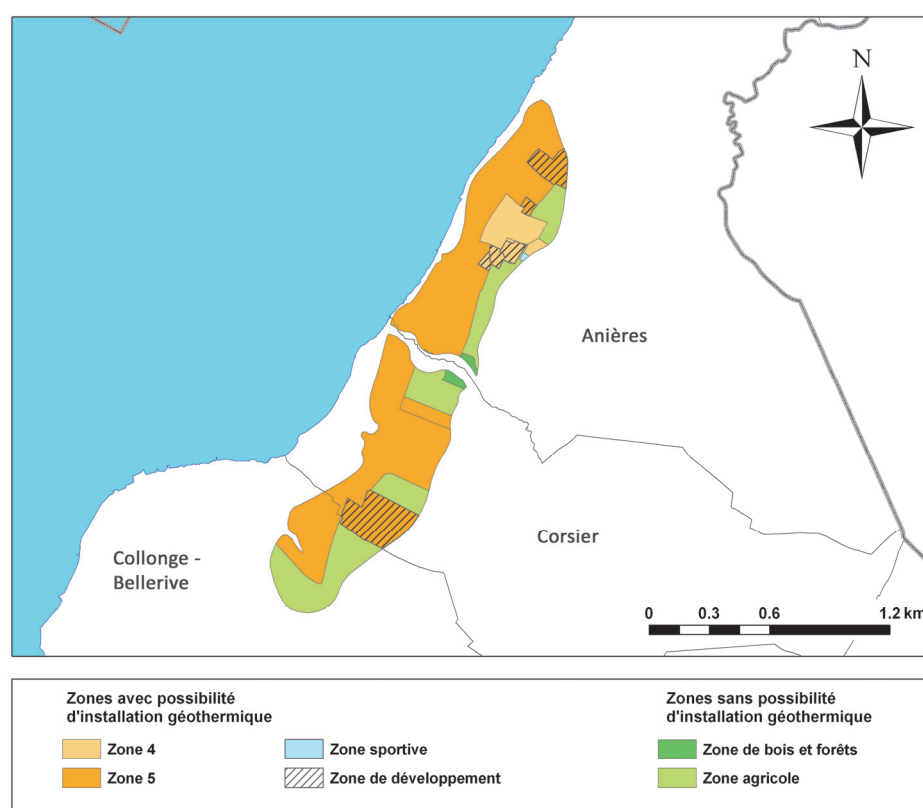


Figure 7-37 . Zones d'aménagement au droit de la nappe de Corsier et de la nappe d'Anières Sud

Bien que le potentiel théorique total calculé ne soit pas nul, les possibilités d'installation sur ces 2 nappes sont néanmoins a priori inexistantes.

NAPPE D'ANIERES-NORD

Dans le cas de cette nappe, sa bonne perméabilité (environ $5 \cdot 10^{-4}$ m/s) pourrait permettre une exploitation au niveau de maisons individuelles.

Contrairement à la nappe d'Anières - Sud, cette nappe se situe dans des matériaux de bonne perméabilité, principalement de l'Alluvion Ancienne qui affleure à cet endroit. Il est d'ailleurs possible que cette nappe soit rattachée ou même fasse partie de la nappe de Collonge - Hermance récemment répertoriée (voir 7.10.3). Ayant une bonne perméabilité et se situant proche de la surface (1 à 3 m environ), seule son épaisseur, mal connue mais faible par endroit, limite son utilisation. Des zones résidentielles couvrent environ 50% de sa surface totale (Figure 7-38).

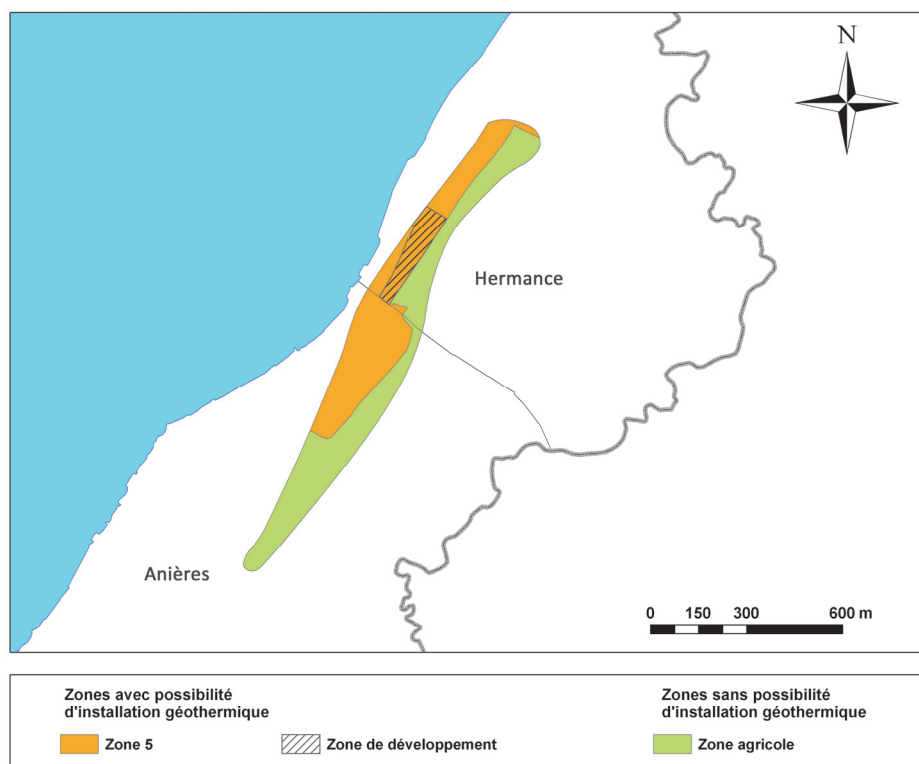


Figure 7-38 . Zones d'aménagement au droit de la nappe d'Anières-Nord

Les simulations avec GED ne sont pas adaptées dans le cas d'une telle nappe, en raison de sa configuration géométrique particulière (écoulement perpendiculairement à l'allongement principal de la nappe). Dans cette situation, il faut plutôt tenir compte des débits disponibles que de l'extension des panaches thermiques.

Nappe d'Anières - Nord Stot = 238'095 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.04	0.01	0.025	0.02
Surface exploitable (75%)		0.005	0.019	0.015

NAPPES SITUEES EN BORDURE DU LAC

Certaines nappes se trouvant le long du Léman sont des cas un peu particuliers : en effet, étant en équilibre avec le lac, leur niveau et leur température sont très liés à celui-ci, et la variation saisonnière des températures peut être plus importante que celle d'une nappe phréatique « classique ».

Un point positif de ces nappes (qui n'a pas été pris en compte lors des modélisations), est la possibilité de rejeter les eaux utilisées directement dans le lac. L'effet du panache thermique est fortement diminué dans les plans d'eau libres, du fait de leur écoulement plus rapide que celui des eaux souterraines. Sur l'ensemble de la masse d'eau du lac, les rejets thermiques d'une installation de petite taille ou même de taille moyenne auront un effet thermique négligeable. Cette possibilité du rejet hors de la nappe reste toutefois soumise à autorisation et devra faire l'objet d'une évaluation par l'autorité compétente.

Il faut également que les rejets d'eau dans les cours d'eau et le lac respectent la réglementation fédérale et cantonale. De façon générale, la température des eaux ne doit pas varier de plus de 3°C, et ne doit pas excéder 25°C (OEaux).

Les nappes citées ci-après font partie de cette catégorie.

Nappes de Versoix et de Genthod-Versoix

Ces deux nappes superficielles sont en relation avec le lac, et se situent dans des alluvions de terrasse lacustres et dans des graviers et sables de retrait würmien. Leur profondeur est assez variable (0.5 – 5 m) et leur épaisseur est très aléatoire, allant de faibles infiltrations à la base des couches graveleuses à plus de 10 m. Elles sont sur leur plus grande surface situées en secteur A₀ de protection des eaux, afin de protéger les eaux superficielles (dans ce cas le lac), mais ceci n'empêche pas une exploitation géothermique. La perméabilité est estimée entre 10⁻⁵ et 5*10⁻⁴ m/s.

Ces deux nappes en relation avec le lac présentent des conditions d'exploitation moyennes. Leur épaisseur est intéressante, surtout proches du lac, mais leur perméabilité est assez variable, la granulométrie variant de sables à graviers. Ces nappes se situent principalement en zones résidentielles (zone 5), où des installations de petites tailles sont en principe possibles (Figure 7-39).

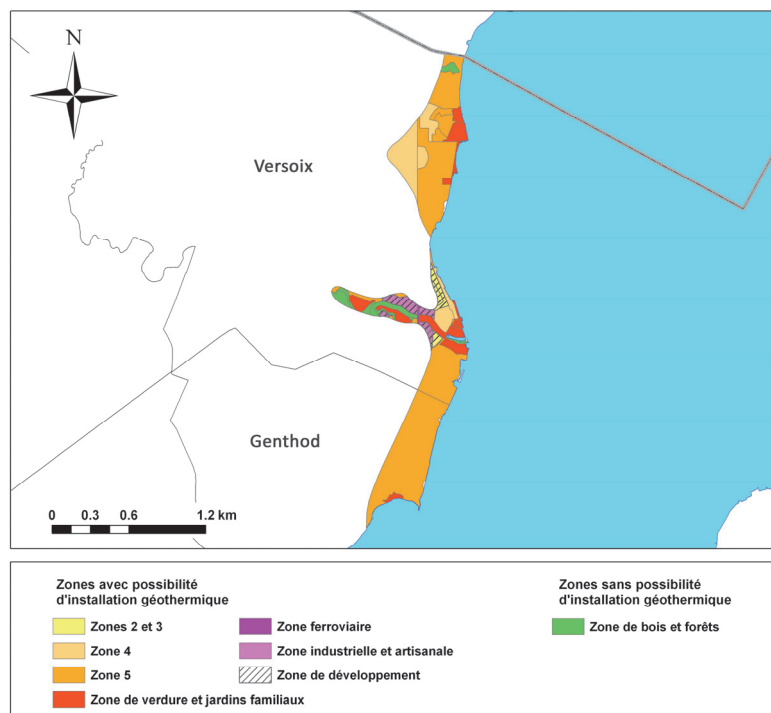


Figure 7-39. Zones d'aménagement au-dessus des nappes de Versoix et de Genthod-Versoix

Les simulations donnent les résultats suivants :

Nappes de Versoix et Genthod - Versoix Stot = 1'076'989 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.05	0.06	0.15	0.12
Surface exploitable (94%)		0.05	0.13	0.11

Bien que le potentiel total reste faible, les installations de petite taille peuvent être envisagées, en particulier le long du lac. En effet, la nappe y est souvent plus épaisse, et il existe des possibilités de rejet directement dans le lac. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de considérer l'extension des panaches, et le potentiel total peut augmenter considérablement.

Nappe de Bellerive

Les caractéristiques de la nappe de Bellerive sont peu connues: en effet, seuls quelques forages y ont été effectués. Elle est située principalement dans des alluvions graveleuses et sableuses de terrasse du lac ce qui lui donne une relativement bonne perméabilité. Sa profondeur moyenne est d'environ 2 m. Peu de données sont disponibles sur son épaisseur. Son étendue est faible, mais elle est en équilibre avec le lac, ce qui assure sa recharge.

Comme les autres nappes liées au lac, elle est située en secteur A_O de protection des eaux ce qui n'empêche toutefois pas son utilisation à des fins thermiques.

La nappe est presque entièrement située en zone résidentielle (zone 5), avec des constructions de type villas individuelles (Figure 7-40).

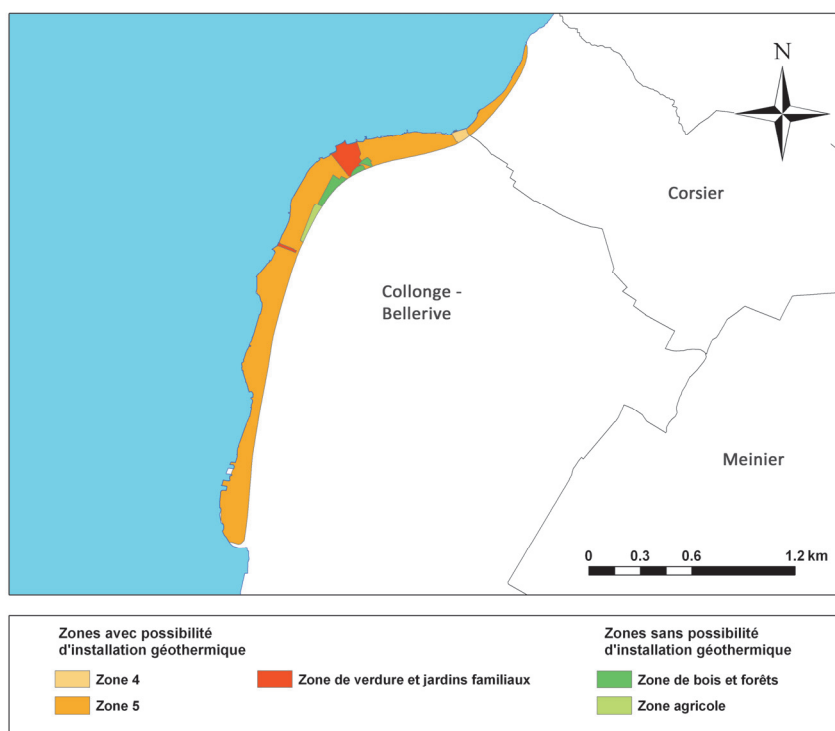


Figure 7-40. Zones d'aménagement au droit de la nappe de Bellerive

Les simulations donnent les résultats suivants :

Nappe de Bellerive Stot = 444'205 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.04	0.02	0.05	0.04
Surface exploitable (93%)		0.018	0.045	0.037

Le potentiel de chaleur de la nappe reste très bas. Il est cependant possible de l'utiliser à des fins géothermiques, exclusivement pour des installations de petite taille. De plus, il serait possible de rejeter directement dans le lac l'eau pompée dans la nappe, sous réserve de ne pas perturber son régime naturel.

Nappe du Delta de l'Hermance

Cette petite nappe transfrontalière est située dans des niveaux sableux et graveleux des alluvions du delta de l'Hermance. Elle bénéficie d'une très bonne perméabilité et d'une épaisseur conséquente (2 à 10 m) alors que sa profondeur est faible.

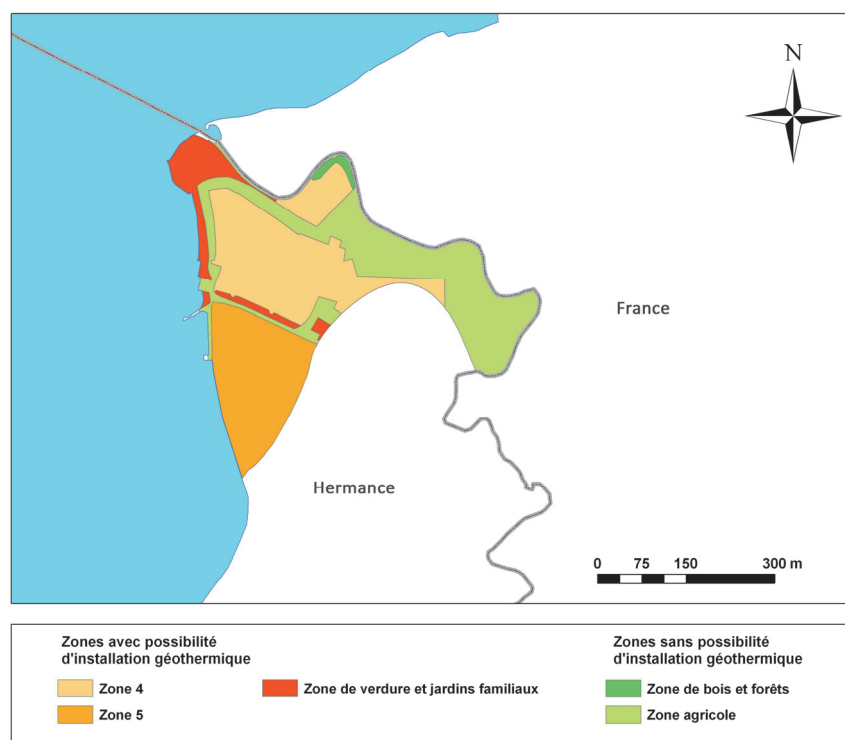


Figure 7-41 . Zones d'aménagement au droit de la nappe du Delta de l'Hermance

Les simulations donnent les résultats suivants :

Nappe du Delta de l'Herminance (CH) Stot = 144'315 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	2.20	0.3	0.8	0.6
Surface exploitable (61%)		0.2	0.5	0.4

Le potentiel unitaire de la nappe est élevé. En revanche, sa surface exploitable est relativement réduite. Le potentiel résultant est donc modeste.

Cette nappe permet l'installation de systèmes de petite taille, mais également d'installations de taille moyenne.

NAPPE DE CELIGNY

Cette petite nappe se développe dans des terrains très variables, allant des alluvions de terrasse du lac à des limons de retrait würmien. En conséquence, les perméabilités sont également très variables, estimées entre $1 \cdot 10^{-6}$ (pour les limons) et $5 \cdot 10^{-4}$ (pour les graviers). Sa profondeur est faible, allant de 0.5 à 3 m avec une épaisseur variant entre 1 et 3 m. Elle ne semble pas présenter de caractéristiques particulièrement favorables pour une installation géothermique.

La nappe de Céligny reste peu connue. Dans sa partie supérieure elle est probablement alimentée par des eaux de pluie et la rivière du Brassu, alors qu'il est probable que sa partie inférieure soit en relation avec le niveau du lac. La zone la plus passible d'utilisation serait la bande de zone d'habitation près du lac (zone 5, Figure 7-42), à condition de trouver une zone de perméabilité et d'épaisseur suffisantes.

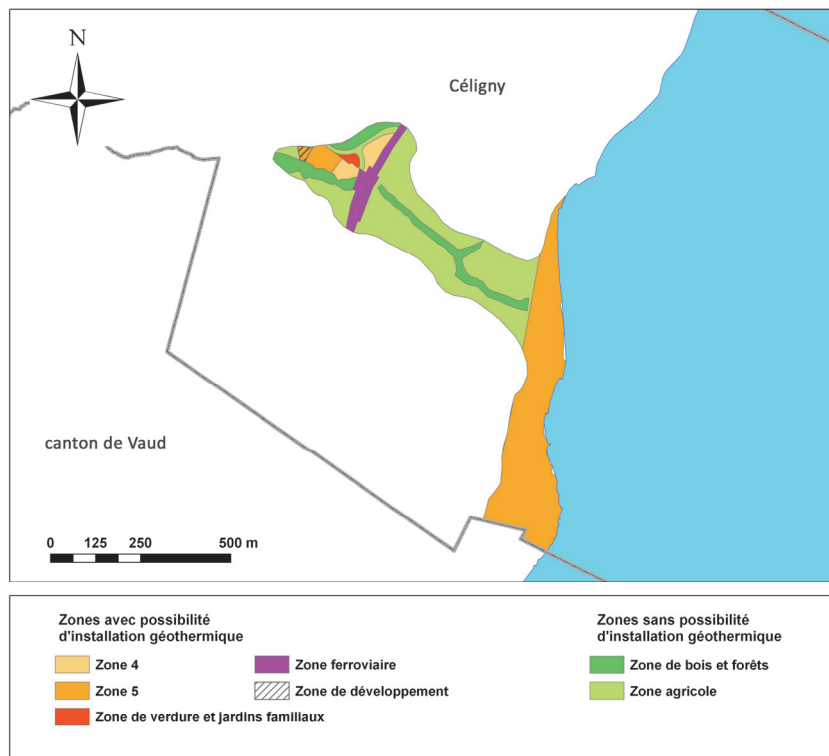


Figure 7-42. Zones d'aménagement sur la nappe de Céligny

Les simulations donnent les résultats suivants :

Nappe de Céligny Stot = 281'252 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.06	0.02	0.04	0.03
Surface exploitable (50%)		0.01	0.02	0.015

Le potentiel est très faible, à peine suffisant, en ordre de grandeur pour quelques maisons individuelles.

NAPPE DE LA PLAINE

Cette petite nappe est probablement en relation avec la partie terminale de la nappe principale de l'Allondon. Elle se situe dans des alluvions de terrasse du Rhône et de l'Allondon avec un niveau de nappe en relation à la fois avec ces deux cours d'eau.

Son exploitation à des fins thermiques est envisageable dans le secteur de la Plaine. Sa relation avec la nappe de l'Allondon qui pourrait également être utilisée dans ce secteur reste encore à mieux définir.

Les simulations donnent les résultats suivants pour la nappe de la Plaine :

Nappe de La Plaine Stot = 284'806 m ²	Potentiel unitaire de la nappe [W/m ²]	Puissance thermique totale tirée de la nappe [MW]	Energie thermique (2000 h/an) (PAC avec COP = 5) [GWh/an]	Energie de rafraîchissement par géocooling [GWh/an]
Surface totale	0.09	0.03	0.06	0.03
Surface exploitable (31%)		0.01	0.02	0.015

Il s'agit d'un potentiel très faible, d'autant plus que les zones constructibles ne représentent que 30% de la surface de la nappe.

NAPPE DE RICHELIEU

Cet aquifère situé de part et d'autre de la Versoix, au-dessus de la nappe de Montfleury, reste peu connu : en effet un seul piézomètre est installé sur cette nappe et son étendue est incertaine faute de sondages. Cependant la nappe doit être restreinte au lit majeur de la Versoix, car elle est contenue dans des alluvions récentes de la rivière, situées au-dessus d'unités morainiques imperméables. A l'aval, il semble que ces graviers reposent directement sur l'Alluvion ancienne contenant la nappe de Montfleury, qui draine donc la majeure partie de la nappe de Richelieu.

La nappe se situe dans une zone A_U de protection des eaux afin de protéger les eaux de la nappe de Montfleury de toute infiltration néfaste. Son exploitation thermique n'y est donc pas autorisée.

NAPPE DES PÂQUIS

Cette petite nappe se situe dans le secteur des Pâquis, principalement dans des sédiments sableux lacustres, mais également dans des alluvions graveleuses, des limons lacustres et de retrait würmiens, et en grande partie dans des remblais. Sa profondeur moyenne est de 3-4 m, et son niveau est en rapport avec le lac. Les écoulements sont cependant très influencés par les ouvrages souterrains de ce quartier urbain (sous-sols, collecteurs, etc.). De plus, elle se situe dans une zone à haute densité urbaine avec une demande énergétique importante. Les caractéristiques de cette nappe sont donc défavorables à une utilisation géothermique.

NAPPES SUPERFICIELLES - SYNTHÈSE

En résumé, on peut constater que les nappes superficielles montrent une grande variété de faciès hydrogéologiques. Alors que certaines nappes ne sont pratiquement pas exploitables du fait de leurs caractéristiques insuffisantes (faible perméabilité, très faible épaisseur), d'autres semblent plus indiquées pour l'exploitation par des installations a priori de petite taille (par exemple : nappe de la Champagne, nappe de Puplinge). Il faut cependant retenir le fait que même les nappes montrant un bon potentiel sont sujettes à d'importantes variations latérales de leurs caractéristiques hydrogéologiques. Une étude détaillée, basée sur une reconnaissance approfondie in-situ (forages et essais de pompage), est donc nécessaire (et légalement obligatoire) pour dimensionner les installations dans tous les cas.

Le récapitulatif de l'estimation du potentiel thermique des nappes superficielles basé sur un recoupement entre les nappes et les zones à besoin thermique est présenté dans le tableau suivant :

Nappes	Potentiel unitaire (W/m ²)	Puissance thermique (MW)	Energie thermique (2000h) (GWh/an)	Production avec PAC (COP = 5) (GWh/an)	Production potentielle de rafraichissement (GWh/an)	Potentiel chaud + froid (GWh/an)
Champagne	2.90	2.5	4.8	6	4.8	10.8
Aire	3.49	0.4	0.8	1	0.8	1.8
Carouge – La Praille	1.43	3.5	7.5	9	7.5	16.5
Plainpalais	1.08	2.5	5	6.5	5	11.5
Puplinge	2.39	7.1	14.6	18.1	14.6	32.7
Ziplo	0.09	0.1	0.3	0.3	0.3	0.6
Chancy	1.39	0.3	0.5	0.6	0.5	1.1
Dardagny et Russin	0.42	0.07	0.14	0.17	0.14	0.3
Nant d'Avril	0.05	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4
Corsier – Anières-Sud	Pas exploitable					
Anières - Nord	0.04	0.005	0.01	0.012	0.01	0.02
Versoix et Genthod	0.05	0.05	0.11	0.13	0.11	0.24
Bellerive	0.04	0.02	0.04	0.05	0.04	0.08
Delta de l'Hermance	2.20	0.2	0.4	0.5	0.4	0.9
Céligny	0.06	0.01	0.015	0.02	0.015	0.03
La Plaine	0.09	0.01	0.015	0.02	0.015	0.03
Richelien	Interdiction d'exploitation					
Pâquis	Pas exploitable					
total		17	34	43	34	77

Les valeurs tiennent compte des secteurs dans lesquels une exploitation est réellement possible (exclusion des zones agricoles et de forêt).

On peut constater que 4 nappes représentent le 90% du total du potentiel des nappes superficielles (Nappes de la Champagne, Carouge-La Praille, Plainpalais et Puplinge).

7.11 Synthèse sur le potentiel cantonal et recommandations

Il existe à Genève plus de 40 nappes d'eau souterraine répertoriées. L'examen de leurs caractéristiques sur la base des données existantes permet dans un premier temps d'effectuer un diagnostic général sur leur aptitude à être utilisées à des fins hydrothermiques en fonction de leur classification cantonale :

	Nappes principales	Nappes superficielles	Nappes temporaires
Type de projets possibles	Grands	Petits (à moyens)	Non exploitables
Avantages principaux	Hydrogéologie favorable (dimensions, perméabilité, température...)	Faible profondeur	-
Limitations principales	Interdit si alimentation en eau potable Profondeur souvent importante	Aquifères hétérogènes Faisabilité non garantie	-
Possibilité d'exploitation par CAD	Oui	Non	
Obligation générale	Etude hydrogéologique détaillée		

Les nappes du canton offrent différentes possibilités d'exploitation géothermique, allant de petites installations pour le refroidissement ou le chauffage d'une seule habitation dans les nappes superficielles à des installations conséquentes pour des immeubles ou même des bâtiments industriels dans les nappes principales qui peuvent fournir de haut débits.

La législation cantonale permet le pompage à des fins hydrothermiques dans la plupart des nappes, exception faite des nappes du Genevois et de l'Allondon, exploitées pour l'eau potable. Une étude hydrogéologique doit cependant être menée avant d'installer une exploitation sur la nappe pour vérifier la faisabilité du projet, et il faut faire particulièrement attention à ne pas influencer d'éventuelles autres installations existantes.

Des simulations ont permis d'obtenir un ordre de grandeur de l'énergie exploitable sur les nappes genevoises sans recharge. Trois cas de figure ont été considérés.

Dans le premier cas la surface totale des nappes a été prise en compte ce qui permet l'estimation du potentiel total théorique cantonal (environ 350 GWh/an de production potentielle de chaleur et 280 GWh/an de production de froid par des systèmes freecooling) selon le tableau suivant :

POTENTIEL DES NAPPES EN CONSIDERANT LEUR SURFACE TOTALE (sans les nappes exploitées pour l'eau potable) - sans recharge						
	Surface totale [m ²]	Puissance [MW]	Potentiel de chaleur (2000 h) [GWh/an]	Potentiel énergie avec PAC (COP = 5) [GWh/an]	Potentiel frigorifique [GWh/an]	Potentiel de froid et de chaleur [GWh/an]
Nappes superficielles	36'680'717	65	131	163	131	294
Nappes principales	40'385'961	75.5	151	189	151	340
Toutes les nappes	77'066'678 (27% du canton)	140.5	282	352	282	634

Cependant, il est plus réaliste de considérer comme exploitables uniquement les surfaces constructibles, car il s'agit d'une technique de proximité, avec des installations directement reliées aux bâtiments. Une exception à ceci serait l'installation d'un système de chauffage à distance sur une nappe (CAD). Cela serait possible dans le cas des nappes principales, où des puits pourraient être installés même en zone agricole ou forestière pour alimenter un réseau plus éloigné. Cette technique ne serait cependant pas applicable dans le cas des nappes superficielles, qui ne pourraient pas fournir des débits suffisants.

En considérant uniquement les surfaces où une demande thermique existe (surfaces construites et de développement), le potentiel total est d'environ 110 GWh/an pour la production de chaleur et de 90 GWh/an pour la production de froid, ce qui représente le tiers de celui obtenu en considérant des surfaces totales :

POTENTIEL DES NAPPES EN CONSIDERANT LEUR SURFACE CONSTRUCTIBLE (sans les nappes exploitées pour l'eau potable) - sans recharge						
	Surface totale [m ²]	Puissance [MW]	Potentiel de chaleur (2000 h) [GWh/an]	Potentiel énergie avec PAC (COP = 5) [GWh/an]	Potentiel frigorifique [GWh/an]	Potentiel de froid et de chaleur [GWh/an]
Nappes superficielles	15'192'631	17	34	43	34	77
Nappes principales	13'808'998	26	52	65	52	117
Toutes les nappes	29'001'629 (10% du canton)	43	86	108	86	194

Enfin, pour obtenir un potentiel disponible immédiatement, le même calcul a été fait en ne prenant en compte que les surfaces de développement, qui sont celles où des constructions sont prévues à relativement court terme. Celles-ci ne représentent que 15% de la surface totale des nappes. Dans ce troisième cas, le potentiel de production de chaleur est d'environ 45 GWh/an et celui de production de froid par geocooling de 35 GWh/an :

POTENTIEL DES NAPPES EN CONSIDERANT LES SURFACES DE DEVELOPPEMENT (sans les nappes exploitées pour l'eau potable) - sans recharge						
	Surface totale [m ²]	Puissance [MW]	Potentiel de chaleur (2000h) [GWh/an]	Potentiel énergie avec PAC (COP = 5) [GWh/an]	Potentiel frigorifique [GWh/an]	Potentiel de froid et de chaleur [GWh/an]
Nappes superficielles	5'282'744	4.5	9.5	11.5	9.5	21
Nappes principales	6'861'014	13	26	32	26	58
Toutes les nappes	12'143'758 (4% du canton)	17.5	35.5	43.5	35.5	79

En définitive, on constate que la surface des nappes exploitables à court (zones de développement) et moyen terme (toutes zones constructibles et construites confondues) est comprise entre 12 km² (4% du canton) et 29 km² (10% du canton).

Sur cette base et toutes nappes confondues, la production potentielle de chaleur (par pompe à chaleur avec un COP 5 et 2'000 h/an) sans recharge thermique est estimée entre 40 et 110 GWh/an. On peut également estimer une production de froid par des systèmes géocooling sans recharge pour un total compris entre 35 et 85 GWh/an.

En gérant la ressource de manière équilibrée et en admettant que la demande en froid équivaut à la demande de chaleur, l'exploitation de froid en été permettrait de limiter, voire d'annuler l'impact à long terme sur la température des nappes. Dans ce cas, le potentiel d'exploitation serait considérablement augmenté et au moins égal à la somme des potentiels de production de chaleur et de froid pris séparément. L'exploitation équilibrée de la chaleur et du froid des nappes phréatiques avec recharge thermique saisonnière permettrait ainsi de produire un minimum de 80 à 200 GWh/an de chaleur et de froid. Par ailleurs, si la production de chaleur implique une consommation d'électricité pour faire fonctionner les pompes à chaleur (1/5 de la puissance thermique totale), la production de froid par geocooling n'utilise pratiquement pas d'énergie (sauf pour les pompes) et remplacerait alors avantageusement les machines frigorifiques. Le géocooling est souvent plus efficace combiné à une nappe qu'à un champ de sondes, car les températures de la nappe sont relativement basses (8 à 15°C).

Comparées à la demande cantonale actuelle en chaleur de 6'000 GWh/an, l'énergie potentiellement produite par l'exploitation des nappes reste modeste (quelques pourcents). Elle représente toutefois un intérêt certain pour les utilisateurs potentiels situés au droit des zones favorables.

Au-delà des valeurs totales pour l'ensemble des nappes, il faut toutefois bien séparer les contextes respectifs liés aux nappes principales et aux nappes superficielles. En effet, les simulations pour les nappes principales ont été réalisées pour des installations plus importantes que pour les nappes superficielles. La comparaison entre ces 2 types de nappes, notamment en termes de puissance unitaire, n'est donc pas directement possible.

Le potentiel unitaire (en W/m²) représente la synthèse d'une partie des caractéristiques intrinsèques de la nappe (perméabilité, épaisseur) pour une installation géothermique, sans tenir compte des possibilités d'aménagement. Le potentiel unitaire de chaque nappe est représenté dans la figure 7-43.

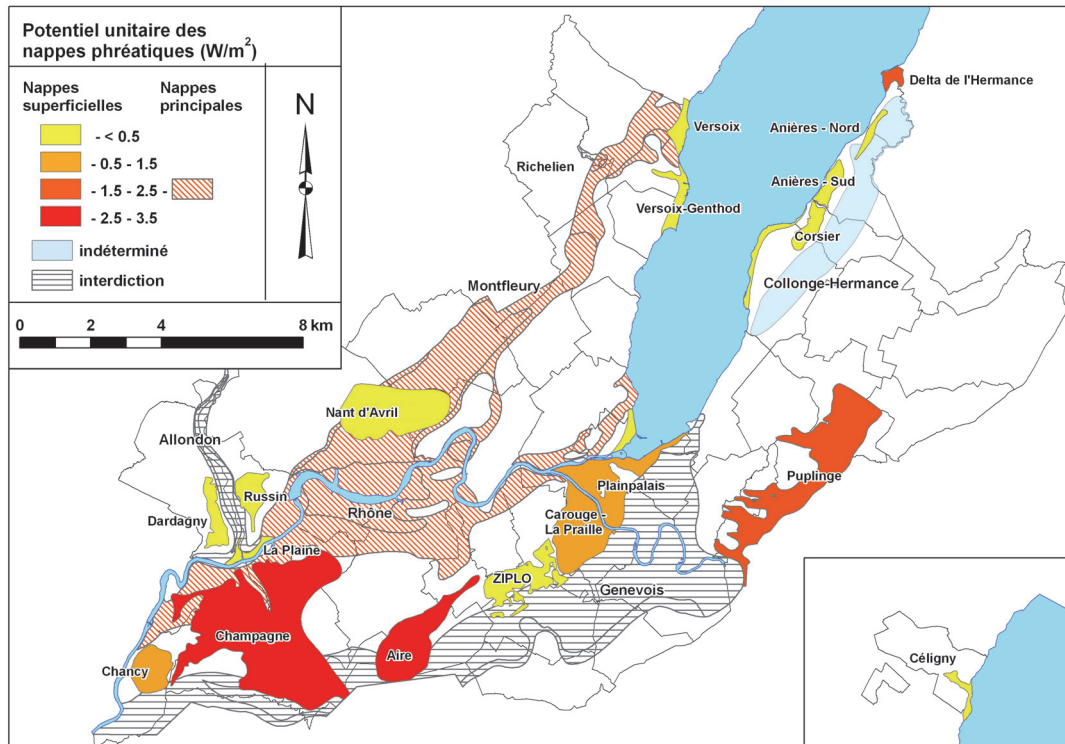


Figure 7-43. Potentiel unitaire des nappes genevoises en W/m^2

On peut également représenter le potentiel théorique de production cumulée de chaleur et de froid (Figure 7-44).

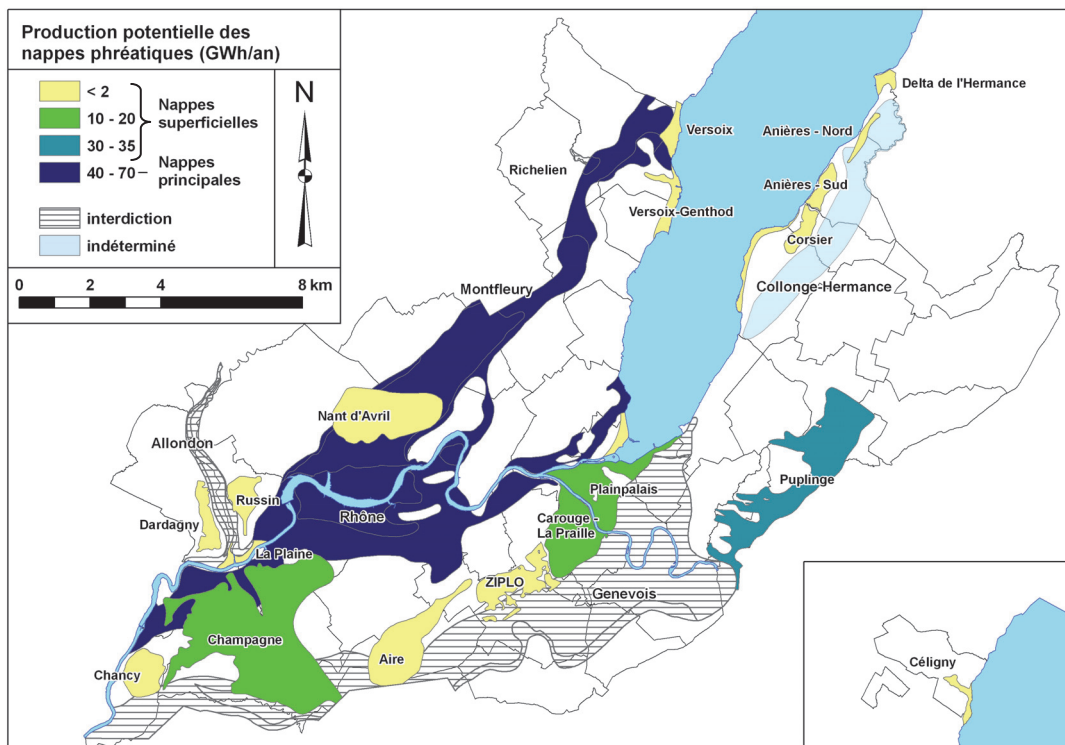


Figure 7-44. Production potentielle équilibrée de chaleur et de froid de chaque nappe genevoise, en considérant une utilisation de 2000 h/an, et un COP de 5 pour les pompes à chaleur. Calcul à partir des surfaces correspondant aux zones constructibles et de développement

Dans ce cas, seules les surfaces constructibles et de développement de chaque nappe ont été prises en compte, ce qui permet de rendre compte des possibilités d'exploitation à court ou moyen terme. Cette option relativise le potentiel de production de certaines nappes à fort potentiel unitaire mais situées en zones agricoles (Champagne, Aire, p. ex.).

Sur la base de ces informations et en considérant que les autres caractéristiques des nappes sont à peu près identiques pour les nappes principales d'une part et pour les nappes superficielles d'autre part (températures, chimie), on peut établir une carte générale qualitative du potentiel géothermique des nappes genevoises (Figure 7-45).

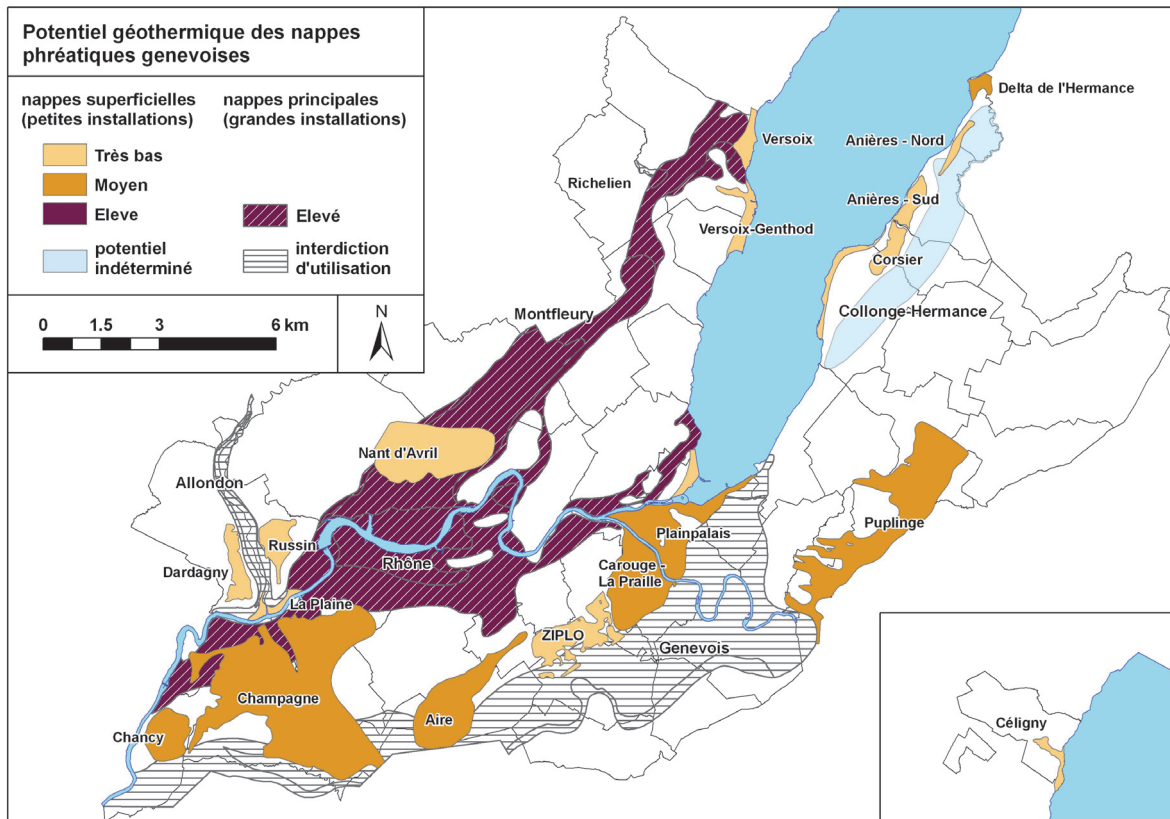


Figure 7-45. Carte du potentiel géothermique des nappes genevoises

On constate que les nappes principales sont classées comme ayant un fort potentiel (pour de grandes installations) alors que les nappes superficielles sont classées en potentiel faible ou moyen (pour de petites installations) mais jamais en fort potentiel. Ce dernier point résulte principalement de l'hétérogénéité de ces nappes qui empêchera une exploitation généralisée.

A cet égard, il est important de souligner une fois encore que ces cartes sont basées sur une estimation globale de chaque nappe et donc des paramètres hydrogéologiques moyens (en particulier perméabilité, épaisseur, gradient, températures). Dans la pratique, même pour une nappe considérée comme favorable à l'exploitation, la réalisation d'une étude hydrogéologique spécifique est indispensable pour chaque projet. En effet les variations de transmissivité (perméabilité multipliée par l'épaisseur), peuvent être très importantes, même à l'échelle d'une parcelle, particulièrement dans les nappes superficielles. La dynamique saisonnière des nappes doit également être bien appréhendée localement pour une valorisation optimale de la ressource.

La présente étude a été menée au niveau d'une première évaluation du potentiel lié à l'exploitation thermique des nappes phréatiques. Celles-ci étant déjà répertoriées avec un certain degré de connaissance, une estimation du potentiel de chacune d'entre elles a pu être réalisée par simulation. Sur cette base, il est désormais possible d'envisager la prise en compte de cette source d'énergie dans les projets situés dans des zones favorables.

Dans cette perspective, les actions suivantes sont proposées :

1. Diffuser les conclusions de la présente étude, notamment à travers le système d'information du territoire (SITG).
2. Promouvoir l'hydrothermie auprès des professionnels et des promoteurs, notamment pour les nappes principales.
3. Etablir une réglementation en faveur de l'hydrothermie, permettant également à l'autorité compétente de promouvoir une exploitation équilibrée des nappes par recharge thermique (production de chaleur et de froid) afin de limiter les phénomènes de modification de leur température à long terme.
4. Mettre au point un cahier des charges type pour une étude hydrogéologique en vue d'une exploitation hydrothermique.
5. Coordonner les études et projets utilisant l'hydrothermie avec les 3 buts principaux suivants :
 - optimiser la gestion de la ressource par accumulation des expériences (succès, échecs)
 - encourager dans certains cas une gestion centralisée de la ressource par plusieurs utilisateurs
 - diffuser les informations de base (cadastre des installations) pour une gestion intégrée des nappes et pour éviter tout problème d'influence mutuelle entre projets voisins.
6. Inclure le développement de l'hydrothermie dans la conception cantonale de l'énergie et dans le plan directeur de l'énergie comprenant les mesures décrites ci-dessus.

7.12 Bibliographie

Allen A., Milenic D., Sikora P., 2003. *Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy*, Geothermics vol. 32, pp. 569 – 578

Amberger G., 1989. Recensement et estimation de la capacité hydraulique des nappes superficielles d'eau souterraine du canton de Genève, 9 pp.

Badoux V., Peguiron E., 2009. *Groundwater Energy Designer (GED), Introduction et présentation d'un cas d'application*, Cours bloc de formation continue en géothermie basse température, 12 pp.

Courtois N., Marchal J.-P., Menjot A., Monnot P., Noël Y., Petit V., Thiéry D., Grisey A. (Ctifl), Grasselly D. (Ctifl), 2007. *Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères en France : étude de faisabilité*, rapport BRGM/RP-55481-FR, 243 pp.

CSD Ingénieurs conseils, 2010. *PLQ Les Vergers, plan localisé de quartier n° 29'674, Concept énergétique*, mandaté par le DCTI, DSPE, Service de l'énergie, Commune de Meyrin, Service de l'Urbanisme, des travaux publics et de l'énergie, 38 pp.

GADZ, 2010. *Evaluation du potentiel géothermique de la nappe de Montfleury*, mandaté par le DCTI, DSPE, Service de l'énergie, 11 pp.

Germain E, 2011 (à paraître). *Potentiel et contraintes liés à l'utilisation des ressources géothermiques dans le cadre du développement urbain. Etude de cas (Périmètre d'Aménagement Coordonné d'Agglomération) : PACA 2 - Genève - Plaine de l'Aire* (travail de Master - MUSE - Université de Genève).

Groupe de travail PDGN, 2010. Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel – PDGN, Volume 1, Rapport final, 396 pp.

Groupe de travail PGN, 2008. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)*, CREGE 11-88/02, Neuchâtel, 206 pp.

Lemale J., Gourmez D., 2008. *Guide technique : Pompe à chaleur géothermique sur aquifère, conception et mise en œuvre*, guide coédité par l'Agence régionale de l'Environnement en Lorraine (AREL), le BRGM, EDF et la Délégation régionale Lorraine de l'ADEME

Meyer M., 2004. *Les nappes d'eau souterraine superficielles du canton*, Service cantonal de Géologie, 58 pp.

Minergie et SuisseEnergie, *Calcul de la puissance de chauffe, Informations générales, fiche technique*, 5 pp.

Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEFP), 2004. *Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines*, Berne, 133 pp.

Office fédéral de l'environnement (OFEV). 2009. *Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol, Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie*, 51pp.

Urban S., Vandembroucke H., Jauffret D., Robelt P., Colin A., Chabart M., Hoogstoel R., Nguyen D., Marchal JP., Picot J., Pira K., David P. Y., Udhin Z., Arnaud L., Lereculey A., Conil P., Rodriguez G., Chretien P., Minard D., Thinon-Larminach M., Cailleaud T., Brenot A., Chretien M., Bézègues-Courtades S., Martin J.C., 2009. *PNIGRA : Programme National des Inventaires Géothermiques Régionaux sur Aquifères. Rapport final*. BRGM/RP-57915-FR, 195 pp.

Sites internet

BRGM-géothermie : http://www.brgm.fr/brgm/geothermie/serv_public.htm

Fondation centime climatique : www.klimarappen.ch - Réseau de chaleur à distance à Cartigny

Mines ParisTech, Centre énergétique et Procédés de Paris, Chiffres clés de la climatisation en France et dans le monde : <http://www-cep.enscm.fr/francais/themes/syst/html/cles.htm>

Services industriels de Genève : <http://www.sig-ge.ch/>

Législation fédérale

Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux), RS 814.20

Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux (OEaux), RS 814.201

Législation cantonale

Loi sur les constructions et les installations diverses L 5 05 (LCI)

Loi sur les eaux L 2 05 (LEaux-GE) - version entrée en vigueur le 18.5.2010

Règlement d'exécution de la loi sur les eaux L 2 05.01 (REaux-GE) - version entrée en vigueur le 23.9.2010

Règlement sur l'utilisation des eaux superficielles et souterraines L 2 05.04 (RUESS) - version entrée en vigueur le 23.9.2010

8. Stockage saisonnier

8.1 Introduction

Le stockage saisonnier est un stockage à long terme (de quelques mois à quelques saisons) destiné à réserver l'énergie thermique produite essentiellement en été pour l'utiliser durant l'hiver. Il peut s'agir de la chaleur produite par des machines (ordinateurs, machines dans un atelier) ou d'un équipement électrique, de la charge thermique produite par des besoins de refroidissement, ou de la chaleur produite par l'énergie solaire par exemple. Il est également possible de stocker dans le sous-sol des réserves de « froid » pendant l'hiver pour ensuite les réutiliser durant l'été. L'avantage du stockage de chaleur dans le sol est que de grands volumes peuvent être utilisés pour le stockage sans utiliser beaucoup de place en surface pour autant que le stock puisse être suffisamment profond. La profondeur peut en effet être limitée en raison notamment de la protection des eaux (Pahud, 2005).

Le stockage saisonnier est une composante importante de la géothermie de basse température. En effet, il est souvent indispensable de réinjecter dans le terrain de la chaleur en été, et éventuellement du froid en hiver, pour garantir le fonctionnement à long terme d'un système d'exploitation géothermique sans épuiser la source de chaleur et de froid du sol (voir chapitre 5.12.2).

Plusieurs formes de stockage existent : il peut se faire soit directement dans le sol (champs de sondes et géostructures énergétiques), dans un aquifère (doublet géothermique), ou encore dans des systèmes artificiels (sol remanié avec sondes horizontales, réservoir enterré).

8.2 Principes et dimensionnement

Un stock saisonnier de chaleur doit posséder cinq caractéristiques essentielles (SIA D 028) :

1. Le stock doit pouvoir emmagasiner une grande quantité (densité) de chaleur.
2. Le stock doit pouvoir recevoir et restituer de l'énergie sans écart excessif entre les températures d'entrée et de sortie (ce qui peut créer un problème de puissance maximale disponible).
3. Le stock doit avoir peu de pertes de chaleur par rapport à sa capacité.
4. Le stock doit avoir une durée de vie d'au moins 20 ans.
5. Le stock doit être d'un coût limité.

Il existe de nombreux systèmes de stockage de chaleur (Figure 8-1; SIA D 028 ; Pahud, 2005). Les principaux sont :

- **Stock diffusif dans le sol avec échangeurs verticaux** : le transport de chaleur se fait majoritairement par conduction, et le stock se fait directement dans le sol. Les échangeurs de chaleur sont verticaux et il s'agit généralement de sondes géothermiques verticales. Un tel stock permet l'utilisation de très grands volumes de sol.
- **Stock diffusif dans le sol à échangeurs horizontaux** : comme dans le cas précédent le transfert de chaleur se fait par conduction et le stockage se fait directement dans le sol. Cependant les échangeurs sont horizontaux et la mise en place du stock requiert généralement l'excavation du volume entier. Il est possible d'isoler toutes les parois du stock pour augmenter son efficacité.
- **Stock dans un aquifère** : dans ce cas de figure, le transport de chaleur se fait par conduction et par convection et le stockage se fait à la fois dans l'eau et la matrice de l'aquifère. Le stockage est mis en place à l'aide d'un ou plusieurs puits de pompage. Une utilisation courante est celle du doublet géothermique (chapitre 7.2).

- **Stock convectif dans un réservoir** : le transport de chaleur se fait de façon convective et le stockage prend place dans de grands réservoirs d'eau, partiellement ou totalement enterrés.

Le stockage dans un réservoir ou dans une cuve est très efficace, mais également coûteux. De même pour le stockage diffusif à échangeurs horizontaux, qui requiert une excavation importante. Les systèmes les plus abordables sont donc les stocks diffusifs dans le sol avec échangeurs verticaux et l'utilisation des aquifères, qui ne requièrent pas de remaniement important du sol. Ces deux possibilités seront donc étudiées plus particulièrement dans le cadre de ce rapport.

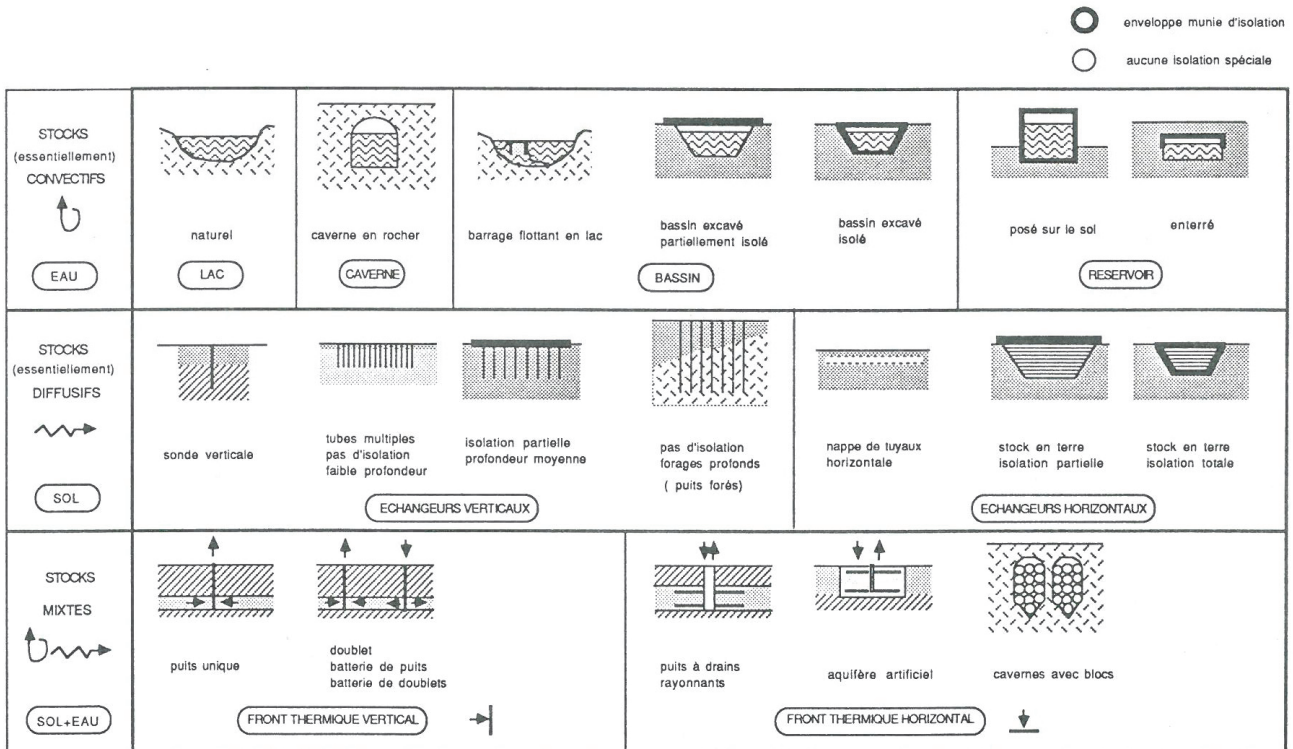


Figure 8-1: différents types de stockage (SIA D028)

Les systèmes de stockage peuvent encore se subdiviser en deux familles, selon qu'ils utilisent ou non une pompe à chaleur (Pahud, 2005) :

- **Stockage saisonnier avec pompe à chaleur** : une pompe à chaleur est utilisée pour extraire la chaleur du sol. Dans ce cas de figure, la recharge du sol, assurée par exemple par une extraction de froid pour des besoins de refroidissement, est nécessaire. La recharge peut également se faire en utilisant de l'énergie solaire, ou encore avec de la chaleur produite par des machines ou appareils électriques, ou toute autre source de chaleur bon marché. Ce type de stockage se fait à relativement basse température (généralement entre 5 et 35°C).
- **Stockage saisonnier sans pompe à chaleur** : ce système n'utilise pas de pompe à chaleur. La source de l'énergie (énergie solaire ou énergie produite par des machines) est utilisée directement lorsque cela est possible (il est également possible d'intégrer un stockage intermédiaire à court terme dans ce but) et sinon stockée dans la réserve saisonnière. Suivant le niveau de température de la distribution de chaleur, le stockage saisonnier sans PAC fonctionne normalement à des températures moyennes (25 – 50°C) ou élevées (30 – 80°C). Ce type de stockage est plus délicat à dimensionner. Il est toutefois extrêmement intéressant de se passer des besoins électriques qu'implique une pompe à chaleur.

8.2.1 Dimensionnement du stock

Le dimensionnement dépend de la **capacité** et de l'**efficacité** du stock, de la demande en chaleur du site et des **pertes thermiques**.

La **capacité spécifique de stockage** C_{sp} est équivalente à la quantité d'énergie thermique pour changer la température moyenne du lieu de stockage de 1 K. Elle est estimée à partir de la capacité calorifique volumétrique du sol et du volume de stockage :

$$C_{sp} = C_v \cdot V$$

avec C_{sp} = capacité de stockage spécifique [J/K] ; C_v = capacité calorifique moyenne du sol [J/m³K] et V = volume du site de stockage [m³]

A partir de la capacité de stockage spécifique, on peut déterminer la **capacité de stockage** C . Il s'agit de la quantité maximum d'énergie thermique qui peut être stockée. Elle dépend des températures moyennes minimum et maximum du site de stockage durant un cycle (une année) ainsi que de la température moyenne et du volume du site. La capacité de stockage est exprimée ainsi :

$$C = C_{sp} (T_{stk-max} - T_{stk-min}) = C_v V (T_{stk-max} - T_{stk-min})$$

avec C = capacité de stockage [J] ; $T_{stk-max}$ = température moyenne maximum du site de stockage [°C] ; $T_{stk-min}$ = température moyenne minimum du site de stockage [°C].

La température maximum du stockage est contrôlée par le niveau de température de la source de chaleur et la capacité de transfert de chaleur du site de stockage. Pour un système sans pompe à chaleur, un paramètre important est la température de retour du fluide après la distribution de chaleur.

La quantité d'énergie soutirée annuellement ou la quantité d'énergie injectée peuvent être plus élevées que la capacité de stockage si le stock n'est pas purement saisonnier. Pour quantifier cette notion, on utilise le **nombre équivalent de cycles NCE**, aussi appelé **index de cycle équivalent EC** :

$$NCE = E_s / C$$

Où NCE = le nombre équivalent de cycles ; E_s = énergie soutirée annuellement du stock [kWh ou MJ] ; C = capacité du stock [kWh ou MJ].

NCE mesure donc le nombre de fois que le stock a été totalement recyclé durant une période de stockage-déstockage (un cycle). Dans le cas d'un stockage saisonnier, cette période correspond à un an. Pour les stocks à long terme, NCE vaut généralement 1.5 ou 2. Un stock parfaitement saisonnier aura un NCE de 1, alors que pour un stockage journalier utilisé toute l'année, NCE serait de 365.

L'**efficacité du stock saisonnier** dépend du **cycle annuel** que décrit un stock de chaleur. Il peut y avoir 3 phases dans ce cycle :

- Une phase de **charge du stock**, durant laquelle on injecte de la chaleur (ou du froid) dans le stock,
- Une phase de **décharge du stock** durant laquelle la chaleur (ou le froid) est prélevée du stock,
- Une phase de **repos**, durant laquelle le stock n'est pas sollicité.

Des pertes de chaleur ont lieu durant les trois phases, et entraînent une baisse de température du stock, qui peut être trop importante pour en permettre l'utilisation. La limite inférieure acceptable de la température du stock pour l'exploitation thermique dépend de l'utilisation prévue de la chaleur, donc du système dans lequel le stock doit s'insérer, ainsi que de la manière dont la régulation du système est effectuée.

Pour les systèmes sans pompe à chaleur cette limite est fixée par la température de retour du réseau alimentant les consommateurs (pour ordre de grandeur : 30 à 60°C pour un chauffage traditionnel, 25 à

40°C pour un chauffage à basse température, 80 à 90°C pour un réseau urbain). Si le stock est exploité par une pompe à chaleur, la limite est plus basse (0 à 30°C) et dépend des caractéristiques de la pompe. Il est cependant nécessaire de connaître le moment où cette limite est atteinte (Figure 8-2).

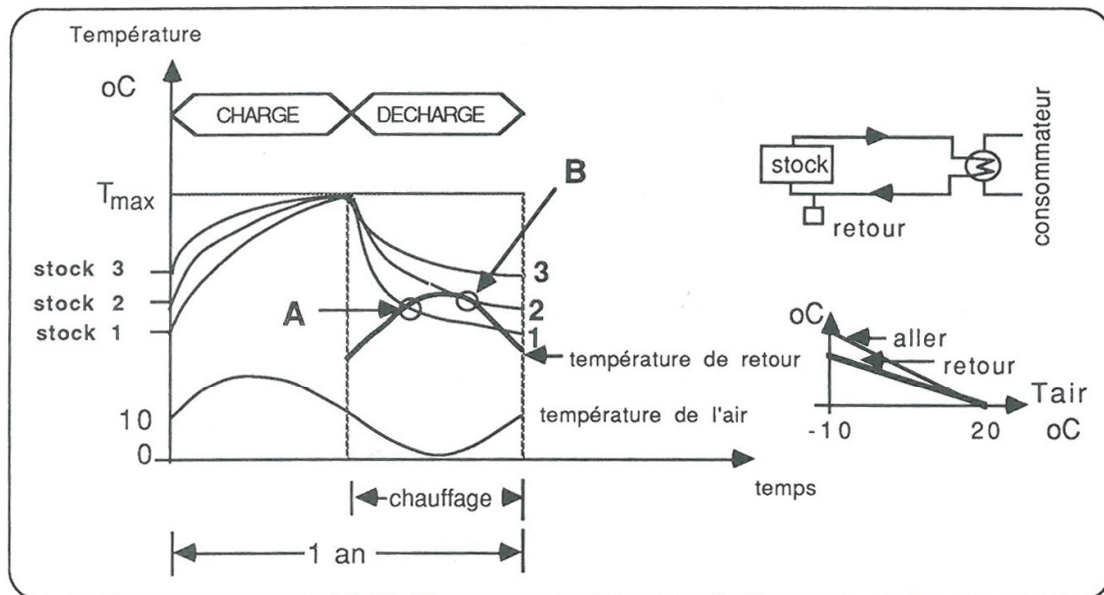
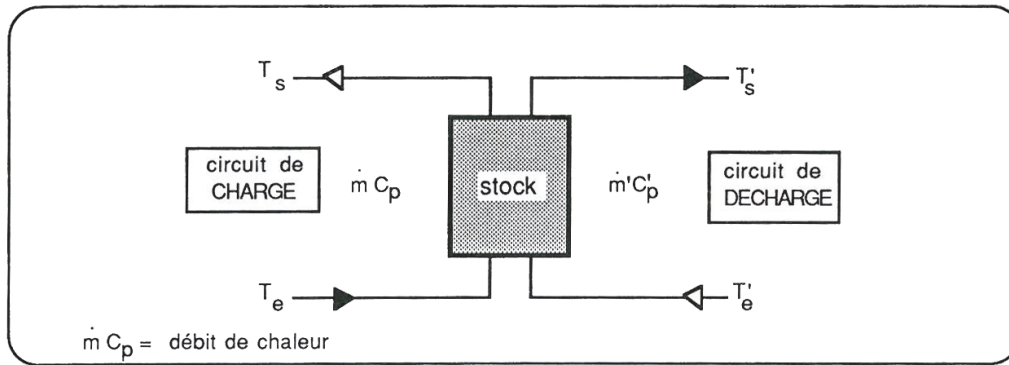


Figure 5.4: Importance de la température de retour pour définir l'utilité d'un stock saisonnier de chaleur:

- ° le stock 3 est utilisable toute l'année sans pompe à chaleur
- ° le stock 2 est juste utilisable toute l'année (B = point de tangence)
- ° le stock 1 n'est plus utilisable à partir du point A (il évolue alors librement). Sa température est devenue trop basse, même s'il contient encore "de l'énergie". Intégré dans un système, son efficacité serait très réduite, à moins de mettre en oeuvre une pompe à chaleur.

Figure 8-2: importance de la température de retour pour définir l'utilité du stock : le stock 3 est utilisable toute l'année, le stock 2 est juste utilisable toute l'année (B = point de tangence), et le stock 1 n'est plus utilisable à partir du point A (il évolue alors librement). Sa température est devenue trop basse. Il faudrait mettre en œuvre une pompe à chaleur pour utiliser l'énergie encore contenue dans ce stock (SIA D028).

La notion de température limite d'utilisation du stock est fondamentale pour comparer plusieurs stocks et définir l'efficacité réelle d'un stock : en effet dans plusieurs cas seul le stock a été étudié pour une température limite anormalement basse, ce qui surestime son efficacité. La définition de l'efficacité de stockage est définie dans la Figure 8-3.



$$\eta = \frac{\text{Energie soustrée}}{\text{Energie injectée}} = \frac{\int_0^t \dot{m}' C_p' (T'_s - T'_e) dt}{\int_0^t \dot{m}' C_p (T_s - T_e) dt}$$

$$\eta = \frac{E_s}{E_i} = \frac{E_s}{E_s + P} = \frac{1}{1 + \frac{P}{E_s}} = 1 - \frac{P}{E_i}$$

avec :

- P = pertes annuelles kWh/an = $E_i - E_s$
- E_s = énergie soustrée kWh/an = $E_i - P$
- E_i = énergie injectée kWh/an = $E_s + P$

→ η = efficacité énergétique du cycle annuel

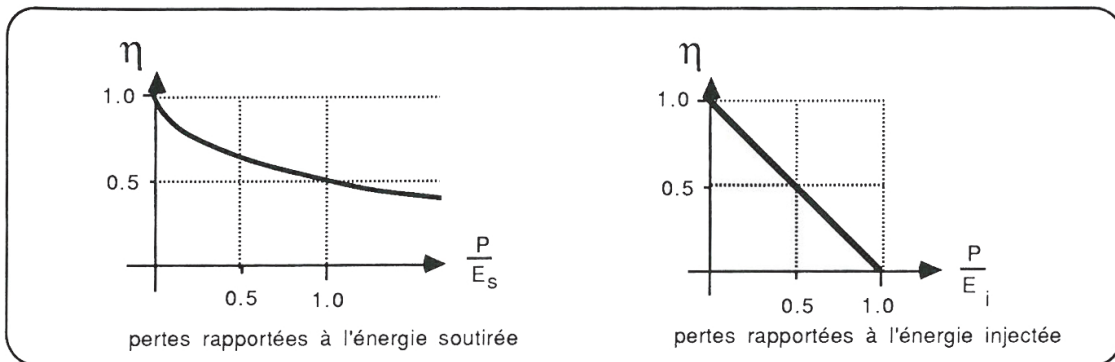


Figure 8-3: définition de l'efficacité d'un stock de chaleur (SIA D028)

Une notion pour définir l'efficacité du stock est celle du **rendement de stockage η** (storage efficiency). Elle est définie par le rapport entre l'énergie extraite annuellement et l'énergie injectée par année :

$$\eta = Q_{ext} / Q_{inj}$$

avec Q_{inj} = énergie injectée par année dans le stock [J] et Q_{ext} = énergie extraite du stock par année [J]

En admettant que la température du site de stockage retourne à la normale après 1 cycle (1 année), le rendement du stockage peut aussi être calculé par l'équation suivante :

$$\eta = Q_{ext} / (Q_{ext} + Q_{loss}) = (Q_{inj} - Q_{loss}) / Q_{inj} = 1 - Q_{loss} / Q_{inj}$$

avec Q_{loss} = perte thermique annuelle [J]. Si la température du site de stockage revient au même niveau après une année, le bilan du stockage donne $Q_{inj} = Q_{ext} + Q_{loss}$.

L'efficacité du stockage dépend des pertes annuelles du stock Q_{loss} et du mode d'utilisation Q_{ext} . Pour une capacité de stock donnée, le rendement du stockage dépend également de l'intégration du stockage dans le système de chauffage et/ou de refroidissement, et du type et du mode d'opération du système.

Pour le stockage saisonnier à basse température (avec PAC), il est possible d'atteindre des rendements de stockage de 60 à 90%. Pour des stockages à moyenne et haute température, le rendement dépend fortement de l'importance relative des pertes de chaleur par rapport à l'énergie stockée (Q_{loss}/Q_{inj}). Ce rapport diminue avec l'augmentation de la taille du site de stockage, car bien que les pertes de chaleur augmentent lorsque la surface de l'enveloppe augmente (proportionnellement au carré de la longueur), l'énergie stockée augmente plus rapidement avec le volume de stockage (proportionnellement au cube de la longueur). Pour un relativement petit volume de stockage saisonnier (10'000 – 20'000 m³), l'efficacité du stockage se situe entre 30% et 60%. Avec de plus grands volumes (>20'000 m³) on atteint généralement un rendement de 50 – 80%.

Les **pertes thermiques** du stockage dépendent de quatre facteurs, indiqués dans le tableau suivant

Equation de base : $P = K * A * (T_{moy} - T_o) * t$ [MJ/an] ou [W]				
	K	A	(T _{moy} - T _o)	t
Identification →	déperdition spécifique W/m ² K	surface d'enveloppe m ²	écart de température entre stock et environnement °C	temps s
Action possible pour réduire P sans modifier la performance →	<ul style="list-style-type: none"> ° éviter les ponts thermiques ° mieux isoler les faces les plus chaudes ° placer le stock plus profondément ° changer de site 	<ul style="list-style-type: none"> ° réduire le rapport surface/volume ° augmenter le volume 	<ul style="list-style-type: none"> ° réduire la température du stock (donc celle de la distribution) ° enterrer le stock 	<ul style="list-style-type: none"> ° diminuer la durée du stockage ° ne stocker que des excédents
Domaine concerné →	<ul style="list-style-type: none"> - Enveloppe - Matériaux - Milieu - Profondeur 	<ul style="list-style-type: none"> - Enveloppe - Forme - Taille 	<ul style="list-style-type: none"> - Système de distribution - Milieu environnant 	<ul style="list-style-type: none"> - Réglage - Optimiser

Tableau 8-1: facteurs contrôlant les pertes de chaleur (SIA D028)

Les pertes de chaleur du stockage dépendent donc principalement de la température annuelle moyenne de la zone de stockage $T_{stk-moy}$, de la température ambiante moyenne T_o , d'un facteur de perte de chaleur équivalent K et de l'aire de l'enveloppe du stock A. La perte de chaleur moyenne est conditionnée par les caractéristiques de la zone de stockage (géométrie, isolation de la partie supérieure etc.) et les propriétés du sol, tout en dépendant également du temps t. Un processus thermique de transition dure généralement quelques années jusqu'à ce que le processus stable soit établi. Un effet de convection (libre ou forcée) dans le sol va provoquer de plus grandes pertes de chaleur.

Dans le cas d'un processus de transfert thermique majoritairement conductif, les pertes de chaleur seront exprimées par l'équation suivante sous un régime stabilisé :

$$Q_{loss} = K \cdot A(T_{stk-moy} - T_0)t_{year}$$

avec Q_{loss} = perte annuelle de chaleur stockée [J] ; K = facteur de perte équivalente [W/m^2K] ; $T_{stk-moy}$ = température moyenne annuelle du stock [$^{\circ}C$] ; T_0 = température ambiante annuelle moyenne [$^{\circ}C$] ; t_{year} = durée d'une année [s].

Les pertes de chaleur peuvent être limitées par :

- L'isolation de la partie supérieure du stock (ce facteur est plus important pour les petits stocks)
- La forme du stock : un stock ayant une extension verticale deux fois plus grande que son extension horizontale subira moins de perte
- Une distribution de chaleur à basse température, ce qui engendre une température annuelle moyenne plus basse de la zone de stockage

Bien entendu ces pertes peuvent devenir des gains de chaleur si la température de l'environnement est supérieure à celle du stock (Figure 8-4).

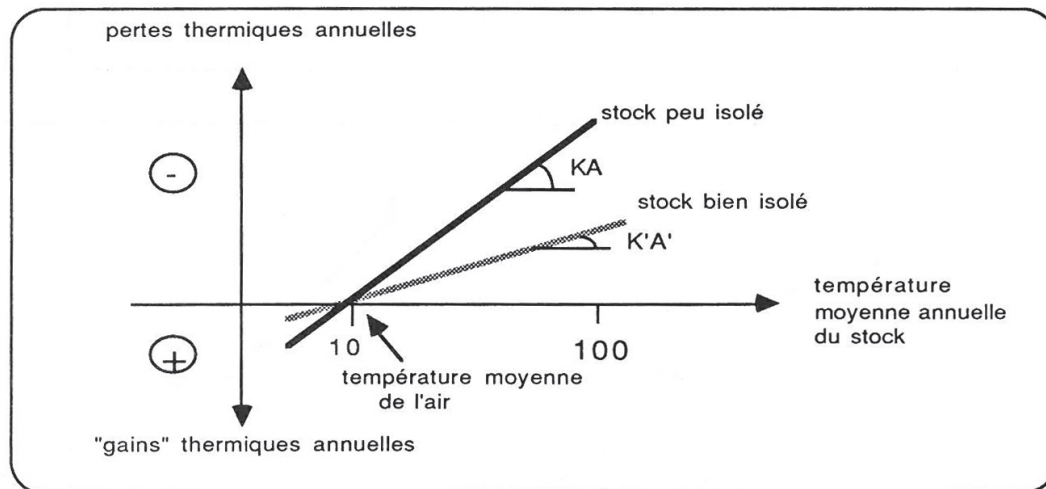


Figure 8-4: pertes thermiques d'un stock saisonnier selon sa température moyenne (SIA D028)

Le dimensionnement de ces systèmes requiert une simulation dynamique, particulièrement les systèmes sans pompes à chaleur. Il est important de modéliser le stockage comme partie intégrante du système de chauffage et/ou de refroidissement et de prendre en compte à la fois les processus à long terme et à court terme.

8.2.2 Stockage avec sondes géothermiques verticales

Le principe de ce type de stockage est d'utiliser le sol comme milieu stockeur en créant un échangeur de chaleur à l'aide d'une ou de plusieurs sondes géothermiques (Figure 8-5). Le mode de transmission de chaleur se fait essentiellement par conduction.

Ce type de stockage présente de nombreux avantages : tout d'abord il est possible d'utiliser un très grand volume de stockage (plus de 100'000 m³) accessible depuis la surface sans perturbation majeure visible, et en préservant l'utilisation de la surface du sol. Le principe est applicable dans tous les types de sol.

Pour des stocks dans un grand volume avec des sondes profondes, il est possible d'éviter l'installation d'une isolation au sommet de la zone de stockage en rendant inactif thermiquement les 10 ou 15 premiers mètres de chaque tube. Cette couche de terrain non sollicitée fait alors office d'isolation ou de « frein

thermique » avec une excellente résistance thermique. La fonction de stockage est également possible (et souvent indispensable) avec des géostructures (pieux) énergétiques.

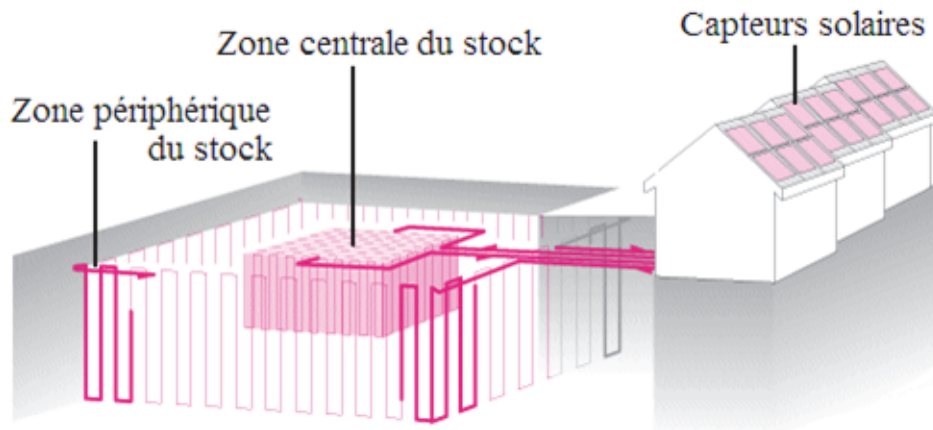


Figure 8-5: exemple de stockage souterrain avec champs de sondes (site CSTR)

Les conditions défavorables à ce type de stockage sont surtout d'ordre hydrogéologique. En effet un écoulement important d'eau souterraine peut entraîner la chaleur injectée dans le sol hors de la zone d'échange. Des reconnaissances hydrogéologiques étendues sont donc souhaitables avant l'établissement d'un projet définitif. Il est également nécessaire de mener une étude approfondie d'optimisation du système et de tenir compte des caractéristiques thermodynamiques du terrain. Relevons toutefois qu'à Genève les conditions sont globalement favorables (chapitres 4.1 et 4.2).

La surface d'échange nécessaire dépend des conditions de pointe en charge ou en décharge du stock. Dans le cas d'une source solaire opérationnelle en moyenne 8 heures par jour, il est souhaitable pour les grands stocks d'insérer un stock-tampon capable d'absorber l'énergie fournie par les capteurs et de charger le stock saisonnier 24 h sur 24. Ce stock-tampon peut consister en un réservoir d'eau, dimensionné pour absorber la production journalière des capteurs solaires.

Le cas échéant, un stockage de chaleur diffusif doit être intégré dans le concept énergétique de chauffage et de refroidissement des bâtiments. Le dimensionnement doit être effectué très tôt dans le projet car les sondes sont souvent placées sous d'autres structures et doivent donc être installées avant le début de la construction.

Le dimensionnement de ce type de stockage revient à dimensionner son échangeur de chaleur, qui est formé par un ensemble de sondes géothermiques. Il s'agit de déterminer le nombre et la profondeur de sondes géothermiques ainsi que leur emplacement, de manière à pouvoir fournir la plus grande fraction possible de la demande d'énergie de chauffage et de refroidissement, tout en satisfaisant aux contraintes initiales : limite de surface, terrain (Pahud, 2001).

CONDITIONS DU SITE

Les dimensions principales du site sont la **conductivité thermique k ou λ** (W/mK) et la **capacité calorifique volumique C** (J/m³K). Ces deux paramètres ont été évalués sur le territoire genevois dans les points 4.2 et 5.11.1.

Ces deux paramètres permettent d'estimer la **diffusivité thermique a** , exprimée de la façon suivante :

$$a = \frac{k}{\rho C} \quad [\text{m}^2/\text{h}] \text{ ou } [\text{m}^2/\text{s}]$$

La diffusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à transmettre un signal de température d'un point à l'autre de ce matériau. La diffusivité peut également être déduite de la mesure de l'évolution annuelle des températures de deux points situés à des profondeurs différentes.

DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME

Ce système est un échangeur de chaleur en même temps qu'un stock. Etant donné que le transfert de chaleur se fait principalement par conduction, l'échangeur de chaleur est généralement peu efficace. Cela résulte souvent en une baisse significative de température. Les caractéristiques principales de ce type de stockage sont :

- La capacité de transmission de chaleur
- La capacité de stockage spécifique
- L'efficacité de stockage

La capacité de stockage spécifique et l'efficacité de stockage ont été traitées au point 8.2.1.

Lorsqu'un transfert de chaleur constant est réalisé dans le sol par une sonde, une différence de température se développe entre le fluide et le sol. La différence de température augmente jusqu'à ce qu'un régime stable s'établisse. A ce moment la température du sol dans le site de stockage augmente aussi rapidement que la température moyenne du fluide. La différence de température reste alors stable et constante tant que le taux d'injection de chaleur reste constant.

La **capacité de transmission** est définie pour de telles conditions de flux stable. Elle détermine le taux de transfert par unité de différence de température entre le fluide caloporteur et le site de stockage. La période de transition jusqu'à l'établissement d'un régime stable peut être estimée par l'équation suivante :

$$t_{sf} = 0.065 \frac{A_p}{a}$$

avec t_{sf} = temps nécessaire jusqu'à l'établissement d'un régime stable [s] ; A_p = section de sol assignée à un forage [m^2]. Avec un arrangement de forages quadratique, $A_p = B \times B$ où B correspond à l'espacement. ; a = diffusivité thermique du sol [m^2/s].

Des valeurs types pour un stockage souterrain sont : $a = 10^{-6} m^2/s$ et $B = 3 m$. Le temps t_s équivaut généralement à une semaine.

La capacité de transfert dépend de la longueur totale de forage et de la résistance thermique du flux stable, composée par la somme de la résistance thermique du forage et de la résistance thermique du sol. La **résistance thermique du sol** est calculée pour une région circulaire autour de chaque forage. L'équation de cette résistance est la suivante :

$$R_{sf} = \frac{1}{2\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{\pi r_b}} \right) - 0.75 \right] + R_b \quad \text{si} \quad \frac{\sqrt{A_p}}{\sqrt{\pi r_b}} \geq 15$$

avec R_{sf} = résistance thermique en flux stable [$K/(W/m)$] ; λ = conductivité thermique moyenne du sol [W/mK] ; r_b = rayon du forage [m] et R_b^* = résistance thermique de la sonde [$K/(W/m)$]

La **capacité de transfert de la chaleur** est exprimée de la façon suivante :

$$UA = \frac{nH}{R_{sf}}$$

avec UA = capacité de transfert du lieu de stockage [W/K] ; n = nombre de sondes ; H = longueur moyenne des sondes [m]

Une estimation du transfert de chaleur dans des conditions stables est calculée avec l'équation suivante pour une perte de température connue :

$$P = UA(T_f - T_{stk})$$

avec P = taux de transfert de chaleur depuis le stockage [W] ; T_f = température moyenne du fluide dans la sonde (peut être calculée à partir des températures d'entrée et de sortie du système) ; T_{stk} = température moyenne du stockage (Pahud. 2005).

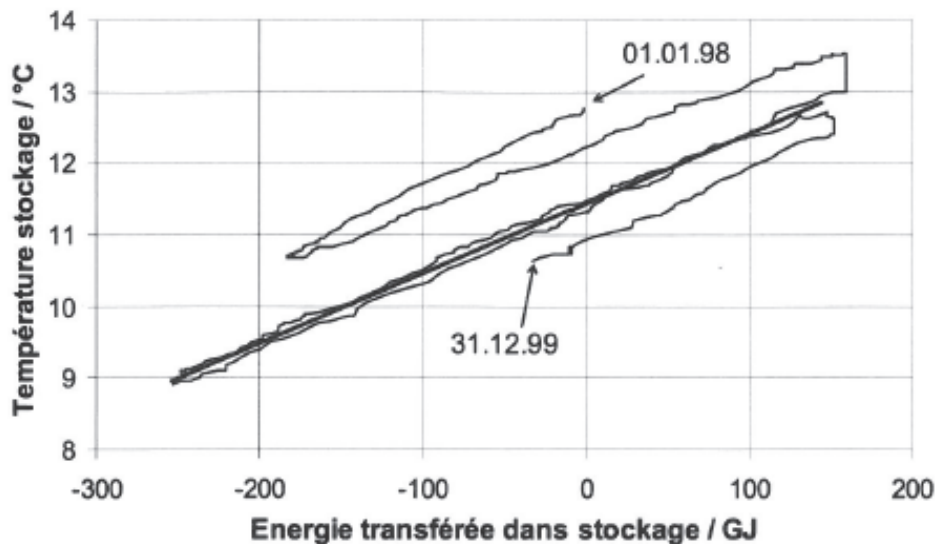


Figure 8-6: température moyenne du stockage représentée en fonction de l'énergie nette transférée par l'échangeur souterrain (cumul énergie injectée - énergie soutirée) (Pahud, 2005)

Si le stockage n'a pas de pertes thermiques, un cycle de charge – décharge fera se déplacer les points de la courbe sur une droite dont la pente (en K/GJ) est l'inverse de sa capacité thermique spécifique (en GJ/K). Les pertes thermiques du stockage vont déplacer les points sur la droite du graphique. A l'inverse, ces points seront déplacés sur la gauche si les pertes thermiques sont en réalité des gains thermiques, par exemple si une extraction importante de chaleur diminue, voire inverse les pertes thermiques.

8.2.3 Le stockage en aquifère

Le principe de base du stockage en aquifère est d'utiliser un milieu poreux, perméable et saturé comme support de stockage en faisant appel à la capacité calorifique du mélange eau-sol. En outre, le transfert de chaleur est assuré directement par l'eau injectée ou prélevée dans l'aquifère. Physiquement, deux processus de transfert de chaleur sont mis à contribution : la diffusion et la convection forcée. La convection naturelle intervient également dans le système, mais représente plutôt un inconvénient étant donné qu'elle tend à faire perdre le contrôle de l'eau chaude injectée.

Le stockage en aquifère présente de nombreux avantages. De très grands volumes de stockage sont accessibles à partir d'un ouvrage (forage) dont la difficulté de réalisation et le coût dépendent assez peu de la taille du réservoir constitué. Le coût d'accès à la ressource est ainsi relativement faible.

Les puissances de transfert peuvent être très importantes, car elles ne sont pas limitées par le phénomène de diffusion. En effet l'eau est à la fois le vecteur et le milieu de stockage de la chaleur. Les stocks de taille importante peuvent atteindre des efficacités de stockage élevées.

De nombreux aquifères impropres à la consommation d'eau sont disponibles dans une grande partie du canton (voir chapitre 7). Comme dans le cas du stockage avec champ de sonde, l'emprise à la surface

d'une telle installation est très réduite par rapport au volume de stockage atteint. Pour des aquifères d'une certaine profondeur, aucune isolation n'est nécessaire.

Un des inconvénients de cette méthode de stockage peut être la chimie des eaux souterraines : en effet, le réchauffement et le refroidissement d'eaux riches en minéraux peut entraîner des phénomènes de précipitation, ce qui peut provoquer le colmatage des conduites et des échangeurs. Ces effets sont d'autant plus importants que la température du stockage est élevée. Il est possible de traiter l'eau (acidification) pour éviter ces inconvénients, mais cela peut avoir un impact négatif majeur sur l'environnement naturel de l'aquifère.

Il est également difficile de prévoir les performances thermiques d'un aquifère. En effet, les aquifères peuvent présenter des caractéristiques très hétérogènes. De plus, le stock n'étant pas confiné, l'extension de la perturbation thermique peut devenir importante et difficilement contrôlable. Des cellules de convection peuvent se mettre en place dans l'aquifère et entraîner des pertes de chaleur importantes et l'écoulement naturel de l'eau souterraine peut entraîner la perte du stock. Il est donc important d'entreprendre des reconnaissances géologiques approfondies.

Les coûts d'exploitation doivent également être étudiés. Un aquifère de moindre perméabilité conduira à des charges d'exploitation plus élevées mais permettra également un contrôle plus sûr des fronts thermiques (SIA D 028).

Enfin, il faut aussi tenir compte du règlement d'utilisation des eaux (chapitre 7.7). La chimie des eaux ne peut pas être modifiée si cela peut être nuisible à l'environnement, et les changements de températures sont limités dans la distance.

DIMENSIONNEMENT

Cette technique est exigeante en termes de conditions hydrogéologiques : l'aquifère utilisé doit être capable à la fois de fournir un débit suffisant et constant, de permettre la réinjection de ce même débit et la récupération de l'énergie stockée la saison précédente avec un taux de restitution acceptable. Aucune zone n'est donc exclue a priori mais une étude au cas par cas sera nécessaire.

Chaque aquifère représente donc un cas particulier. Quel que soit le site, la **vitesse naturelle d'écoulement de l'aquifère** est le facteur qui va le plus conditionner l'efficacité du stockage thermique, ainsi que le retard thermique (chapitre 7.2). En plus de la vitesse d'écoulement et du retard thermique, il est également possible d'estimer le **rayon thermique**, qui donne un ordre de grandeur du volume d'aquifère influencé à la fin d'un cycle de stockage :

$$R_{th} = \sqrt{\frac{Cv_f \cdot v}{Cv_a \cdot \pi e}}$$

Avec : Cv_f = capacité calorifique volumique du fluide ; Cv_a = capacité calorifique volumique résultante pour l'aquifère saturé ; v = volume d'eau injecté au cours d'un cycle ; e = épaisseur de l'aquifère saturé en eau (Courtois et al., 2007).

De même que pour l'exploitation des aquifères, il est possible de calculer la **puissance thermique globale instantanée** fournie par l'eau (Allen et al., 2003 ; Courtois et al., 2007) :

$$P_g = Cv_e \cdot Q \cdot \Delta T$$

Avec P_g = puissance globale extractible (kW) ; Cv_e = capacité calorifique volumique de l'eau (kJ/m³K) ; Q = débit de pompage/injection ; ΔT = réduction de température après exploitation thermique.

Dans le cas particulier du stockage thermique en aquifère, l'**efficacité thermique** se mesure par l'écart de température des eaux stockées et pompées par rapport à la température initiale de l'aquifère. On introduit

alors la notion de puissance thermique « utile », qui correspond au surplus de puissance obtenu par stockage par rapport à une exploitation « simple » des eaux de l'aquifère.

$$P_u = C_{V_f} \cdot Q \cdot |T - T_{aquifère}^0| = P_g \cdot \frac{|T - T_{aquifère}^0|}{T}$$

Avec P_u = puissance thermique « utile » (W) ; T = température des eaux injectées/pompées aux puits chaud et froid ;

L'intégration de la puissance thermique instantanée permet d'obtenir la **quantité d'énergie disponible**. On définit de la même manière une quantité d'énergie « globale » et une quantité d'énergie « utile » par rapport à un aquifère.

$$\omega_u = \int_0^t P_u(t) \cdot dt$$

Avec ω_u = énergie « utile » injectée / pompée sur un cycle de temps t ; P_u = puissance thermique « utile » [W].

Il est alors possible de calculer un taux de récupération τ_r pour chaque puits, en divisant la quantité d'énergie « utile » pompée sur un cycle de temps t par la quantité d'énergie « utile » injectée sur le cycle de temps de la saison précédente

$$\tau_r = \frac{\omega_u^{pompée}}{\omega_u^{injectée}} = \frac{\int_0^t P_u^{pompée}(t) \cdot dt}{\int_0^t P_u^{injectée}(t) \cdot dt}$$

Les **conditions d'exploitation** contrôlent de manière directe les performances d'un stock en aquifère en terme de température de soutirage et de taux de récupération. Les paramètres géologiques ont un rôle plus réduit, mais ils peuvent empêcher l'utilisation de certains aquifères pour le stockage.

POTENTIEL DE DEVELOPPEMENT

Pour être efficace, le stockage en aquifère sans pompe à chaleur doit satisfaire à une **taille minimale** (un volume d'injection d'au moins 150 m³/j pendant 5 à 6 mois est nécessaire). Cette technique se limite donc au chauffage de quartiers d'habitations ou de grands bâtiments (par exemple : grands immeubles locatifs, bureaux, hôpitaux). Avec une PAC, le volume de stockage nécessaire est bien plus réduit, car les différences de températures entre l'eau injectée et l'eau de l'aquifère sont plus faibles.

La **température limite** d'utilisation est une condition d'exploitation particulière, qui ne conditionne pas la réponse du stock en termes de température ou de débits restitués. Elle est par contre un facteur essentiel du taux de récupération, c'est-à-dire de l'énergie utilisable fournie par le stock. La **température optimale** du stock, elle, dépend de la chimie de l'eau. Idéalement, la température d'injection d'un stock sans PAC devrait être portée à 60 – 80°C ou plus. Cependant dès environ 60°C les réactions chimiques deviennent importantes : colmatage des drains en raison de la précipitation de carbonates, décomposition de matière organique, développement des bactéries thermophiles etc. Il devient alors indispensable de maîtriser ces problèmes. Il est possible de prévoir le comportement de l'aquifère dans une certaine mesure et d'envisager des solutions, par exemple injection de sels, extraction de CO₂, injection d'acide, détartrage magnétique ou par microbille des échangeurs.

Si les conditions minimales ne sont pas réunies, on peut recourir à l'utilisation d'une pompe à chaleur : si un volume minimum ne peut pas être assuré, ou qu'une température trop élevée dans l'aquifère crée trop de problèmes de colmatage, le stockage peut être fait à plus basse température. Toutefois le dimensionnement est alors différent.

Les paramètres géologiques comprennent l'épaisseur de l'aquifère, sa conductivité hydraulique, qui contrôle des cellules de convection, l'écoulement naturel de la nappe et la dispersion thermique, ainsi que l'épaisseur de la couche recouvrant l'aquifère (Dupasquier, 2000).

INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE L'AQUIFERE

Les différents paramètres de l'aquifère influenceront plus ou moins le stockage : Les influences ci-dessous ont été définies par Courtois et al. (2007) par des simulations à l'aide du logiciel MARTHE.

La **vitesse d'écoulement de la nappe** dépend de différentes caractéristiques de l'aquifère : la perméabilité K et le gradient hydraulique i ($V = K.i$). L'efficacité du stockage diminue avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement. Pour les plus grandes vitesses, le stockage est même impossible, car le stock est entraîné dans l'écoulement de la nappe avant d'avoir pu être utilisé. Cet effet peut cependant être réduit lors de l'exploitation en doublet, qui permet de ralentir l'écoulement de l'eau.

La **perméabilité** peut être à la fois favorable et défavorable au stockage : en effet une haute perméabilité favorise l'écoulement de la nappe et est donc plutôt défavorable au stockage. En revanche, la perméabilité joue également un rôle dans les rabattements en pompage dans les puits : les charges hydrauliques sont plus perturbées lorsque la perméabilité est faible. La perméabilité va donc limiter les débits qu'il est possible de pomper, et il peut être indispensable de prévoir plusieurs doublets de forages, ce qui entraînerait des surcoûts (chapitre 7.10.2).

La **porosité efficace** influencera la vitesse réelle d'écoulement de l'aquifère, mais également la conductivité thermique et la capacité calorifique de celui-ci. En effet la capacité calorifique augmente avec la porosité, car la capacité calorifique de l'eau est plus élevée que celle du terrain sec. A l'inverse, la conductivité thermique diminue lorsque la quantité d'eau augmente, car la conductivité thermique de l'eau est plus faible que celle du terrain sec (chapitre 4.1). Cependant l'influence de ces variations reste très faible.

Les **dispersivités longitudinale et transversale** interviennent dans le phénomène de dispersion cinématique. L'étalement des panaches thermiques sera d'autant plus important que ces paramètres seront élevés. Il est donc préférable que les dispersivités soient faibles, car cela limite l'étalement et les éventuelles interactions des stocks si un stock chaud et un stock froid existent simultanément.

L'**épaisseur de l'aquifère** influence le rayon du stockage : en effet à volume égal un stock aura un rayon moindre dans un aquifère plus épais. Selon les simulations, une épaisseur plus faible est favorable au stockage, car un plus grand rayon thermique fait augmenter l'inertie thermique et diminuer les échanges par conduction entre les stocks d'eau et l'aquifère environnant. Cet effet est opposé (en lui étant supérieur) à l'augmentation des échanges avec l'air extérieur. Bien que dans ce cas un aquifère de faible épaisseur semble préférable, il faut noter que celle-ci conditionne également le débit d'exploitation, en limitant les rabattements possibles en pompage.

L'**épaisseur de la couverture** conditionne l'isolation de l'aquifère, donc les échanges entre l'air extérieur et l'aquifère. Le stockage est donc plus efficace avec une couverture plus épaisse. Cette amélioration est plus marquée lorsque l'épaisseur de l'aquifère est faible.

La **distance entre les forages** est également importante : en effet si deux stocks à différentes températures existent il est important que leur influence mutuelle soit réduite au minimum. Dans ce cas la distance doit être augmentée au maximum.

De tous ces facteurs, la **vitesse naturelle d'écoulement de l'aquifère** est celui qui va le plus conditionner l'efficacité du stockage thermique.

8.2.4 Logiciels de dimensionnement

Dans le cas de stockage avec échangeurs verticaux, la phase de prédimensionnement peut se faire à l'aide du logiciel **PILESIM2**, qui permet de modéliser un stockage avec des sondes ou des pieux énergétiques. Le logiciel **EED** peut également être utilisé dans une phase de prédimensionnement. Le logiciel **TRNVDST** permet de simuler les performances du système. Parmi les logiciels permettant de simuler le refroidissement ou le réchauffement de terrain provoqué par un stock, **Z-Soil** et **Plaxis** peuvent être utilisés. Ces logiciels modélisent la mécanique des roches et des sols dans un cadre géotechnique qui peut inclure une analyse thermique. Le logiciel **FEFLOW** peut également modéliser les flux de chaleur, par analogie aux écoulements hydrauliques.

Pour le stockage en aquifère, le logiciel **FEFLOW** permet de modéliser le comportement, incluant la température, d'un aquifère. Le logiciel **GED** (Groundwater energy designer) peut permettre de mesurer l'étalement du panache thermique (chapitre 7.8.2), alors que **MARTHE** (Modélisation d'Aquifère avec maillage Rectangulaire, Transport et Hydrodynamique), développé par le BRGM, permet une simulation de l'ensemble de l'aquifère.

8.3 Risques et contraintes légales associées

Dans le cas d'un stock diffusif à échangeurs verticaux, les risques et contraintes sont les mêmes que pour des sondes ou champs de sondes normaux (voir 3.7, 5.7). Les zones d'interdiction des sondes sont également en vigueur. Du fait du faible espacement des sondes, les risques de gel du terrain ou de variations trop grandes de la température du terrain doivent être surveillés avec soin, ceci également en raison de la grande quantité d'énergie qui peut être stockée.

Dans le cas d'un stock en aquifère, les contraintes sont les mêmes que celles d'une installation sur aquifère (voir 7.7). Les paramètres importants sont les changements de température et de chimie qui peuvent se produire. En effet la température des nappes phréatiques ne doit pas être modifiée de plus de 3°C à plus de 100 m d'une installation (OEaux, Annexe 2, chapitre 21), ce qui implique que le stock doit être contrôlé de manière précise. De plus, la chimie des eaux (pH, contenu en oxygène) ne doit pas être modifiée, ce qui peut être le cas lors d'un réchauffement ou d'un refroidissement important du stock.

8.4 Exemples de réalisation

8.4.1 Stock avec sondes verticales

L'étude et la réalisation concrète de stocks en terre commence dès la fin des années 1970 (stockage expérimental à Marly, FR, en 1979) et depuis, un bon nombre de projets ont été menés à bien. Nous présentons ici le plus important.

Le **centre D4 sur la commune de Root** près de Lucerne est à la fois chauffé et rafraîchi par un stock souterrain de chaleur. Ce centre d'entreprise et d'innovation de la SUVA utilise le plus grand stock de chaleur de Suisse. Sa construction a débuté en 2001 et une première phase s'est achevée en 2003 avec deux bâtiments offrant une superficie nette de locaux de 20'000 m². Les conditions de départ exigeaient qu'au moins 50% des besoins de chauffage et de climatisation soient couverts par des énergies renouvelables.

Deux tests de réponse géothermique ont été réalisés avant la construction du centre, afin de déterminer la conductivité thermique du terrain ainsi que sa température initiale. Le dimensionnement a été fait au moyen du logiciel **PILESIM**, et une simulation dynamique au moyen du programme **TRNSYS**, afin de tester la faisabilité du concept.

Le concept comprend un stock de chaleur souterrain, une centrale chaleur-force, une chaudière fuel/gaz, des cuves de stockage de chaleur et de froid, ainsi que des collecteurs solaires et des panneaux photovoltaïques sur les toits (Figure 8-7). L'ensemble de ces sources d'énergie et de la technologie du stockage permet de couvrir 65% des besoins en énergie par des énergies renouvelables.

Le stock de chaleur à proprement parler est constitué par 49 sondes géothermiques de 160 m de profondeur chacune pour une superficie de 2343 m², couvrant un volume d'environ 375'000 m³. Pendant l'hiver, la chaleur du terrain est extraite par ces sondes et transmise à un groupe de pompes à chaleur qui élèvent le niveau de température. Un accumulateur de chaleur et une chaufferie d'appoint servent à absorber les pointes de consommation lors des périodes les plus froides. Pendant l'été, l'excédent de chaleur fourni par les panneaux solaires, lorsque les besoins en eaux chaude sanitaire sont couverts, sert à recharger thermiquement le stock de chaleur souterrain. Simultanément, le froid accumulé pendant l'hiver sert à rafraîchir les bâtiments (OFEN, 2004).

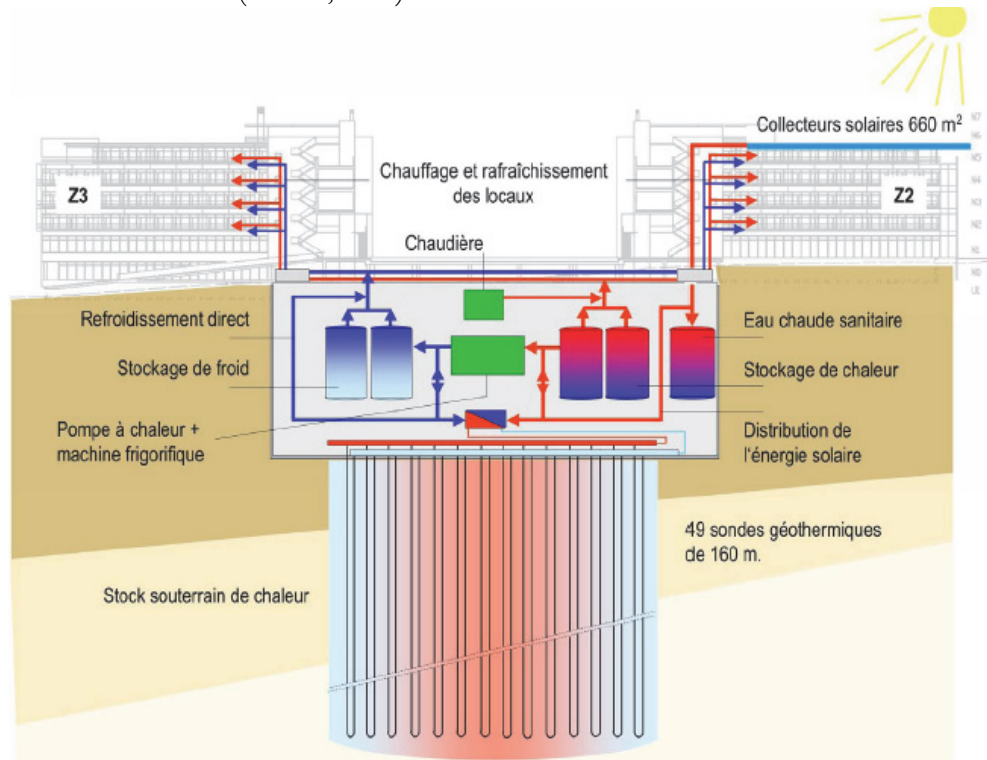


Figure 8-7 : principes de fonctionnement du stock de chaleur souterrain du centre D4 (OFEN, 2004)

Un stock souterrain par sondes géothermiques a également été réalisé en 1988 pour un bâtiment dans la zone industrielle de Meyrin (Matthey, 1988 et 1992). Construit à l'époque pour la société Jean Sieber SA et actuellement occupé par la société Covance SA, ce bâtiment a une surface au sol d'environ 3'200 m² et comprend niveaux + attique sur rez et un niveau de sous-sol sous une moitié du bâtiment.

Aux dernières nouvelles, le système n'est plus en fonction depuis plusieurs années, la raison n'étant pas connue.

Le système de chauffage comprenait 950 m² de collecteurs solaires intégrés à la toiture. L'énergie captée était ensuite stockée dans un accumulateur saisonnier de chaleur dans le terrain (moraine) de 20'000 m³, sous le bâtiment (partie non occupée par le parking). L'injection et le soutirage de la chaleur étaient réalisés par 258 sondes verticales de 15 m, espacées de 2-3 m. L'énergie des panneaux solaires et de l'accumulateur en terre était puisée par une pompe à chaleur de 200 kW.

Le principe de fonctionnement de ce système, dimensionné et simulé par l'EPFL était le suivant :

- Été : production d'eau chaude et charge de l'accumulateur souterrain par les collecteurs solaires. Chaleur estimée du stock souterrain à la fin de l'été : 28 à 32°C.
- Dès l'automne : prélèvement de la chaleur du stock souterrain par la pompe à chaleur, une chaufferie d'appoint assurant la fourniture des pointes.
- A la fin de l'hiver, la température du stock souterrain est d'environ 15°C.

L'énergie annuellement stockée était d'environ 400 MWh.

Ce système était destiné à couvrir environ 30 à 40 % des besoins en chauffage, le reste étant couvert par la chaleur des installations électriques, des gains solaires passifs et une chaudière à gaz-mazout pour les pointes.

8.4.2 Stockage en aquifère

Plusieurs exemples de stockage en aquifère ont été réalisés dans les années 80, à commencer par le projet SPEOS de l'EPFL. Peu de ces systèmes sont encore opérationnels aujourd'hui, pour diverses raisons, allant du blocage de la tuyauterie au taux de récupération trop bas.

Les bâtiments du **groupe Jargonnant à Genève** sont situés sur un important site de stockage en aquifère, avec un volume de stockage d'environ 190'000 m³. Cet immeuble se trouve au-dessus de la nappe du Genevois, et fonctionne avec un ΔT de 4°C entre été et hiver, correspondant à une énergie de 425 MWh. Lors de la construction, la réalisation de sous-sols a obligé les entrepreneurs à abaisser le niveau de la nappe pour la durée du terrassement, et un pompage a été installé en doublet de façon à réinjecter directement l'eau dans la nappe à l'aval. Un radier a ensuite été confectionné et dimensionné de façon à pouvoir contenir la pression de l'eau. Les pompages ont ensuite été commutés de façon à pouvoir être utilisés à la façon d'un doublet géothermique (Dériaz et al., 1991).

Le principe est celui du doublet géothermique avec une pompe à chaleur pour assurer le transfert d'énergie : en été l'énergie excédentaire produite par l'ensoleillement et la charge interne du bâtiment est stockée dans la nappe, et la nappe froide est utilisée afin de refroidir le bâtiment. En hiver la chaleur est retirée de la nappe et transférée au bâtiment. L'eau refroidie est alors réinjectée dans la nappe au « pôle froid ». Deux puits d'une profondeur de 30 m et distants de 60 m ont été conçus pour permettre cette exploitation.

Le bilan saisonnier est équilibré entre l'été et l'hiver pour éviter à long terme une dérive thermique de l'aquifère. Ce point a été vérifié par des mesures de la température de l'aquifère grâce à une série de capteurs prévus à cet effet entre 1988 et 1993. L'excédent de chaleur est évacué en été par une tour de refroidissement. La différence de température entre l'eau pompée et réinjectée est de 5°K au maximum, pour éviter de modifier la chimie des eaux souterraines.

L'inversion du sens de circulation de l'eau dans le doublet à la fin de chaque cycle saisonnier diminue le risque de colmatage des puits (Branzaglia et Hoarau, 1994).

Lors de la canicule de l'été 2003, une baisse du niveau de la nappe du Genevois a eu lieu. A cause de la sécheresse exceptionnelle, la quantité d'eau pompée dans la nappe pour l'alimentation en eau potable a été très supérieure à la normale, abaissant fortement son niveau. De ce fait, les bâtiments n'ont plus pu être rafraîchis comme d'habitude, au grand dam des personnes y travaillant. Ce type d'évènement illustre parfaitement les risques de conflits d'utilisation déjà traités auparavant dans ce rapport. Notons toutefois que, hormis cet incident, le système donne satisfaction.

Le **Reichstag à Berlin** est un concept récent de stockage en aquifère. En effet, deux aquifères séparés sont utilisés pour le stockage de chaleur. Le site compte plusieurs bâtiments, comprenant non seulement le Reichstag qui abrite maintenant la salle plénière du parlement (Deutscher Bundestag) mais aussi les bureaux de la presse et des membres du parlement ainsi que les nouveaux bâtiments pour les bureaux du Chancelier (Bundeskanzleramt).

Tous ces bâtiments sont connectés par un réseau énergétique pour le chauffage, le refroidissement et l'électricité. Les composants sont distribués dans plusieurs bâtiments, comprenant des unités de cogénération (combined heat and power, CHP) opérant au biocarburant, des chaudières, des unités de refroidissement, une pompe à chaleur à absorption et deux stocks souterrains d'énergie thermique dans des aquifères.

Les deux aquifères se situent dans des couches géologiques différentes. Le réservoir de froid est situé dans des sables quaternaires à environ 60 m de profondeur, et deux séries de 5 puits y ont accès. Le second aquifère est situé dans des sédiments du Jurassique inférieur à environ 320 m de profondeur, et sert de lieu de stockage pour les rejets de chaleur du système CHP durant l'été. Seulement deux puits sont utilisés, et les températures injectées et stockées peuvent atteindre 70°C (Figure 8-8).

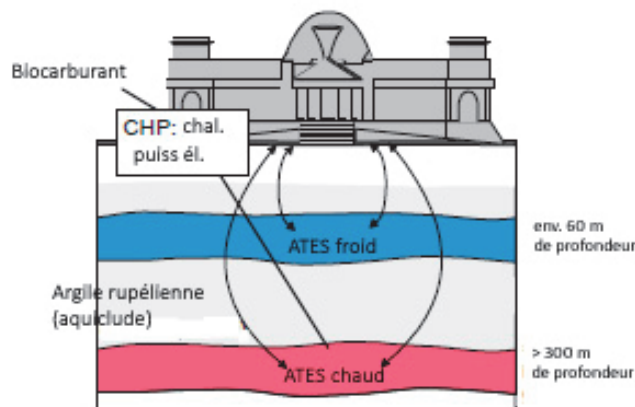


Figure 8-8: représentation schématique des deux niveaux d'aquifère de stockage (ATES) sous le bâtiment du Reichstag (Sanner, 2005).

Le lieu de stockage de la chaleur est surmonté par un niveau étanche d'environ 140 m d'épaisseur, composé d'argiles et de pélites du Sinémurien supérieur (70 m) et d'argiles de l'Oligocène (70 m). Cette couche isolante prévient les pertes de chaleur par convection et sépare efficacement les stocks chauds et froids. Le stock supérieur est également isolé par une lentille argileuse étanche.

A cause de la salinité de l'eau dans les aquifères et de la haute température dans ce circuit, la tuyauterie du stockage de chaleur est faite de résine renforcée de fibre de verre. Les circuits de l'aquifère froid sont constitués de plastique. Dans les deux cas, il est crucial de garder la tuyauterie constamment sous pression et d'éviter toute entrée d'oxygène dans le circuit. C'est le seul moyen d'éviter le colmatage des circuits, qui a déjà eu lieu lors d'une précédente exploitation.

Selon les simulations, le réservoir de froid pourrait avoir un taux de restitution de 93 %, et le réservoir de chaud un taux de 77% de récupération, ce qui est très élevé (Sanner, 2005).

8.4.3 Stockage combiné avec cuve de stockage et sondes

La **villa Aeschbacher à Genève** est un cas assez particulier de stockage. Cette villa construite au début du siècle a été rénovée en 1996-1997 avec l'objectif de diminuer sa consommation énergétique au maximum, et de la rendre indépendante d'un point de vue énergétique.

La consommation a été réduite d'environ 235 W/m² à 21 W/m², ce qui est en-dessous de la norme Minergie, grâce à une très bonne isolation extérieure de l'enveloppe, une protection totale de la façade NE, une toiture refaite et isolée à 14 cm, des vitrages isolants sélectifs et une façade sud fortement vitrée avec ajout d'une véranda.

Le système de chauffage et la production d'eau chaude sanitaire est basé sur des panneaux solaires thermiques sur le toit, qui couvrent 31.3 m². Ces capteurs sont combinés à un accumulateur de chaleur à eau de 11 m³ avec un chauffe-eau intégré de 200 litres, et un stockage en terre consistant en 7 sondes de 7 m inclinées à 45°. Une chaudière d'appoint (gaz à condensation), en série avec le stock, est également prévue. Le chauffage des pièces se fait par des radiateurs à basse température.

En été, la température de la cuve est maintenue inférieure à 60°C (80°C au printemps) par évacuation du surplus de chaleur dans le stockage en terre. La température du stock lui-même ne dépasse pas 55°C à proximité des sondes, et chute rapidement à 30°C quand on arrête la charge. Les sondes engendrent un

flux de chaleur positif vers la cave du bâtiment, et contribuent donc passivement au chauffage de celui-ci. Ce chauffage passif n'est cependant pas entièrement suffisant pour annuler les pertes globales vers le sous-sol.

Un suivi a été mené sur 2 ans pour apprécier la couverture en énergie du système (Lachal et al., 2000). La production d'eau chaude sanitaire a été entièrement couverte par les panneaux solaires (il faut mentionner que la consommation des occupants est bien plus basse que la moyenne). Le chauffage du bâtiment a été assuré essentiellement par les panneaux solaires et au bois (cheminée). La chaudière à gaz n'a pas été utilisée sur la période de mesures.

Cette installation montre l'intérêt de relier les capteurs solaires thermiques à un stockage à long terme. Cependant, l'utilité d'un petit stockage diffusif (sondes) pour des maisons individuelles reste très limitée. Celui-ci sert en effet principalement à évacuer la chaleur excédentaire de la cuve de stockage. Plusieurs autres projets ont été réalisés en Suisse Romande (EPFL-SPEOS, Cortaillod).

8.5 Evaluation du potentiel de mise en place de stockage saisonnier sur le canton de Genève

8.5.1 Potentiel du stockage diffusif avec sondes verticales

Les terrains se prêtant le mieux au stockage par champs de sondes sont les terrains saturés et peu perméables. En effet la capacité calorifique de l'eau est très élevée, et elle constitue donc un bon environnement pour stocker la chaleur. En revanche ceux-ci sont plutôt de mauvais transmetteurs de chaleur, mais donc de bons isolants. Dans le cas du canton, les terrains ayant les plus grandes capacités calorifiques sont les argiles, principalement présentes dans les terrains prolongeant le lac (Figure 8-9).

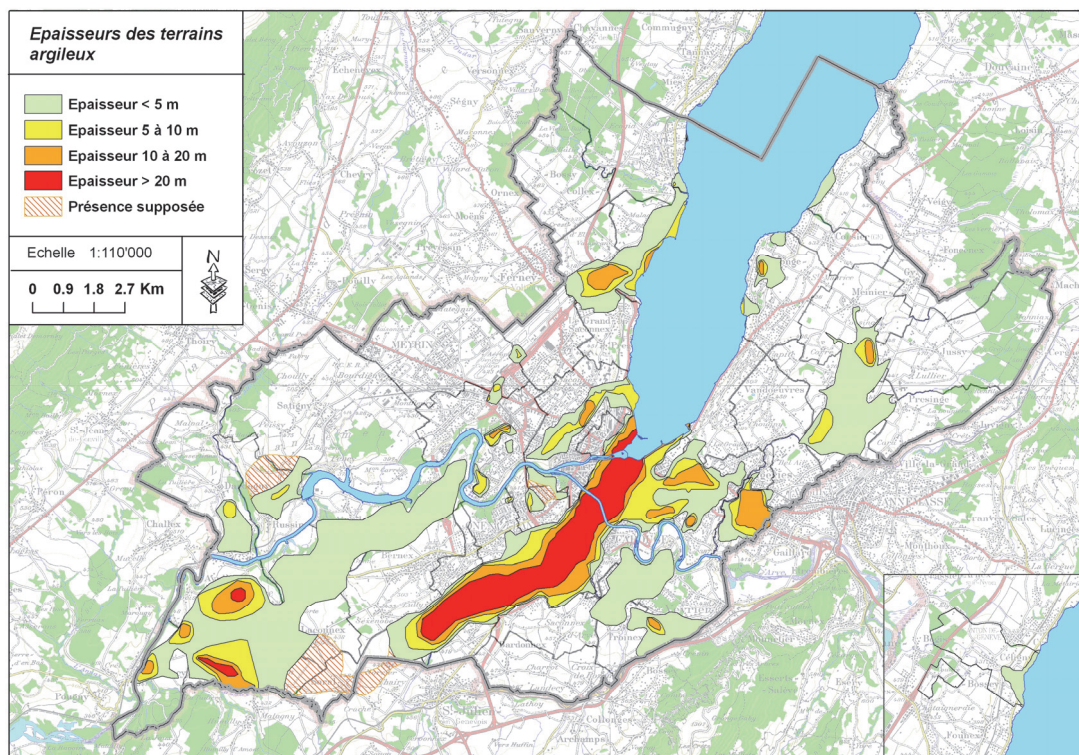


Figure 8-9: épaisseurs des terrains argileux et argilo-limoneux sur le canton.

Cependant, des champs de sondes peuvent être réalisés dans la plupart des terrains genevois. Il s'agit simplement de tenir compte de la nature du terrain lors du dimensionnement de telles installations.

L'implantation d'un stockage diffusif sans PAC sur le canton présuppose la présence d'une source de chaleur suffisante (grande surface de panneaux solaires, rejets industriels) et d'un nombre suffisant d'habitations (ou d'un bâtiment d'assez grande taille) pour rentabiliser un seul projet. Il ne serait en effet pas économique de prévoir ce type de stockage à l'échelle d'une seule habitation, car les stockages de petite taille avec des sondes ne sont pas rentables, ni au niveau de l'efficacité thermique, ni au niveau économique. En combinaison avec une PAC, cependant, le stockage est souhaitable même dans des champs de sondes de petite taille, afin d'assurer la recharge du terrain.

8.5.2 Potentiel du stockage en aquifère

Le stockage en aquifère sera naturellement plus limité dans le canton, car les conditions d'utilisation des aquifères sont plus strictes, et les paramètres d'utilisation plus difficiles à calibrer que dans le cas des champs de sondes. Il s'agit cependant d'une méthode applicable, du moins par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur, comme le démontre l'installation de Jargonnant.

Les propriétés des nappes ont été décrites en détail dans le chapitre précédent. De façon générale, les aquifères les mieux adaptés au stockage seraient d'abord les nappes principales. Elles présentent une grande épaisseur et une bonne perméabilité, ce qui permettrait de créer des stocks conséquents. En revanche, une limite peut apparaître suivant leur vitesse d'écoulement : celle-ci ne devrait pas excéder 5 cm/jour (Courtois et al., 2007). Un système de doublet adapté peut cependant freiner cet écoulement, et peut être envisagé. De plus, deux de ces aquifères (Allondon et Genevois) sont interdits d'exploitation car déjà utilisés pour l'alimentation en eau potable. Le cas de Jargonnant, initié en 1984, est particulier et ne serait plus autorisé avec la législation actuelle, bien qu'elle ne provoque apparemment pas d'impact négatif sur la nappe. Dans les autres nappes, la vitesse d'écoulement devra être soigneusement surveillée afin que le stock ne se disperse pas. Les simulations GED peuvent être d'une grande aide pour prévoir l'évolution du stock sur une période prolongée d'exploitation.

Les nappes superficielles peuvent avoir des vitesses d'écoulement réduites, ce qui favorise l'utilisation des doublets géothermiques. En revanche, leur faible épaisseur augmente la surface du stock par rapport à son volume, et leur faible profondeur implique qu'elles sont mal isolées. Il y a donc de grandes possibilités de pertes par diffusion à la limite du stock, et de pertes par échanges avec l'atmosphère.

8.5.3 Projets de stockage sur le canton

Deux projets de stockage en champ de sondes sont actuellement en cours dans le canton : Florence-Champendal et Plan-les-Ouates.

FLORENCE – CHAMPENDAL

Le premier cas concerne une série d'immeubles dans le quartier de la Florence et de Champendal. Il s'agit d'un important projet de stockage qui inclurait l'installation dans chaque bâtiment de panneaux solaires, d'une chaudière et de stocks tampons pour l'énergie solaire et l'eau chaude sanitaire. Chaque immeuble serait ensuite raccordé en parallèle sur le stock en terre.

Les accumulateurs solaires alimentent en priorité la consommation des immeubles. Le surplus est stocké dans des cuves à eau de chauffage, puis alimente le stock en terre commun.

Le terrain a été soumis à un test de réponse thermique, qui donne les températures initiales du terrain (12°C), ainsi que sa conductivité (1.9 W/mK) et la résistance de la sonde.

Pour évaluer la faisabilité et l'évolution à long terme du système un modèle du stock a été créé. Le stock modélisé comprend 19 sondes de 30 m de profondeur espacées de 3 x 3 mètres, ce qui représente le quart du stock total, qui aurait ainsi un diamètre de 30 m. Les sondes ont un diamètre de 120 mm, pour une résistance thermique moyenne de 0.11 K/(W/m). Dans certaines variantes, une isolation est prévue au

sommet du stock, sous la forme d'un disque de 30 m de diamètre et 50 cm d'épaisseur. Les températures de circulation sont :

- 60°C pendant 6 mois (charge du système)
- 30°C pendant 6 mois (soutirage)

Les simulations montrent qu'un stock isolé peut fournir un rendement qui se stabilise autour de 50%, alors que l'absence d'isolation induit une perte de rendement de l'ordre de 10%. Il faut également remarquer que le rendement augmente avec le diamètre du stock. Pour un diamètre de 60 m au lieu de 30 m, le rendement pourrait se stabiliser autour de 70 ou 75%.

Pour des bâtiments neufs comprenant un système de chauffage à basse température, il a été estimé que la couverture solaire du chauffage est pratiquement totale, supérieure à 99% sur 1178 MWh/an, et que la couverture des besoins en eau chaude peut atteindre 75% de 1268 MWh dès la 5^{ème} année d'exploitation. (BG, 2008). Ce projet en est à un stade avancé des études.

PLAN – LES – OUATES

Ce projet, qui est encore au stade de pré-dimensionnement, consisterait à récupérer, pendant la période chaude, des rejets thermiques d'entreprises et à les stocker dans le sous-sol au moyen d'un champ de sondes. Cette chaleur pourrait ainsi alimenter un futur quartier d'habitation dans le quartier des Cherpines, au moyen d'un réseau de chauffage à distance, avec des températures aller/retour de 60°C/40°C. Ce projet implique donc l'utilisation de PAC.

La géologie du terrain est principalement constituée d'argiles et de limons de retrait, ainsi que de moraine. La formation de l'Alluvion Ancienne est supposée présente à une soixantaine de mètres de profondeur. Le site s'étend donc en partie dans la zone soumise à un examen au cas par cas, et les sondes ne devront pas dépasser la profondeur de l'Alluvion ancienne.

Des simulations avec le logiciel EED montrent qu'un champ de 1000 sondes d'une profondeur de 70 m (a priori trop longues par rapport à la profondeur de la nappe), espacées de 7 m, pourrait fournir 7.3 GWh/an, couvrant environ 41% de la demande en chaud par l'intermédiaire de la PAC, et 5.6 GWh/an, c'est-à-dire 57% de la demande en froid par refroidissement passif. La couverture pourrait être encore augmentée en augmentant le nombre de sondes, ou en acceptant des températures au-dessous de 5°C en hiver, et des températures supérieures à 21°C en été.

Des simulations ont été effectuées sur FEFLOW pour modéliser l'évolution de la température dans le sol. Comme illustré dans la figure suivante, les températures sont minimales à la fin de la période de chauffage, alors qu'elles sont les plus élevées après la période de refroidissement, lors de la recharge complète du stock.

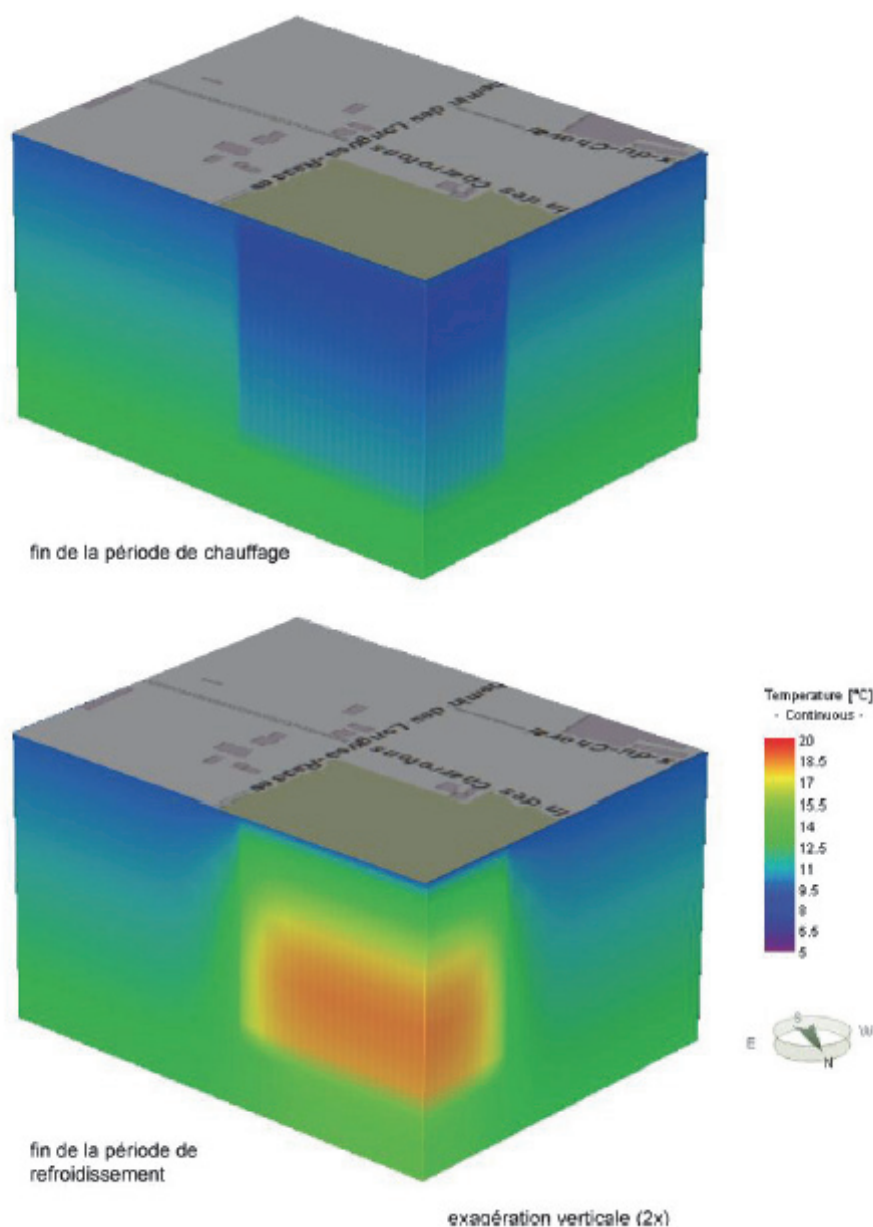


Figure 8-10: Distribution des températures dans le terrain, en fin de période de chauffage (en haut) et en fin de période de refroidissement (en bas) (ScanE, 2010)

Ces simulations permettent également de mesurer l'impact thermique du champ de sonde sur le terrain sur 25 ans d'exploitation. Les résultats montrent un accroissement de la température du terrain de 5K environ après 25 ans. En bordure du champ de sondes, à une profondeur de 20 m, une différence de température de +/- 2K est constatée. Cette différence diminue fortement en s'éloignant du champ de sondes et, à partir de 20 m, plus aucun écart significatif des températures n'est constaté. Les résultats montrent également que la température de surface n'est pas influencée par le champ de sondes, avec une différence de +/- 0.2K au maximum (ScanE, 2010).

8.6 Synthèse et conclusion

Le stockage saisonnier est une composante importante de la géothermie et devrait être pris en considération dans tous les types de champs de sondes et de doublets géothermiques. Le fait de stocker de la chaleur dans le sol permet en effet d'augmenter très significativement la durée de vie d'une exploitation.

Le stockage peut se faire de plusieurs façons, par exemple en enterrant un réservoir ou des conduites horizontales, mais les moyens les plus économiques sont l'utilisation d'un champ de sondes, ou d'un aquifère souterrain comme medium de stockage. Dans ces deux cas, le dimensionnement doit être effectué de manière à récupérer un maximum de l'énergie stockée.

Pour les systèmes de stockage en champ de sondes comme ceux en aquifère, il convient de bien distinguer les systèmes avec ou sans pompe à chaleur. En effet, l'utilisation de la PAC permet un stockage à basse température, et permet d'augmenter considérablement la rapidité d'extraction de chaleur, et donc la puissance instantanée disponible dans un stock. La plupart des systèmes avec PAC, quels que soient leur taille, peuvent (et souvent doivent) contenir une composante de stockage. Bien entendu, l'inconvénient est représenté par les besoins électriques des PAC.

Pour leur part, les stocks sans PAC demandent un dimensionnement très poussé, et doivent pour la plupart prévoir un apport de chaleur complémentaire ou de secours, ainsi qu'un ou plusieurs stocks tampons. De plus, ils doivent être d'une taille assez importante pour pouvoir stocker de la chaleur à des températures moyennes à élevées, sans subir de pertes trop importantes. Il s'agit donc de systèmes complexes, qui s'appliquent à des bâtiments de grande taille ou à plusieurs blocs d'habitations, voire à un quartier entier. En revanche, ils ne nécessitent pas d'apport électrique pour des PAC.

Plusieurs exemples de stocks souterrains sur sondes verticales existent déjà en Suisse, et au moins deux projets récents considèrent un stockage saisonnier (quartier de Florence-Champendal et nouveau quartier des Cherpines à Plan-les-Ouates).

8.7 Bibliographie

BG Ingénieurs Conseils, 2008. *Quartier solaire Florence-Champendal, Avant-projet sommaire, rapport technique*, 73 pp.

Branzaglia P., Hoarau J.-H., 1994. *Jargonnant, stockage de chaleur dans la nappe phréatique*, News Rigot + Rieben, 7 pp.

Chuard P., Chuard D., Mercier C., Hadorn J.-C., 1982. *Stock de chaleur en terre pour les systèmes solaires - Résultats expérimentaux*, Ingénieurs et architectes suisses N° 15-16, pp 210-214, 29 juillet 1982

Courtois N., Marchal J.-P., Menjoz A., Monnot P., Noël Y., Petit V., Thiéry D., Grisey A. (Ctifl), Grasselly D. (Ctifl), 2007. *Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères en France : étude de préféabilité*, rapport BRGM/RP-55481-FR, 243 pp.

Dériaz P., Duchene J.-Y., Perreten R., Rieben S., Anderegg J., 1991, *Jargonnant, stockage de chaleur dans la nappe phréatique*, 13 pp.

Dupasquier S., 2000. *Contribution à l'étude du comportement thermo-hydraulique du stockage de chaleur en aquifère*, thèse de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 169 pp.

Groupe de travail PGN, 2008. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)*, CREGE 11-88/02, Neuchâtel

Lachal B., Soutter C., Pampaloni E., 2000. *RENOVA : Installation solaire active avec injection de chaleur en sous-sol, Rapport final*, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, sous mandat de l'OFEN, 5 pp.

Matthey B., 1981. *Le stockage souterrain de l'énergie solaire*. Energie solaire 2/80pp 23-26.

Matthey B., Pillonel B., 1984. *Installation solaire du Mont de Pitié à Cortaillod (NE)*. Sonnenenergie

Matthey B., 1988. *Accumulateur saisonnier de chaleur solaire de 20'000 m³ par sondes verticales sous un bâtiment industriel à Meyrin – Genève*.

Matthey B., 1992. *Le stockage de chaleur par sondes verticales*. Société suisse pour la géothermie – 3^{ème} journée technique d'information – Zurich – 25 septembre 1992.

Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2004. *La géothermie, une technologie efficace, le centre D4 à Root chauffé et refroidi par un stock souterrain saisonnier de chaleur*, 4 pp

Pahud D., 2001. *Etude pilote pour les bâtiments du Centre D4 de la Suva à Root, Lucerne, Analyse de 2 tests de réponse géothermique et intégration du stockage diffusif dans le système* rapport commandité par l'Office fédéral de l'énergie, 69 pp.

Pahud D., 2005. *Energie géothermique – systèmes à basse enthalpie*, cours de la Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, 151 pp.

Sanner B., Kabus F., Seibt P., Bartels J., 2005. *Underground Thermal Energy Storage for the German Parliament in Berlin, System Concept and Operational Experiences*, Proceedings of World Geothermal Congress, 8 pp.

Service Cantonal de l'Energie du Canton de Genève (ScanE), 2010, *Projet de stockage géothermique saisonnier, Plan-les-Ouates (GE), Etude de préfaisabilité et dimensionnement d'un champ de sondes géothermiques*, Rapport final 1882/05, 35 pp.

SIA D 028, 1988. *Guide du stockage saisonnier de chaleur*, 230 pp.

SPEOS, rapport final, 1989. EPFL- Institut d'hydraulique et d'énergie - 4 octobre 1989

Sites internet

Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTR) : <http://www.valpac.fr/wacom.aspx>

9. Ressources géothermiques profondes

9.1 Introduction

Dans le canton de Genève, aucune manifestation thermique de surface ($> 25\text{ °C}$) n'est recensée comme témoin de circulations profondes. Seul le forage d'exploration géothermique de Thônex réalisé en 1993 a permis une première investigation du sous-sol profond. L'exploitation des ressources géothermiques profondes s'effectue au moyen de doublets dans les aquifères profonds (APR) ou de la technologie des systèmes géothermiques stimulés (Enhanced Geothermal Systems, EGS). Déterminer le potentiel de ces ressources géothermiques est un enjeu de taille car elles sont les seules parmi les énergies décarbonées, avec les rejets thermiques (déchets, incinération des ordures, etc.) et la biomasse, à pouvoir alimenter un chauffage à distance de grande extension, voire même, si les niveaux de température sont favorables, coproduire électricité et chaleur.

Les deux premières parties de ce chapitre sont consacrées d'une part à la technologie d'exploitation des aquifères profonds et leur utilisation en Suisse et dans les pays voisins, et d'autre part à l'état de la technologie des systèmes géothermiques stimulés (EGS) et de leur développement.

La troisième partie concerne l'établissement du potentiel géothermique des aquifères profonds dans le canton. Il a été réalisé selon les étapes suivantes :

- Détermination des caractéristiques hydrogéologiques des formations géologiques potentiellement aquifères en profondeur.
- Détermination des structures profondes, à l'aide des informations géologiques et géophysiques (sismique), présentées sous forme de cartes régionales et de cinq coupes géologiques.
- Calcul du potentiel géothermique des formations et identification des structures favorables au moyen des informations réunies précédemment et du gradient géothermique connu dans le Bassin genevois.

9.2 Exploitation des aquifères profonds

9.2.1 Concept technique général

Définitions

Le nom aquifère vient du latin « aqua » : l'eau et « ferre » : porter, il s'agit donc d'une roche qui contient de l'eau pouvant être mobilisée. Dans cette étude, la limite à partir de laquelle le terme aquifère profond est utilisé a été fixé à 400 m de profondeur et au-delà de 4'500 m de profondeur les formations aquifères n'ont pas été évaluées. L'eau présente dans ces formations géologiques est plus ou moins chaude et minéralisée en fonction de la durée de son parcours, des roches traversées et de la profondeur qu'elle a atteinte.

Les plus anciennes exploitations de ces ressources sont représentées par le thermalisme qui utilise des remontées exceptionnelles en surface de ces fluides chauds. Etant donné qu'il n'existe pas de telles manifestations dans le canton de Genève, il faut effectuer des forages avant de pouvoir investiguer directement les fluides profonds.

L'exploitation thermique des aquifères profonds consiste à capter des fluides géothermiques, à les amener à la surface, à en extraire la chaleur à des fins de chauffage ou de production électrique, puis à les réinjecter en profondeur.

Modes d'exploitation

Dans la plupart des cas, les fluides contenus dans les aquifères profonds sont moyennement à fortement minéralisés et contiennent certains gaz en quantité plus ou moins abondante, ce qui les rend impropres à la consommation usuelle et n'autorise pas à les rejeter après refroidissement dans une rivière, un lac, ou dans une nappe phréatique de faible profondeur. Après l'usage thermique de ces fluides profonds, il est par conséquent nécessaire de les refouler dans le même aquifère au moyen d'un second forage (puits d'injection) et ainsi éviter tout impact sur l'environnement. L'autre avantage notoire de ce mode d'exploitation est de conserver la totalité du fluide dans l'aquifère et de n'extraire que la chaleur, ce qui permet de maintenir la pression hydraulique dans le forage de production et de ne pas augmenter les coûts de pompage au cours du temps.

Dans le cas rare où les eaux souterraines profondes ne sont que faiblement minéralisées et non sulfurées, il est envisageable, après le refroidissement, d'obtenir l'autorisation d'évacuer l'eau dans le réseau hydrographique de surface (OFEN, 1998). Seul un puits de production (singlet) suffira alors.

Dans la plupart des installations, le fluide géothermique est produit par une pompe électrique immergée placée dans la partie supérieure du forage (50-200 m). Dans quelques rares cas où la pression artésienne de l'aquifère est suffisamment élevée, le forage est mis en production sans pompe.

Le mode d'exploitation à deux puits est appelé un doublet géothermique (Figure 9-1). Un forage de production apporte l'eau chaude à la surface au moyen de la pompe immergée vers un échangeur de chaleur situé à proximité de la tête de puits. Celui-ci permet immédiatement de transmettre l'énergie géothermique à un circuit secondaire, ce qui évite les problèmes de corrosion et de dépôt dans les conduites du réseau de chauffage par l'eau géothermale.

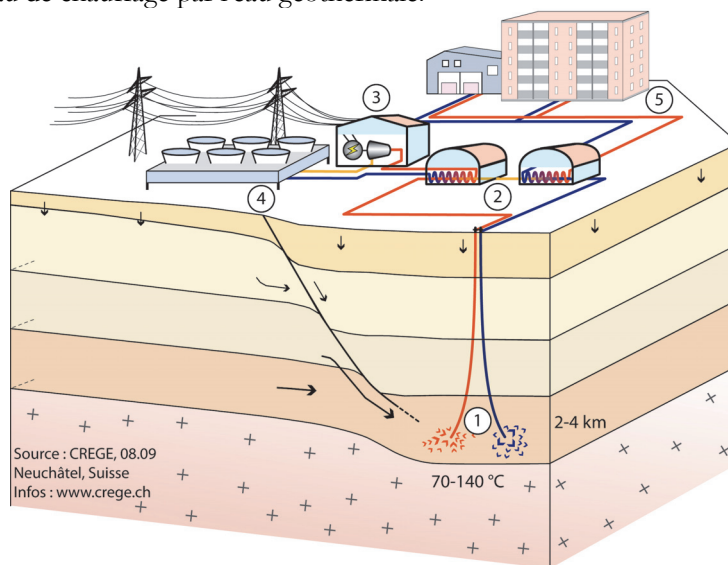


Figure 9-1. Schéma d'un système d'exploitation d'un aquifère profond (Graphique : CREGE, 2009). 1. Forages de production et de réinjection. 2. Echangeurs de chaleur. 3. Centrale électrique : turbine et générateur (si la température le permet). 4. Système de refroidissement à air. 5. Réseau de chauffage à distance.

Afin d'éviter un court-circuit provoqué par une circulation trop rapide dans l'aquifère entre le forage d'injection et le forage de production et par conséquent l'arrivée du front froid après quelques années seulement, la base des puits doit se situer à une distance suffisante – généralement entre 300 et > 1'000 m, selon la profondeur, la perméabilité et le débit de production. Depuis les premières réalisations géothermiques, la typologie des doublets a évolué. Si, dans les années 1970, on utilisait généralement des puits verticaux espacés en surface, depuis les années 1980, on réalise les deux forages à partir d'une plateforme commune à quelques mètres l'un de l'autre et l'on atteint l'espacement voulu en profondeur grâce à une déviation d'un ou des deux forages. Néanmoins, dans le cas de l'installation de Riehen (BS), les deux forages ont été forés en 1988-89 verticalement et à environ 1 km de distance, car il s'agissait de la première installation du genre en Suisse et du premier forage géothermique profond de la région bâloise.

En cas de température insuffisante pour un usage direct dans un CAD (chauffage à distance), une pompe à chaleur (PAC) peut être utilisée afin de rehausser le niveau de température et d'augmenter la production de chaleur. Une autre option consiste à construire une centrale hybride (bivalente) avec une autre source d'énergie (bois, déchets, etc.). Dans ce cas, la chaleur géothermique sert à préchauffer le retour du fluide du CAD. Les niveaux de températures nécessaires à l'exploitation d'un système de chauffage varient sensiblement selon le type de bâtiments et la valorisation de la chaleur géothermique d'un aquifère doit tenir compte de ce paramètre dès les premières investigations (Figure 9-2).

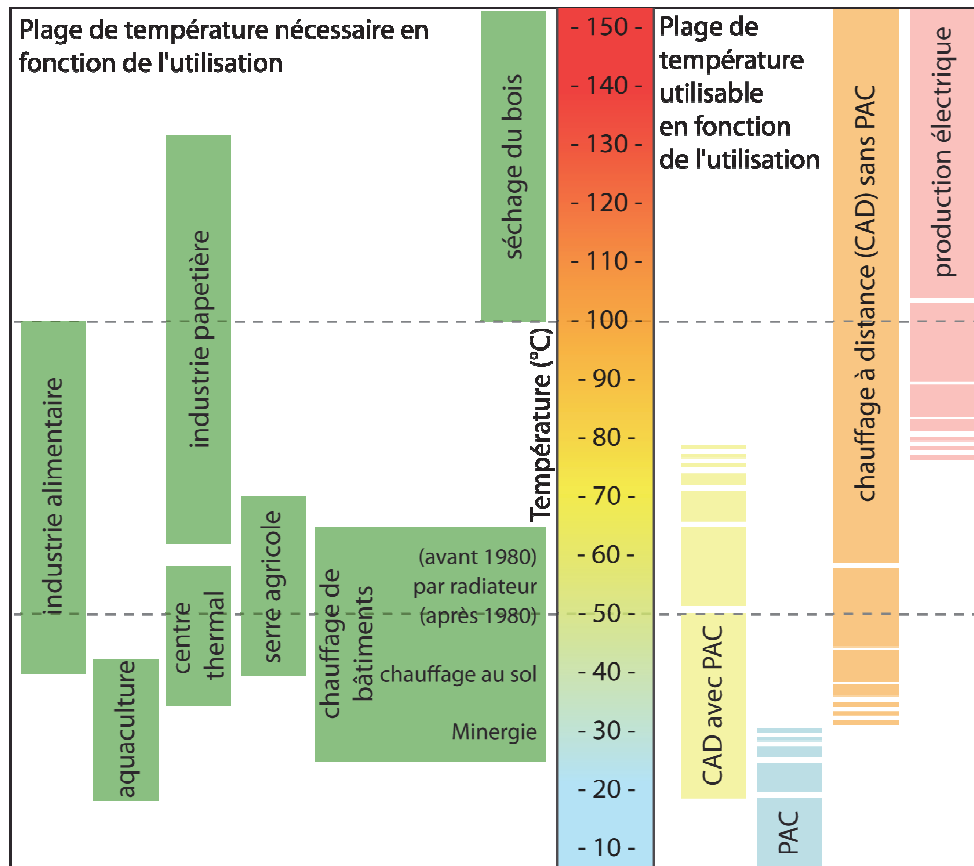


Figure 9-2. Diagramme des différentes utilisations possibles de la chaleur des aquifères profonds (Graphique : CREGE, 2009).

9.2.2 Phases de réalisation

Afin d'assurer le maximum de chances de succès à un projet de géothermie profonde, sa réalisation doit passer par un certain nombre de phases lors de l'évaluation, de la prospection et de la réalisation proprement dite :

- Concept
- Phase A : Préfaisabilité
- Phase B : Faisabilité
- Phase C : Avant-projet
- Phase D : Réalisation des forages
- Phase E : Construction de l'installation et mise en service

La première phase dite de concept peut être exécutée simultanément sur plusieurs zones d'intérêt potentiel, aboutissant à la sélection d'un ou plusieurs sites prioritaires. Les phases suivantes sont spécifiques à chaque site et sont généralement menées séparément.

Concept

- Evaluation des données existantes du sous-sol, des consommateurs et du potentiel géothermique.
- Proposition pour l'étude de pré faisabilité (Phase A).

Phase A : Pré faisabilité

- Vérification des hypothèses géologiques avancées à ce jour pour obtenir une image de la géologie profonde aussi précise que possible, sur la base des documents géologiques disponibles (cartes, coupes, profils lithostratigraphiques, etc.), ainsi que de l'interprétation des lignes sismiques existantes.
- Déterminer la profondeur des cibles géothermiques sur les sites sélectionnés comme favorables par l'étude de valorisation de la chaleur (sites de forage à proximité des principaux utilisateurs de chaleur).
- Estimer le débit exploitable grâce aux informations hydrogéologiques disponibles et calculer le domaine de température des eaux sur la base du gradient géothermique.
- Au moyen des informations géologiques les plus réalistes, du débit exploitable et des coûts des forages profonds, déterminer le potentiel de valorisation économique de l'énergie en estimant le nombre et la densité des consommateurs potentiels.
- Proposition et recommandation pour l'étude de faisabilité (Phase B).

Phase B : Faisabilité

- Etude technico-économique : montage financier, business plan, étude de la valorisation de la chaleur, planification et estimation des coûts des forages, recherche de financement pour la phase C sur le(s) site(s) sélectionné(s).
- Campagnes de prospection géophysiques (si nécessaire), étude d'impact, information publique.
- Evaluation du potentiel géothermique local et sélection d'un site de forage.
- Proposition pour l'avant-projet (Phase C).

Phase C : Avant-projet

- Appel d'offres pour la réalisation du premier forage, pour la préparation du chantier de forage et options pour le deuxième forage.
- Demandes d'autorisation pour les travaux.
- Finalisation du montage financier et du business plan.
- Etude détaillée du réseau de chauffage à distance (si nécessaire).
- Campagne d'information.

Phase D : Réalisation des forages

- Forage du 1er puits, et du deuxième puits en cas de succès. Chaque forage étant achevé par des mesures, des tests et l'équipement du puits.
- Remise en état du site de forage.
- Information publique.

Phase E : Construction de l'installation et mise en service

- Construction de la centrale et connexion au réseau de chauffage.
- Connexion des forages en surface (échangeur de chaleur, pompe de réinjection).
- Raccordement au réseau de chauffage.

9.2.3 Techniques, équipements, coûts

Les opérations de forage sont réalisées dans le but d'atteindre un réservoir géothermique et de pouvoir apporter à la surface le fluide caloporteur avec une température et un débit suffisant pour assurer la rentabilité économique du projet. Pendant le processus de foration, l'appareil de forage (rig, foreuse, plateforme de forage) remplit des fonctions diverses. Il doit notamment assurer la rotation de l'outil de forage (trépan, tricône) pour atteindre la zone de production du réservoir géothermique. D'autre part, la circulation de la boue de forage est vitale pour maintenir le forage ouvert et accessible et pour faire remonter les débris de roche (cuttings). Finalement, la puissance de l'appareil de forage doit permettre de retirer en tout temps le train de tiges hors du trou et d'assurer le contrôle du poids sur l'outil de forage pour garantir un taux de pénétration optimum.

Appareils et chantier de forage

Le choix d'un appareil de forage approprié est l'une des plus importantes décisions lors de la planification d'un forage. Le rig doit posséder une marge de sécurité suffisante (puissance) et des spécifications techniques appropriées au type de forage prévu (profondeur, diamètre). Les rigs utilisés pour des forages géothermiques profonds sont similaires à ceux qui sont engagés pour l'exploration pétrolière ou gazière, avec toutefois quelques différences (Figure 9-3). En effet, les débits de production du fluide géothermique doivent être significativement plus élevés que ceux des hydrocarbures et par conséquent les diamètres de puits et de tubage sont généralement plus grands.



Foraco BF830 : 1'500 m



Foraco BF831 : 1'500 m



Ideco H-525 : 2'000 m



Drillmec G-102 : 2'500 m



Ideco 1200 : 3'500 m



Terra Invader TI-350 : 5'000 m

Figure 9-3. Exemples d'appareils de forage capables d'atteindre diverses profondeurs.

A titre d'exemple, les puits réalisés pour des doubles géothermiques dans le Bassin parisien nécessitent des appareils de forage permettant d'atteindre 2'000 m de profondeur avec une certaine marge de sécurité, c'est-à-dire un rig pouvant pénétrer au moins 2'500 m. Une superficie de 4'000 m² est nécessaire à l'installation du chantier sans aucune restriction de place, mais elle peut être réduite de moitié en zone urbaine dense où les parcelles sont limitées en nombre et en surface (Figure 9-4).

Le chantier de forage du projet EGS à Bâle avait une superficie de 12'000 m² mais en 4 parties séparées. Sur la figure 9-5, la surface où se trouve posé le rig atteint 5'000 m².

L'appareil de forage de très grande taille choisi pour réaliser le puits dévié de prospection gazière à Noville (VD) de 4'298 m de longueur forcée était installé sur un chantier d'une superficie de 10'000 m² (Figure 9-5). Dans le Bassin genevois, les formations aquifères potentielles pour la géothermie se situent entre 1.5 et 4.5 km de profondeur, donc la superficie nécessaire pour installer des chantiers de forage pourrait varier de 2'000 à 6'000 m² environ.

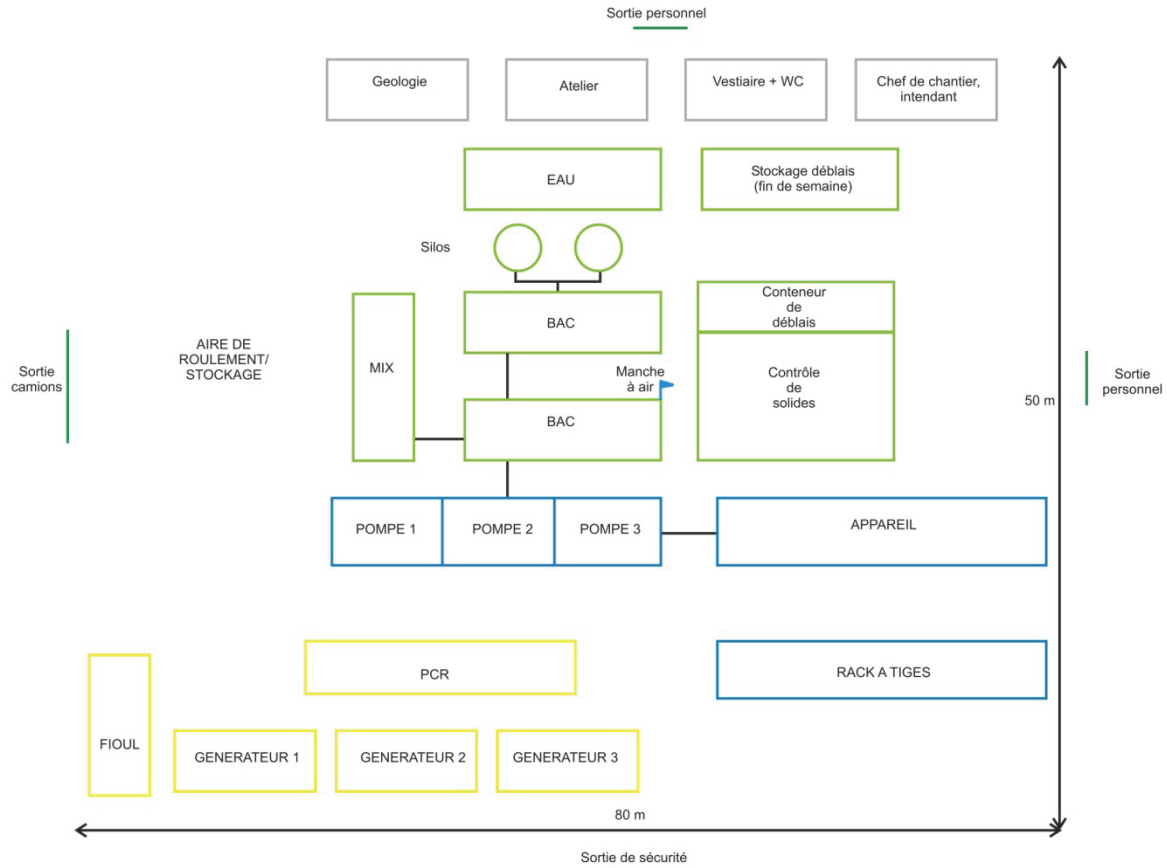


Figure 9-4. Emprise du chantier de forage d'un doublet géothermique pour atteindre un réservoir entre 2'000 et 3'000 m de profondeur (Ungemach & Antics, 2009).



Forage géothermique Basel-1 (profondeur 5000 m) (photo Geopower Basel AG)



Forage d'exploration gazière Noville-1 (longueur forée 4298 m) (photo Daniel Willi SA)

Figure 9-5. Exemples de chantiers de forages très profonds

La durée des opérations de forage est très variable et dépend évidemment de la profondeur finale mais également de la connaissance géologique préalable des terrains à perforer et du nombre de tests à effectuer. Dans une région où de nombreux forages existent, la durée des opérations diminue

sensiblement. Par exemple, un puits géothermique dévié dans l'aquifère du Dogger du Bassin parisien et réalisé avec un appareil de grande dimension prend actuellement 30 à 35 jours pour atteindre une profondeur verticale de 1'800 m (forage, diagraphies, complétion et tests), ce qui représente une vitesse moyenne de forage de 55 m/jour. Cette rapidité est due à l'excellente connaissance acquise durant les 40 ans d'expérience de la géothermie en Ile de France. Au cours du projet européen EGS de Soultz en Alsace, le deuxième forage de 5'000 m de profondeur (GPK-3) a été réalisé en 144 jours seulement, ce qui représente une vitesse moyenne de forage de 35 m/jour. Dans une zone de prospection peu ou pas connue, les durées de forage peuvent augmenter de 50 % en raison des surprises géologiques rencontrées (types de roche, épaisseurs, zones de fractures, etc.).

Lorsque le doublet géothermique est achevé, le chantier est démonté et le terrain est remis en état. Si la centrale de chauffage n'est pas construite sur la même parcelle, les têtes de puits et les conduites aller-retour peuvent être intégralement enterrées. Des plaques métalliques au sol pour accéder aux têtes de puits seront alors les seuls témoins de la présence du doublet.

Mesures et tests des forages

Lorsque le forage profond est terminé ou lors d'une phase de tubage intermédiaire, on procède aux mesures de nombreux paramètres dans le forage au moyen d'outils de diagraphies géophysiques suspendus à un câble (logging). Ces opérations sont très importantes car elles apportent des renseignements détaillés sur les caractéristiques des formations géologiques et des aquifères rencontrés lors de la perforation. Elles ne doivent pas être négligées, car leur coût ne représente que 2 à 5 % du prix total du forage. De plus, les débris de roches (cuttings) sont déterminés visuellement en continu par le géologue de forage et certains échantillons peuvent être analysés de manière plus détaillée en laboratoire.

Afin de pouvoir estimer la productivité ou l'injectivité d'un forage, des tests hydrauliques sont engagés lorsqu'un réservoir potentiel est atteint en cours de forage ou à la fin de celui-ci, dans la partie non tubée du fond du puits. Le test le plus classique est l'essai de pompage par paliers de débits successifs, d'une durée allant de quelques heures à quelques semaines. Sa fonction est d'abord de nettoyer le forage et ensuite de pouvoir calculer le débit et la température de production à long terme lors de la future exploitation. D'autres tests plus complexes peuvent être engagés si nécessaire tels que des essais de production et/ou d'injection entre packers. Finalement, des prélèvements seront analysés pour connaître le chimisme du fluide géothermique et les risques de corrosion et/ou de dépôt de minéraux sur les parois des forages et des conduites de surface.

Dans le cas d'un doublet, l'un des deux forages servira pour l'injection du fluide refroidi et donc un test d'injectivité permet également d'évaluer les performances de ce puits. En effet, malgré leur proximité dans l'aquifère profond (distance horizontale de 300 à >1'000 m), les deux puits n'auront pas exactement les mêmes caractéristiques thermiques, hydrauliques et chimiques.

Équipement des forages

L'équipement des forages (tubage, pompe, tête de puits) dépend de la profondeur du puits, de la température et du débit de production, mais surtout des caractéristiques chimiques du fluide qui sera produit puis réinjecté. Si le fluide n'est pas corrosif, un matériel standard sera utilisé, mais des aciers spéciaux devront être considérés pour les tubages et la tête de puits si la salinité du fluide géothermique est élevée et/ou si les caractéristiques du fluide dans les conduites (après l'échangeur et dans le puits de réinjection) provoquent des phénomènes de corrosion et/ou de dépôt.

Si nécessaire, un traitement chimique peut être installé sur le puits de production. Il consiste en l'injection d'un inhibiteur de corrosion (composé organique de type phosphonate, polyacrylate) au fond du puits pour protéger l'ensemble de la boucle géothermale. La formation d'un film protecteur ralentit la corrosion et empêche la croissance cristalline de minéraux secondaires (Figure 9-6).

Il existe de nombreux inhibiteurs de corrosion et la sélection est faite en fonction du chimisme de l'eau et de la présence plus ou moins abondante de gaz (surtout H₂S et CO₂) et de bactéries. Les inhibiteurs de corrosion ont plusieurs fonctions : anticorrosif, anti-dépôt, dispersant et biocide.

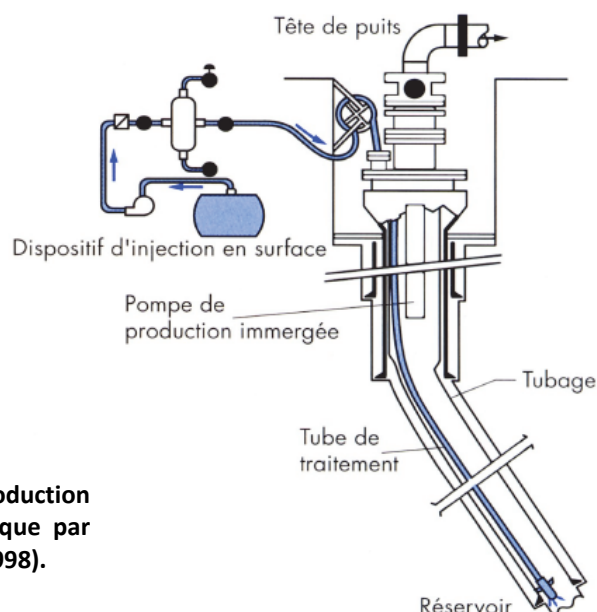


Figure 9-6. Schéma d'une tête de puits de production et de son tubage avec un traitement chimique par injection en fond de puits (Lemale & Jaudin, 1998).

Coût et économie du projet

Les coûts de forage d'un doublet géothermique sont difficiles à quantifier au préalable, sans connaître le site du chantier et de la centrale, la période choisie, le nombre de forages et la profondeur finale. Tous ces critères influencent fortement les prix et seul un appel d'offre préliminaire puis un appel d'offre détaillé permettront de préciser les coûts. Le prix du mètre de forage évolue rapidement en fonction de l'offre et de la demande sur le marché du forage pétrolier, et donc du prix du baril de pétrole ! La disponibilité des appareils de forage permettant une exploration entre 2'000 et 4'000 m de profondeur peut également atteindre un seuil critique et retarder la réalisation d'un projet de plusieurs mois voire davantage. Actuellement, aucune compagnie en Suisse ne possède d'appareil de forage (rig) pouvant atteindre 2'000 m ou plus.

Dans le rapport final de l'étude PDGN (2010), un tableau donnait les coûts de forage pour des ouvrages de 500 à 3'600 m de profondeur. Les prix des forages profonds sont fortement montés depuis le milieu des années 2000 et oscillent depuis ces dernières années, mais les ordres de grandeur peuvent être conservés. Certaines estimations plus ou moins précises, liées à des projets de géothermie profonde en Suisse, sont aussi mentionnées dans le Tableau 9-1.

Tableau 9-1 : Coût estimé en Suisse de forages géothermiques équipés, sur la base de cotations de plusieurs entreprises en 2008 et 2009 pour plusieurs projets dans différents environnements géologiques.

Profondeur du forage (m)	Coût moyen estimé d'un forage (Mio CHF)	Référence
500	1.2 ± 0.1	(1)
1'000	2.5 ± 0.2	
1'500	3.7 ± 0.4	
2'000	6.4 ± 0.6	
2'500	9.2 ± 1.0	
1'000	2.5	Projet AGEPP (2)
2'300	9.0	
3'600	11.0	
Doublet à 2'500 m	13 ± 2.0 (pour 2 forages)	Projet GP LaCôte (3)
Doublet à 3'000 m	17 ± 2.0 (pour 2 forages)	

(1) Commun. écrite de Geothermal Explorers, 2008 ; (2) Dewarrat & Bianchetti, 2009 ; (3) Bianchetti et al. 2009

Le coût total d'un projet géothermique dépend évidemment de l'existence, de la transformation ou de la construction d'un réseau de chauffage à distance. Le cas de l'installation géothermique récente d'Unterhaching dans le Bassin molassique bavarois en Allemagne, avec production de chaleur et d'électricité, permet de comparer les prix des différents composants de l'opération (Tableau 9-2).

Tableau 9-2. Estimation des coûts de l'opération géothermique d'Unterhaching (Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG 2009).

Composants	Coût en Mio CHF * (Mio €)	%
2 forages (producteur = 3'446 m et injecteur = 3'864 m de profondeur), y compris mesures et tests	33 (22)	30.5
Pompes de production et d'injection	4.5 (3)	4
Centrale électrique de type Kalina (3.4 MW _e)	22.5 (15)	21
Conduite de surface entre les 2 forages (3.6 km)	3 (2)	3
Réseau de chauffage à distance en expansion (à fin 2008 : 28 km, 30 MW _t)	45 (30)	41.5
Total à fin 2008	env. 108 (72)	100

* Taux de change appliqué : 1 € = 1.5 CHF

Une étude de faisabilité technico-économique devra être réalisée simultanément au choix d'une zone de prospection, mais avant la sélection du site de forage proprement dit. Cette étude doit permettre de quantifier les consommateurs potentiels de chaleur, la valorisation de la chaleur et le prix de vente prévisionnel du kWh thermique.

Aspects environnementaux

L'impact positif des installations de géothermie en aquifères profonds est principalement attribué à la substitution de CO₂ et d'autres gaz émis par des combustibles fossiles. Généralement, l'exploitation des aquifères profonds passe par un doublet, et par conséquent, l'intégralité du fluide géothermique (eau, gaz, sels dissous) est réinjecté dans la même formation après son usage thermique.

La principale question environnementale est liée au chantier provisoire de forage. Comme tout chantier de construction, il engendre du trafic et du bruit supplémentaires. La différence fondamentale avec la construction d'un bâtiment est liée à la durée journalière du travail. En effet, afin de sécuriser les travaux de forage et de minimiser les coûts, un forage profond est presque toujours réalisé 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Des mesures antibruit sont prises dès la conception du projet de forage, telles que la localisation et l'organisation du chantier, le type de machines et les parois antibruit.

En amont des procédures d'autorisation auxquelles sera soumis le projet lors de sa concrétisation, un examen préalable des principaux impacts environnementaux devra être réalisé pour vérifier la faisabilité et la pertinence du projet du point de vue de la protection de l'environnement.

Selon l'Ordonnance relative à l'étude d'impact sur l'environnement (OEIE), un projet de géothermie profonde est assujéti à la procédure de l'étude d'impact sous le chiffre 21.4 de l'OEIE (installations géothermiques y compris celles qui exploitent la chaleur des nappes phréatiques) d'une puissance de 5 MW_{th}. Si le doublet géothermique délivre une puissance inférieure à 5 MW_{th}, il est soumis à une procédure plus légère (notice d'impact).

Cet examen préalable des principaux impacts environnementaux doit porter sur les différentes phases du projet : phase de mise en œuvre, phase d'exploitation et phase de mise hors service. Pour chacune d'entre elles, l'impact des critères suivants doit être examiné et quantifié : trafic routier, bruit et vibrations, sismicité induite, air, eaux de surface, eaux souterraines, milieu naturel et paysage, sols, sites pollués et gestion des déchets.

Acceptation sociale du projet

Même si les bénéfices environnementaux et économiques d'une opération de géothermie profonde sont a priori reconnus, de manière générale l'acceptation sociale de grands projets énergétiques quels qu'ils soient n'est jamais gagnée d'avance et doit être prise en compte dès le début du projet. Une collaboration avec la population locale doit être instaurée et des réponses honnêtes doivent être données aux questions et aux craintes formulées. Une information complète et répétée doit être fournie régionalement et localement, tant auprès des autorités communales que de la population et des écoles. Des séances et des documents d'information seront planifiés déjà lors des phases préliminaires et pendant la réalisation du forage des visites de chantier seront organisées.

Les meilleures solutions technologiques et organisationnelles doivent être appliquées, afin de garder une image positive du projet en particulier et de la géothermie en général auprès de la population et des futurs consommateurs. En effet, une image dégradée en raison d'erreurs techniques ou d'un manque de transparence sera très difficile à restaurer.

9.2.4 Développement de la géothermie en aquifère profond dans les pays voisins

France

Le développement de la géothermie française a pris son envol lors des deux crises de l'énergie des années 1970, avec une importante activité entre 1978 et 1987. La plus ancienne centrale géothermique est celle de Melun au sud de Paris, qui date de 1969 et fonctionne toujours. Actuellement, quelque 60 centrales géothermiques sont en fonction, dont 31 se trouvent dans le Bassin parisien (Ile-de-France) et 18 dans le Bassin aquitain (sud-ouest) (Boissier et al. 2010, ADEME-BRGM, 2004). Elles sont utilisées essentiellement pour du chauffage urbain de quartiers résidentiels. Dans le Bassin parisien, le fluide géothermal profond de l'aquifère du Dogger entre 1'800 et 2'000 m de profondeur est fortement salé (généralement entre 15 et 30 g·l⁻¹) et ne peut évidemment pas être rejeté en surface après son usage calorifique. C'est pourquoi, toutes les installations géothermiques du Bassin parisien sont basées sur le principe du doublet. En 2008, la puissance totale installée des centrales géothermiques pour l'usage direct était de 345 MW_{th} ce qui permettait de chauffer près de 170'000 équivalents logements.

Plus aucun forage n'a été réalisé de 1987 à 2007, principalement en raison du coût très bas des énergies fossiles et d'une TVA beaucoup plus élevée pour la géothermie que pour les combustibles fossiles. De plus, 19 centrales géothermiques ont été fermées dans le Bassin parisien depuis 1986, pour des raisons économiques et financières, mais aussi pour des problèmes techniques dus à la corrosion des tubages et des conduites par les eaux géothermales. Ces problèmes sont désormais maîtrisés depuis une quinzaine d'années et actuellement, de nouveaux projets sont en cours, notamment dans le Bassin parisien en raison du coût des combustibles fossiles et d'une nouvelle politique énergétique.

Exemple d'un doublet géothermique à Fresnes

La centrale géothermique de Fresnes (Val-de-Marne, Ile-de-France) comporte un doublet de forages déviés d'une profondeur de 1'800 m dans les calcaires du Dogger. A leur base ils sont distants de près de 2'000 m. Commencée en 1985 alors que le pétrole valait 35 dollars US le baril, l'opération de géothermie de Fresnes a été mise en service en 1986, au moment où le baril ne cotait plus que 12 dollars. Seul le sud de la commune est alors desservi, avec 3'600 équivalent-logements. Le doublet de forages offre une température en tête de puits de 73 °C et la centrale comporte deux échangeurs à plaques de titane. En 1999, la ville de Fresnes et la Société Fresnoise de Chaleur raccordent de nouveaux ensembles immobiliers qui portent le réseau à 4'500 équivalent-logements. Une centrale de cogénération est également mise en service en 1998 avec une desserte du nord de la ville. Le nombre d'équivalent-logements desservis aujourd'hui à Fresnes atteint 5'350.

Allemagne

Quelques 162 centrales géothermiques utilisent des fluides chauds provenant d'aquifères profonds, situés dans les bassins sédimentaires de la Bavière et du nord de l'Allemagne, ainsi que du Fossé rhénan. Il s'agit principalement de centrales de chauffage à distance, souvent combinées avec des centres thermaux et des serres agricoles. Les températures des eaux exploitées varient entre 25 et 160 °C, les débits de 1 à 150 l·s⁻¹.

A fin 2009, la puissance totale installée était de 255 MW_{th} (Schellschmidt et al, 2010). Au contraire de la France, on a observé ces dernières années en Allemagne une forte progression de la géothermie en aquifères profonds, avec de nombreux projets. La nouvelle centrale transfrontalière avec l'Autriche de Simbach-Braunau permet de fournir depuis 2001 une puissance installée de 40 MW_{th}, dont 7 MW_{th} par la géothermie, avec une eau très peu minéralisée (1.1 g·l⁻¹), captée dans les calcaires du Malm par un forage dévié long de 3'203 m (Goldbrunner, 2001).

La récente loi sur l'énergie en vigueur depuis 2004 favorise les énergies renouvelables et la géothermie notamment par le rachat à prix coûtant de l'électricité produite par des centrales éoliennes, photovoltaïques ou géothermiques. De nombreux projets en aquifères profonds à des températures atteignant ou dépassant 100 °C ont vu le jour, dans le but de générer une petite production d'électricité au moyen d'une centrale à fluide binaire (cycle organique de Rankine ou de Kalina), simultanément à l'usage thermique direct de la ressource. Actuellement, quatre centrales géothermiques à fluide binaire, avec une production conjointe de chaleur et d'électricité, sont en activité. : Landau (3.0 MW_e) et Bruchsal (0.5 MW_e) dans le Fossé rhénan, Unterhaching (3.5 MW_e) dans le Bassin molassique bavarois (Figure 9-7) et Neustadt-Glewe (0.23 MW_e) dans le Bassin du Nord. Finalement, des demandes de permis de prospection des ressources géothermiques profondes ont été déposées pour 150 sites en Allemagne.

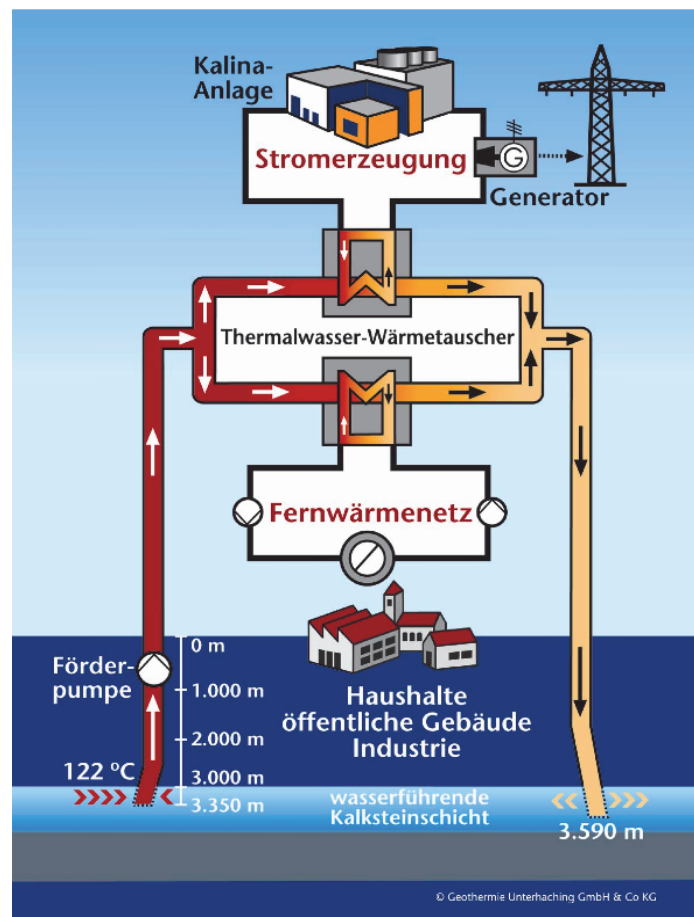


Figure 9-7. Schéma de la centrale géothermique d'Unterhaching, Allemagne (Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG 2009)

Autriche

Malgré une longue tradition d'utilisation des ressources géothermiques pour le thermalisme et les bains, les aspects énergétiques de la géothermie n'ont été développés que récemment, notamment depuis l'entrée de l'Autriche dans l'Union européenne. Des ressources géothermiques existent dans la plupart des provinces autrichiennes, mais elles ne sont exploitées que dans deux régions : le Bassin Styrien et le Bassin molassique de Haute-Autriche. Les températures des eaux exploitées varient entre 33 et 95 °C, avec des débits jusqu'à 81 l·s⁻¹. Au total, une douzaine d'exploitations géothermiques sont en fonction pour le

chauffage d'hôtels, de centres thermaux ou pour des habitations au moyen de réseaux de distribution de chaleur. A fin 2009, la puissance totale installée était de 77 MW_{th} pour les installations en aquifères profonds (Goldbrunner, 2010). Trois petites centrales de production électrique à Altheim (1.0 MW_e), Bad Blumau (0.2 MW_e) et Braunau-Simbach (0.22 MW_e) fonctionnent au moyen de turbines ORC (cycle organique de Rankine) avec des fluides géothermiques à 105 - 110 °C.

Italie

Malgré l'existence de très nombreuses sources chaudes et un thermalisme traditionnel important ainsi que le caractère pionnier de la géothermie haute température pour la production d'électricité, la géothermie en aquifère profond de moyenne température ne s'est pas développée, malgré la présence d'un potentiel vraisemblablement important dans plusieurs bassins sédimentaires. Quelques systèmes de chauffage existent pour des villages proches des centrales géothermiques électriques, pour des groupes de serres agricoles et des installations de pisciculture. Les centrales géothermiques exploitant des aquifères profonds ne sont qu'une dizaine et l'on ne recense qu'une seule installation avec un grand réseau de chauffage à distance à Ferrare d'une puissance de 14 MW_{th}. A fin 2009, la puissance totale des installations géothermiques basée sur les aquifères profonds en Italie, peut être estimée selon les sources entre 636 et 765 MW_{th} (Lund et al., 2010 ; Buonasorte et al, 2010). Ce chiffre inclut l'utilisation thermique des résidus de chaleur des centrales géothermiques de haute température en Toscane pour des serres agricoles et de l'aquaculture.

9.2.5 Développement de la géothermie en aquifère profond en Suisse

Jusqu'en 1974, le développement de la géothermie par aquifères profonds en Suisse était quasiment inexistant (Vuataz & Fehr, 2000). L'utilisation des eaux chaudes provenant des profondeurs était confinée au remplissage des piscines de stations thermales. La première réalisation géothermique pour le chauffage de bâtiments en complément avec l'exploitation d'un établissement thermal a vu le jour à Lavey-les-Bains, grâce à la réalisation en 1972 d'un forage d'une profondeur de 200 m pouvant délivrer une eau à 62 °C avec un débit de 6.7 l·s⁻¹ (Jaffé et al., 1976).

Dès la première crise pétrolière en 1974, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a mis en place une politique d'encouragement des énergies renouvelables et notamment de la géothermie avec la création en 1975 d'une Commission fédérale de géothermie et du stockage souterrain de chaleur (KGS). Celle-ci avait pour mission de clarifier les aspects scientifiques, techniques et économiques liés à la géothermie et d'en promouvoir la connaissance et le développement. Les travaux de la KGS se concrétisèrent en 1981 avec l'édition d'une « Synthèse des données géothermiques » (Rybach et al., 1981). Des cartes furent publiées avec indication du gradient géothermique calculé à partir des mesures de température fournies par les forages pétroliers profonds. Un manuel spécifique fut conçu pour aider les réalisateurs d'installations et les promoteurs à mettre en œuvre des projets (OFEN, 1992).

Les premières études régionales ont identifié le Plateau suisse comme la zone la plus favorable pour l'exploitation d'aquifères profonds visant à l'approvisionnement de réseaux de chauffage à distance. Dans le Bassin molassique, dont l'épaisseur varie de quelques mètres à plus de 3'000 m, les grès de la Molasse marine supérieure sont relativement perméables, du moins dans le Nord de la Suisse. Plus en profondeur, trois horizons formés de roches dures fissurées (calcaires, dolomies et évaporites) sont potentiellement aquifères : le Malm, le Dogger et le Trias (Muschelkalk supérieur). Les régions les plus favorables pour atteindre ces aquifères par des forages profonds avec un investissement économiquement rentable se situent sur le Plateau au nord et à l'ouest de la Suisse, ainsi qu'au pied sud de la chaîne du Jura.

Pour cette raison, dès 1980, deux projets de prospection régionale des ressources géothermiques ont été réalisés, l'un dans la région comprise entre Zurzach (AG) au nord et Schinznach (AG) au sud et l'autre le long du pied sud du Jura entre Bad Lostorf (SO) et Genève, en passant par Biemme (NEFF, 1980 et 1984 ; Burger & Gorhan, 1986 ; Gorhan & Griesser, 1988). Ces études ont été financées par le Nationaler Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) et exécutées par un groupe de recherche comprenant des instituts d'universités et d'écoles polytechniques, ainsi que des bureaux d'ingénieurs. Le Muschelkalk supérieur, considéré comme un aquifère potentiel important, a été la cible de 5 forages de prospection réalisés dans le NW de la Suisse jusqu'à une profondeur de 400 m.

Durant cette même période, les cantons, les communes et autres milieux intéressés par l'exploitation géothermique des aquifères profonds n'étaient pas à même de supporter seuls le financement de forages profonds, relativement coûteux, avec le risque de ne pas obtenir une productivité suffisante. Aussi la Confédération décida-t-elle, en 1987, d'assurer pour une période de 10 ans une couverture du risque géologique pour des forages dont la profondeur dépassait 400 m, avec un montant global de 15 millions de CHF. En cas d'insuccès, il était prévu de rembourser aux promoteurs jusqu'à 50 % des coûts de forage et de tests. Plus tard, une subvention fut mise en place jusqu'en 1997, couvrant à titre d'encouragement jusqu'à 25 % de ces coûts. L'octroi de la couverture du risque, de la subvention et le paiement des montants étaient effectués sur recommandation d'un groupe d'experts de la KGS, après évaluation préliminaire du projet et analyse des résultats du forage.

Avec cette couverture du risque géologique, 14 forages profonds (dont un doublet) ont été réalisés jusqu'en 1998, dont neuf sont exploités commercialement à ce jour (Tableau 9-3 ; Figure 9-8). Toutefois, par rapport aux objectifs de réussite fixés par les contrats avec la Confédération, seules quatre réalisations géothermiques ont été considérées comme des succès (Riehen, Bassersdorf, Bad Schinznach et Lavey-les-Bains) et deux comme des succès partiels (Saillon et Kreuzlingen). Pour ces projets, les températures des eaux profondes captées varient entre 26 et 69° C et les débits de production entre 4 et 23 l·s⁻¹. Les puissances géothermiques calculées en tête de puits sont comprises entre 0.3 et 5.5 MW_{th}.

La fin de la couverture du risque a eu pour effet d'arrêter la mise en place de nouveaux projets géothermiques visant à exploiter les aquifères profonds. Il aurait été pourtant souhaitable de mener une exploration géothermique plus systématique du sous-sol profond, au moyen de nouveaux forages notamment dans les niveaux aquifères peu connus des roches sédimentaires du Trias et dans ceux, moins profonds, du Malm et du Dogger, ainsi que dans les zones à forte densité de peuplement du Plateau suisse. A nouveau, la Confédération a mis en place dès 2009 une couverture du risque géologique pour les forages géothermiques profonds, mais seulement dans les cas où une production d'électricité est prévue, conjointement à l'exploitation de la chaleur.

Tableau 9-3. Caractéristiques des forages géothermiques profonds réalisés en Suisse entre 1983 et 1998 (Vuataz & Fehr 2000).

Forage	Canton	Prof. totale (m)	Formation aquifère	Tempér.: fond (f) ou tête (t) de puits (°C)	Débit de product. (l/s)	Puissance en tête de puits avec refroidissement à 10°C (kW th)	Minéralisation de l'eau (g/l)	Utilisation de la géothermie en 1999	Année de forage
Kloten	ZH	400	Molasse marine supér.	22.7 f 19.0 t	5.0	188	0.92	Quartier de 70 logements	1983
Riehen 1 (producteur)	BS	1547	Muschelkalk supér.	67.0 f 62.0 t	20	4350	18.2	Réseau de chauffage urbain	1988
Riehen 2 (injecteur)		1247		54.0 f	14	–	14.2		1988
Kreuzlingen	SG	655	Molasse marine supér.	30.0 f 26.5 t	3.7	255	0.87	Piscine	1988
Reinach	BL	1793	Muschelkalk supér.	72.0 f	0.10	26	46.2	Aucune	1989
St Moritz	GR	1600	Série de Chastelets Nappe de Platta	47.2 f 22.0 t	1.3	67	14	Aucune	1991
Bulle	FR	800	Molasse marine infér.	30.0 f	0.08	7	–	Aucune	1992
Bassersdorf	ZH	553	Molasse marine supér.	23.0 t	4.3	232	~1	Home médicalisé	1992-93
Weggis	LU	2302	Molasse continent. infér.	73.0 f	0	~70 (sonde géothermique)	–	3 petits immeubles	1992-93
Thônex	GE	2650	Crétacé infér., Jurass. supér.	88.5 f	3.1	765	~1	Aucune	1993
Weissbad	AI	1618	Molasse continent. infér.	45.0 f	0	~50 (sonde géothermique)	–	Centre thermal	1993
Schinznach Bad	AG	891 415	Muschelkalk sup.	63.0 f 44.5 t	8.3	1200	2.15	Centre thermal	1996
Saillon	VS	929	Lias, Trias	32.4 f 30.5 t	4.9	420	4.45	Centre thermal et école (en cours de montage)	1996
Lavey-les-Bains	VD	595	Cristallin Aiguilles Rouges	72.0 f 69.0 t	22.5	5550	1.4	Centre thermal	1997
Yverdon-les-Bains	VD	1440 256 500 1117	Crét. inf., Jurassique sup. et moyen	60 f 22 t 28 t 39 t	92 50 4.3	4590 3760 525	0.45 0.40 0.50	Aucune	1998

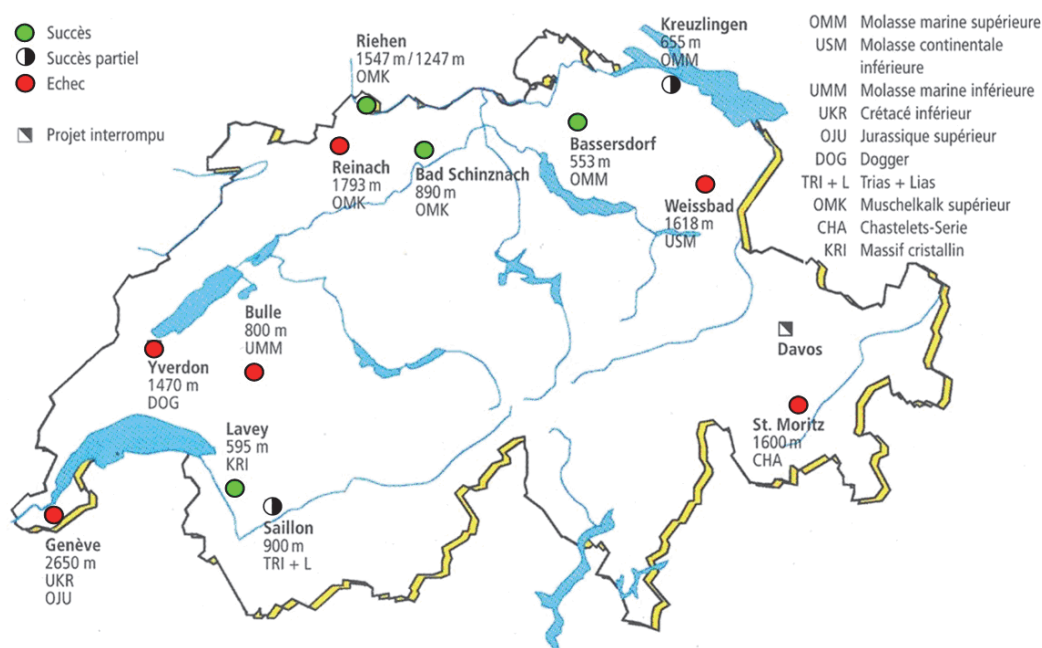


Figure 9-8. Situation, profondeur et état des projets de forages géothermiques profonds en Suisse effectués entre 1987 et 1998 avec l'aide de la Confédération (modifié d'après OFEN 1998).

La première centrale géothermique de Suisse fonctionnant sur le principe du doublet, a été mise en service en 1994 pour le réseau de distribution de chaleur de Riehen (Bâle-Ville). L'exploitation des eaux souterraines est réalisée par deux forages verticaux distants de 1 km. Le forage de production a une profondeur de 1'547 m et celui de réinjection atteint 1'247 m. La température de l'eau en tête de forage est de 62 °C. Le débit d'exploitation, qui était au début de 14 l·s⁻¹, a été porté à 20 l·s⁻¹ après acidification, par injection d'acide chlorhydrique qui a permis de dissoudre la calcite qui bouchait partiellement les fissures aquifères. L'aquifère exploité est celui du Muschelkalk supérieur et l'eau pompée, qui a une minéralisation de 18 g·l⁻¹ (env. la moitié de celle de l'eau de mer) est réinjectée dans le même aquifère. La puissance installée atteint 15 MW_{th}, dont environ le tiers est fourni par la géothermie. Le reste est assuré par deux pompes à chaleur, deux centrales de cogénération chaleur-force à gaz et trois chaudières d'appoint à mazout. L'investissement total a atteint 40 Mio CHF dont 6.2 Mio CHF pour les deux forages. Quelques 180 bâtiments sur territoire suisse sont chauffés par cette centrale et une zone étendue de nouvelles constructions située de l'autre côté de la frontière, à Lörrach (Allemagne), est approvisionnée en énergie depuis fin 2000 par une conduite transfrontalière de 600 m. Grâce à cette part de chauffage fournie par la géothermie, sur une année ce sont 900 t de CO₂, 2 t de SO₂ et 1 t de NO_x qui ne sont pas rejetées dans l'atmosphère (Oppermann, 2001).

Mentionnons enfin deux réalisations géothermiques plus modestes, celles de Seon (Argovie) et d'Itingen (Bâle-Campagne), où des forages peu profonds permettent l'exploitation de ressources géothermiques. A la recherche d'une nouvelle alimentation en eau potable, le village de Seon a mis en exploitation en 1997 un forage dans un aquifère graveleux, situé entre 268 et 320 m de profondeur et correspondant au remplissage d'un ancien surcreusement glaciaire de la Molasse (USM). Pompée avec un débit maximum de 25 l·s⁻¹, l'eau est légèrement minéralisée, dépourvue d'oxygène et possède une température de 19.6 °C. En raison du refroidissement nécessaire de l'eau pour le réseau d'eau potable, il a été décidé de tirer parti de cette énergie en couplant le système d'alimentation à une pompe à chaleur. Ainsi, en abaissant la température à 10 °C, une puissance thermique de 1.45 MW est disponible en sortie de forage, ce qui permet de chauffer à distance une soixantaine d'habitations (Matousek & Graf, 1998). En 1998, seule la moitié de cette énergie était utilisée, ce qui représentait déjà une économie de 200 tonnes de mazout par année.

A Itingen, l'exploitation de l'énergie géothermique se fait par un doublet foré dans les calcaires du Muschelkalk supérieur du Jura tabulaire. Le premier forage, vertical, exploite une eau à 22 °C, entre 262 et 291 m, avec un débit maximal de 5 l·s⁻¹. Le deuxième forage, incliné de 28°, distant de 3 m en surface et de 185 m à la base, sert à la réinjection des eaux pompées, trop minéralisées (5.3 g·l⁻¹). Avec un refroidissement de 12 °C, le potentiel de puissance fournie par ce forage est de 0.25 MW_{th}. Cette ressource permettrait de subvenir aux besoins d'environ 50 appartements à basse consommation construits selon le standard Minergie. En 2000, six habitations de la « Cité Solar One » fonctionnaient grâce à ce doublet géothermique (Häring et al., 2002).

Projets en cours en Suisse

Un certain nombre de projets en Suisse visant l'utilisation d'aquifères profonds sont en cours de réalisation, à des stades variables et selon des concepts différents :

- AGEPP (VD)
- Brigerbad + Brig - Glis (VS)
- Géothermie Profonde la Côte (VD)
- Riehen Plus (BS)
- St-Gall (SG)
- GeoNE (NE)
- Bienne (BE)

Le projet Alpine Geothermal Power Production (AGEPP) a pour but l'exploration et l'exploitation d'un aquifère profond sous la vallée du Rhône dans la région de Lavey-les-Bains. Dans ce but, un forage de 2.5 à 3 km est planifié pour capter un fluide géothermique à environ 100 °C dans les roches cristallines du Massif des Aiguilles-Rouges, afin d'alimenter un réseau de chauffage et, si les conditions s'y prêtent, de produire de l'électricité au moyen d'une petite centrale à fluide binaire. Actuellement, le mode d'exploitation retenu est en singlet ce qui impliquera un rejet du fluide géothermique dans le Rhône après son usage thermique.

Le but du projet Brigerbad était de prospecter et de capter pour le Thermalbad Brigerbad une eau thermale non influencée par les processus de mélange avec les eaux froides peu profondes dans les roches cristallines du Massif de l'Aar, au moyen d'un ou plusieurs forages de 300 à 600 m de profondeur. Ce projet a été un succès car il a permis d'augmenter la température, le débit et la stabilité de la ressource qui était initialement exploitée par le centre thermal au moyen de galeries horizontales peu profondes et de bassins de collecte directement dans la roche. Les résultats obtenus serviront de phase d'exploration préliminaire pour le futur projet Brig - Glis qui vise l'exploitation d'une ressource géothermique plus profonde afin d'alimenter un réseau de chauffage à distance et, si la température de la ressource le permet, une production d'électricité pourra également être envisagée. Il s'agit cependant de deux projets distincts par leur financement et leur but dans deux sites différents de la même région.

Le but du projet Géothermie Profonde La Côte est l'exploration et l'exploitation de l'énergie géothermique des aquifères profonds sur la côte lémanique, entre Nyon et Etoy. Les cibles sont les formations géologiques du Jurassique supérieur et moyen potentiellement aquifères, qui permettraient une exploitation pour des réseaux de chauffage à distance. Les sites présélectionnés possèdent d'une part une forte concentration de consommateurs de chaleur et d'autre part, ils se situent à proximité de grandes zones de failles où la perméabilité des roches est supposée plus élevée.

Le projet Riehen Plus a débuté en automne 2009 et comprend principalement deux volets : le premier consiste à réunir les réseaux de chauffage à distance de la commune de Riehen pour réduire les coûts administratifs en fusionnant les différents services et en optimisant la distribution de chaleur en été. En

effet, jusqu'à présent, la centrale géothermique est arrêtée durant l'été en raison de la faible demande. Cette situation devrait changer grâce à la construction des conduites de liaison entre les différents réseaux de chauffage à distance. Le deuxième volet concerne une augmentation de débit du fluide géothermique pompé qui passera de 18 à 22 l·s⁻¹. Ceci permettra d'augmenter la puissance de la centrale de chauffage. La production de chaleur actuelle atteint 10 à 12 GWh par an et avec l'augmentation du débit et l'optimisation de l'utilisation durant la période estivale, une production comprise entre 20 et 25 GWh par an serait atteinte. Le projet Riehen Plus va donc permettre une diminution des coûts d'exploitation, une augmentation de la production de chaleur géothermique et une baisse des émissions de CO₂ en diminuant la part de chaleur produite par le gaz naturel.

Le projet de la ville de St-Gall vise les aquifères du Jurassique supérieur et du Trias moyen avec des températures respectives estimées à 150 et 170 °C afin de pouvoir produire conjointement chaleur et électricité. La puissance estimée des futures installations est d'environ 30 MW thermiques et 3 MW électriques. Une campagne d'exploration géophysique a été menée début 2010 afin de parfaire la connaissance géologique et d'élaborer un modèle 3D des couches et des structures. Ce projet vient s'inscrire dans le plan énergétique de la ville de St-Gall dont le but est de s'affranchir des énergies fossiles pour le chauffage à l'horizon 2050.

Les deux derniers projets, GeoNE (canton de Neuchâtel) et Bienne sont encore dans leur phase de pré-faisabilité. Tous deux visent une exploitation des aquifères profonds, mais aucun projet de forage n'est encore défini à ce jour.

9.2.6 Projets de géothermie profonde dans le Bassin genevois

Le seul projet d'exploration géothermique d'un aquifère profond réalisé dans le canton de Genève est celui de Thônex, dont le premier forage THX-1 date de 1993 (Jenny et al. 1995). En raison de la faiblesse du débit obtenu dans l'aquifère du Malm, ce projet a été arrêté et aucune autre tentative de prospecter un aquifère profond n'a été tentée depuis lors. A notre connaissance, aucun projet d'exploration géothermique profonde n'a été envisagé dans la partie française du Bassin genevois (Ain, Haute-Savoie) jusqu'à ce jour.

Par contre, un projet de géothermie de grande profondeur a débuté à Genève dès 1998. Il a été réalisé en parallèle au projet Deep Heat Mining Basel, mais avec un décalage d'environ quatre ans par rapport à l'avancement du projet bâlois. Il s'agissait d'un projet de type EGS, appelé Géothermie Grande Profondeur Genève (GGP Genève), qui visait à capter l'énergie géothermique du socle cristallin entre 5 et 6 km de profondeur, afin d'atteindre une température du réservoir de 200 °C et d'assurer une coproduction de chaleur et d'électricité.

En raison des événements sismiques induits par la stimulation hydraulique du forage Basel-1 à fin 2006, le projet EGS du bord du Rhin a été immédiatement stoppé, avant d'être définitivement arrêté trois ans plus tard, sur la base d'une étude d'évaluation du risque sismique régional mandaté par le canton de Bâle-Ville à un consortium international. En 2007, il a également été décidé de suspendre le projet GGP-Genève et de le recentrer quelques années plus tard sur la valorisation du forage géothermique de Thônex. C'est l'ensemble du territoire cantonal qui est maintenant concerné par une évaluation des ressources géothermiques profondes, d'abord les aquifères profonds (APR) et dans un futur plus lointain les systèmes géothermiques stimulés (EGS).

Au cours des investigations du projet GGP-Genève de 1998 à 2006, plusieurs étapes successives ont permis de mener les actions suivantes : recensement des sites potentiels, sélection du site des ouvrages (forages d'exploitation, centrale), validation du site, mise sur pied de la structure opérationnelle, planification énergétique, étude économique et plan financier (ScanE, SIG & ADHM, 2003 ; Projet GGP-Genève, 2004).

Parmi plusieurs emplacements possibles sélectionnés pour leurs critères géologiques, géographiques, domaniaux, environnementaux et énergétiques, un site avait été retenu à l'époque pour l'implantation de la future centrale de production et des forages d'exploitation. D'une superficie de 4 ha, il était localisé au sud de la presqu'île d'Aire, sur le territoire de la commune de Vernier, au voisinage nord de la station d'épuration. L'ensemble du projet avait été devisé à 90 millions de francs, qui se répartissaient de la manière suivante :

- 7 millions CHF pour les phases préliminaires et de validation du site (études et 1^{er} forage d'exploration et de contrôle sismique).
- 42 millions CHF pour la phase d'exploration (2^e et 3^e forages d'exploration et de contrôle sismique, 1^{er} et 2^e puits profonds d'exploitation).
- 41 millions CHF pour la phase de développement (3^e puits d'exploitation, stimulation et tests du réservoir, centrale de production, raccordements).

Dans la période de 1998 à 2006, l'équipe de projet GGP-Genève a mené à bien un certain nombre d'études détaillées :

- Faisabilité du site d'Aire pour les forages profonds, la centrale et le raccordement au réseau électrique et au réseau de chauffage à distance.
- Notice d'impact du site d'Aire.
- Evaluation et sélection de sites pour l'implantation des forages d'exploration et de contrôle sismique.
- Conditions géologiques et hydrogéologiques du site sélectionné de Peney pour la réalisation du 1^{er} forage d'exploration et d'écoute sismique.
- Evaluation des techniques et des coûts de forage.
- Etudes énergétiques.
- Etude économique et plan d'affaire préliminaire.

9.3 Technologie et développement des systèmes géothermiques stimulés (EGS)

9.3.1 Concept technique et état des connaissances

La technologie des systèmes géothermiques stimulés inclut déjà plus de 35 ans de recherche et de développement dans plusieurs pays (USA, Japon, Grande-Bretagne, Allemagne, France, Suisse, Australie) et sous de nombreux noms : Hot Dry Rock (HDR), Hot Fractured Rock (HFR), Hot Wet Rock (HWR), Deep Heat Mining (DHM), Enhanced Geothermal Systems (EGS), Petrothermal Systems, etc.

Les systèmes géothermiques profonds peuvent être classés selon la perméabilité de leur réservoir et donc de leur productivité. Dans la nature, on trouve aux deux extrémités du champ continu des perméabilités d'un côté les systèmes hydrothermaux, fortement perméables dont la faisabilité économique est prouvée, et de l'autre les systèmes quasi imperméables ne permettant pas une exploitation commerciale. Entre les deux se trouvent tous les systèmes géothermiques à faible ou moyenne perméabilité, qui nécessitent une stimulation du réservoir pour devenir économiques (Figure 9-9).

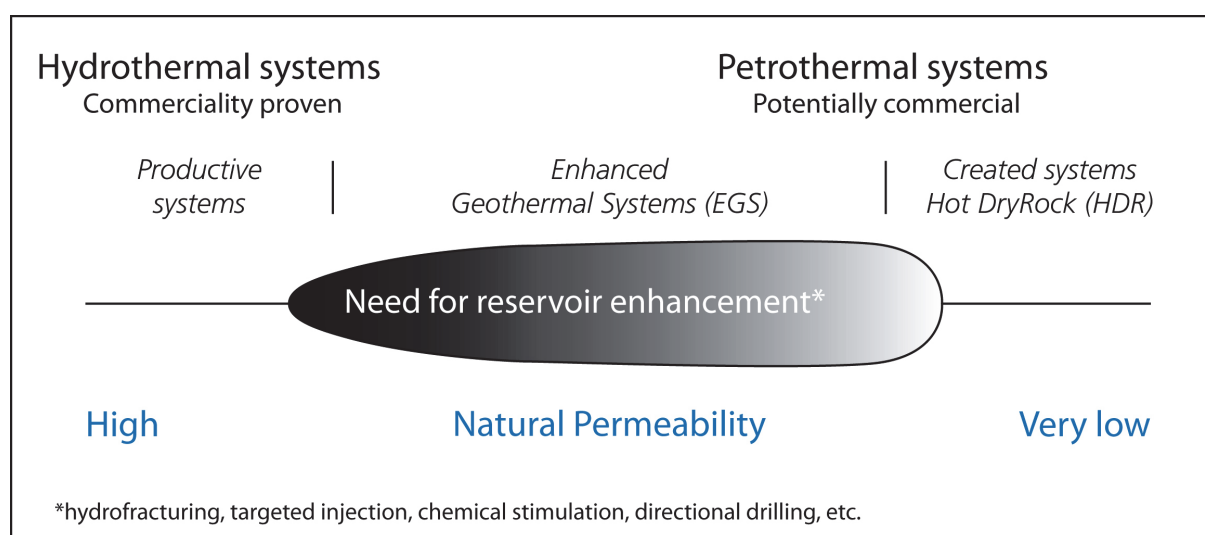


Figure 9-9. Illustration du domaine de perméabilité pour divers systèmes géothermiques (Graphique : CREGE 2009)

Tous les projets de R&D qui ont débuté dans les années 1970 et 1980 sur la base de fonds publics, se sont arrêtés avant la réalisation d'une centrale pilote, en raison de l'assèchement des ressources financières. Seul le projet européen de Soultz-sous-Forêts (Alsace, France) à financement mixte a vu son achèvement et l'inauguration de sa centrale pilote en 2008, après plus de 20 ans de recherche et de développement de la technologie EGS sur ce site. La première installation commerciale de type EGS, mais proche des conditions des systèmes hydrothermaux a vu le jour à Landau (Allemagne), également dans le fossé rhénan : elle a bénéficié de tout le savoir-faire acquis sur le projet de Soultz, ainsi que de conditions géologiques et techniques similaires, en raison de sa localisation.

Le projet Deep Heat Mining à Bâle est le seul projet EGS qui a été arrêté en raison d'événements sismiques, induits par la stimulation hydraulique du réservoir profond.

Jusqu'à présent, tous les projets EGS ont tenté de créer des réservoirs fracturés dans des roches de type granitique situées dans le socle cristallin à des profondeurs de 2 à 5 km et des températures entre 80 et 250°C. Chaque projet EGS a permis d'acquérir un certain savoir-faire dont les principaux aspects sont résumés dans le tableau 9-4.

Tableau 9-4. Synthèse des méthodes et technologies appliquées aux projets EGS (ENGINE Coordination Action, 2008 ; Tester et al., 2006 ; U.S. DOE, 2008).

Méthodes et technologies	Caractéristiques
Forages profonds, déviation et complétion	Réalisation de forages profonds verticaux ou déviés ; Pénétration dans le socle cristallin sous 1 à 3 km de sédiments ; Profondeur maximale des forages: 5 km ; Ecartement à la base des forages: max. 650 m.
Stimulation du réservoir	En priorité : stimulation hydraulique ; En complément : stimulation chimique ; Résultats et reproductibilité très variables.
Contrôle spatial de la fracturation	Réseau d'écoute sismique (géophones) mis en place dans des forages de moyenne profondeur ; Approche 3D du réservoir fracturé.
Diagraphies	Outils à haute température, notamment pour obtenir une imagerie des parois du puits (remplace partiellement le carottage).
Tests de production et d'injection	Tests en puits unique ou en doublet d'une durée de quelques jours à quelques mois.
Production	Production du fluide du réservoir par pompage (pompe immergée ou pompe à arbre long).
Réinjection	Réinjection du fluide au moyen d'une pompe de surface.
Sismicité induite	Enregistrement continu de la sismicité induite par la stimulation hydraulique, respectivement par l'exploitation du réservoir.
Volume du réservoir et évolution spatio-temporelle	Nouveaux traceurs chimiques et tests de traçage ; Mal connue par manque d'expérience (exploitation continue à Soultz de moins de 2 ans).
Durée de vie des forages d'exploitation	Peu connue, par manque d'expérience ; Dépend des conditions de stress pour les tubages et de la qualité chimique du fluide de la formation.
Conversion en électricité	Centrale à fluide binaire (ORC) de 1 à 4 MW _e .

Deux documents de synthèse ont été élaborés vers la fin des années 2000 sur le potentiel et la technologie EGS. Le premier représente la réflexion d'un groupe de travail du MIT sur le potentiel des systèmes géothermiques stimulés (EGS) pour les USA (Tester et al., 2006). Le deuxième est lié à l'Action de coordination européenne ENGINE : il s'agit d'un manuel des meilleures pratiques pour le développement des ressources géothermiques non conventionnelles, focalisé sur les EGS (ENGINE Coordination Action, 2008). Au fur et à mesure de l'avancement des projets EGS majeurs, de nombreux documents et volumes spéciaux de journaux ont consacré à tel ou tel projet, notamment celui de Soultz (Fritz & Gérard, 2010). De très nombreux articles provenant de congrès de géothermie se trouvent également réunis dans la base de données en libre service de l'International Geothermal Association (IGA) <www.geothermal-energy.org/304,iga_geothermal_conference_database.html>.

9.3.2 Questions en suspens et problèmes à résoudre

Au cours de chacun des projets EGS, des percées technologiques et des progrès décisifs ont été accomplis, mais pour approcher les conditions d'un développement économique des systèmes EGS, les principaux paramètres du réservoir géothermique doivent atteindre des valeurs qui, jusqu'à ce jour, n'ont pas encore été toutes égalées pour un réservoir donné dans les divers projets internationaux (Tableau 9-5).

Tableau 9-5. Valeurs recherchées pour les principaux paramètres d'un réservoir EGS (Garnish, 2002).

Paramètres	Valeurs obtenues dans les projets	Valeurs cibles minimales
Débit de production	$\leq 40 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$	50 - 100 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
Température en tête de puits de production	$\leq 180 \text{ }^\circ\text{C}$	150 - 200 $^\circ\text{C}$
Surface totale effective de l'échangeur de chaleur souterrain	$> 2\cdot 10^6 \text{ m}^2$	$> 2\cdot 10^6 \text{ m}^2$
Volume de roche impliqué	$> 200\cdot 10^6 \text{ m}^3$	$> 200\cdot 10^6 \text{ m}^3$
Impédance du fluide	$< 0.23 \text{ MPa}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	$< 0.1 \text{ MPa}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Perte de fluide	0 %	$< 10 \%$

Cependant, de nombreuses difficultés ont été rencontrées dans plusieurs domaines, qui ont eu pour effet des retards accumulés, voire des arrêts temporaires ou définitifs de plusieurs projets R&D. Une liste non exhaustive des questions en suspens et des problèmes à résoudre pour atteindre à moyen terme un véritable développement économique des systèmes EGS est présentée dans le tableau 9-6.

Tableau 9-6. Problèmes à résoudre et technologies à améliorer pour les systèmes EGS (Tester et al., 2006 ; U.S. DOE, 2008).

Tâches	Méthodes, outils et conditions à créer ou à améliorer
Caractérisation des sites potentiels	Développement de méthodes géophysiques pour détecter les structures dans le cristallin et les fractures perméables ; Développement de nouveaux outils de modélisation géologique 3D du réservoir potentiel.
Forages profonds, déviation et complétion	Diminution du coût des forages profonds (vitesse de pénétration, durée de vie des outils de forage) ; Nouveaux matériaux et concepts pour les tubages et l'équipement de complétion ; Augmentation de la profondeur de forage en routine de 5 à 6 km ; Moderniser les technologies de forage (forage slimhole, micro forage, spallation hydrothermale, plasma, etc.) ; Disponibilité des appareils de forage profond sur le marché.
Stimulation du réservoir	Techniques de modélisation de la stimulation et de l'identification des conduits d'écoulement ; Méthodes de stimulation hydraulique : augmentation de l'efficacité ; diminution et prévision du risque de sismicité induite ; Méthodes de stimulation chimique : concepts de réalisation ; nouveaux composants chimiques ; couplage avec la stimulation hydraulique.
Diagraphies	Développement d'outils résistants à haute température (imagerie du puits, diagraphies pendant le forage) ; Augmentation de la durée de vie des outils dans les conditions du réservoir.
Tests de production et d'injection	Développement d'outils fiables pour les conditions du réservoir : packers récupérables pour isoler les zones productrices, sondes de pression/température, autres sondes pour des paramètres physiques et chimiques.
Pompes de puits	Fiabilité et durée de vie des pompes immergées et des pompes à arbre long : profondeur de 300 à 500 m ; températures de 150 à 250 °C ; débit de 50 à >100 l·s ⁻¹ .
Réinjection	Mise au point de composants chimiques pour éviter les dépôts de minéraux dans les fissures proches des puits de réinjection.
Sismicité induite	Protocoles opérationnels limitant la sismicité induite par la stimulation hydraulique, respectivement par l'exploitation du réservoir.
Evolution du réservoir	Modélisation couplée des processus thermiques, hydrauliques, mécaniques et chimiques.
Durée de vie des forages d'exploitation	Expérimentation in situ des processus de corrosion ; Modélisation des processus de corrosion et de dépôts dans le réservoir et les installations de surface.
Effet d'échelle	Diminution du coût spécifique des installations : augmenter le nombre de forages et le volume des réservoirs ; accroître d'un ordre de grandeur au minimum (10 à 50 MW _e) la puissance des centrales électriques (actuellement entre 1 et 4 MW _e).

9.3.3 Situation des projets EGS dans le monde

Au plan mondial, le potentiel des systèmes géothermiques stimulés est gigantesque. Des estimations et des extrapolations ont été effectuées pour différents pays et continents. Ces chiffres ne sont que difficilement comparables d'une étude à l'autre si la méthode d'évaluation et la définition du potentiel ne sont pas clairement définies. A titre d'exemple le potentiel EGS pour les USA est estimé à 100 GW_e et une autre étude mentionne 450 GW_e pour l'ensemble de la planète, montrant évidemment de fortes incertitudes puisque l'ensemble des continents ne représente pas 5x la superficie des USA. En effet, des roches chaudes dans le socle cristallin sont présentes plus ou moins partout à des profondeurs pouvant être atteintes par la technologie actuelle de forage (< 10 km de profondeur). Pour générer de l'électricité à des coûts économiques, le réservoir géothermique doit égaler ou dépasser 150 °C, ce qui donne une profondeur d'au moins 4 km avec un gradient géothermique moyen de 30 à 35 °C·km⁻¹, comme pour la majeure partie des régions géologiquement stables (sans volcanisme ni tectonique active), telles que le Plateau suisse. Dans certaines régions, le gradient géothermique est nettement plus élevé (par ex. un graben ou une zone tectoniquement active) et l'on obtient une température plus élevée pour le système EGS choisi, ou alors la profondeur de forage est plus faible, ce qui dans les deux cas représente un net avantage économique.

Dans le monde, l'activité de recherche et de développement de la technologie EGS avance de manière très variable. En Suisse, depuis l'arrêt du projet bâlois, il n'y a plus de nouveau projet avéré. Par contre, plusieurs chercheurs travaillent depuis des années de manière continue sur le site EGS de Soultz et un projet de l'ETH-Zurich, GEOTHERM, met au point des modèles de processus couplés actifs dans les réservoirs EGS. Quelques projets de développement existent également en Allemagne, en Grande-Bretagne et aux USA, encore dans un stade préliminaire.

Dans la période qui a suivi l'arrêt du projet DHM de Bâle et le démarrage de la centrale du projet de Soultz, l'activité de prospection de surface et d'exploration par forage pour les EGS a pris une grande ampleur en Australie. En 2009, pas moins de 48 compagnies travaillant dans l'exploration des ressources géothermiques profondes, essentiellement les EGS, ont acquis pour une somme totale de 325 millions AUS\$ quelque 383 licences géothermiques sur une superficie de 358'400 km² du territoire australien, essentiellement dans la moitié sud. Une partie des ressources EGS se trouvent dans du socle fracturé entre 4 et 5 km de profondeur à une température de 200 à 290 °C. Les investissements pour la géothermie profonde (EGS incl.) durant la période 2002 à 2014 en Australie se monteraient à 2'700 millions US\$, dont 10% provenant de subsides gouvernementaux. Quant à la première centrale électrique pilote EGS d'Australie, elle devrait démarrer au début de 2012 dans le Cooper Basin. Ensuite, plusieurs centrales EGS de démonstration de 25 à 30 MW_e sont prévues dans les années qui suivent.

9.3.4 Projections à moyen terme

En Suisse, dès le milieu des années 2000 plusieurs tentatives ont tenté de mettre en place des financements, des programmes et des structures de R&D pour accélérer la prospection et le développement de la géothermie profonde et notamment des ressources EGS :

- Réseau de compétences CREGE créé à Neuchâtel en 2004 : actuellement, renommé SGnet, c'est une association formée de 62 membres institutionnels fonctionnant en réseau. On trouve des membres du réseau dans la plupart des projets de géothermie en Suisse.
- Motion Theiler déposée en 2007 : « Le Conseil fédéral est chargé de soumettre au Parlement une demande de crédit de 60 millions de francs, par la voie du message relatif à l'encouragement de la formation, de la recherche et de l'innovation pendant les années 2008 à 2011, aux fins de financer un programme de recherche en matière de géothermie profonde; cette somme sera budgétisée chaque année à partir de 2008. ». Cette motion a été largement acceptée par les deux chambres fédérales, mais n'a pas trouvé de financement dans le budget 2008 de la Confédération.

- Programme PROGEOTHERM : programme national de développement de la géothermie profonde en Suisse comportant trois domaines d'action et deux périodes de 4 ans : Formation spécialisée, Recherche & Développement, Pilote & Démonstration. Financé par l'Office fédéral de l'énergie, l'élaboration du programme PROGEOTHERM a été initiée dans la foulée de la motion Theiler et préparée par un groupe de travail formé de 14 spécialistes (Vuataz, éd., 2007). Aucune suite n'a été donnée à ce projet.
- Programme FEGES : sous l'égide de l'organisation faitière GEOTHERMIE.CH, le programme FEGES de recherche & développement pour la production d'électricité à partir des systèmes géothermiques stimulés (EGS) a été conçu et rédigé par un groupe de travail de la SSG/SVG. Il visait la création d'une coopérative nationale indépendante de R&D pour le développement de la technologie EGS dans un délai de 25 ans (Mégel, 2007). Aucune suite n'a été donnée à ce projet.

A moyen terme, plusieurs facteurs pourraient influencer positivement le développement des systèmes géothermiques EGS en Europe et en Suisse. Les premières avancées viendront vraisemblablement de l'Australie, avec la résolution des problèmes techniques limitant le développement des systèmes EGS, ainsi que le démarrage et l'exploitation de plusieurs centrales géothermiques de démonstration. De plus, l'établissement de nouvelles lois sur l'énergie ou des événements géopolitiques touchant l'approvisionnement en énergie pourraient faire avancer plus rapidement le développement des énergies indigènes en Europe et en Suisse, notamment les EGS.

Finalement, deux nouvelles entités ont été créées en 2010 en Suisse pour le développement industriel de la géothermie profonde et des EGS, qui vont certainement dynamiser la scène géothermique helvétique dans les années à venir :

- Centre de compétences en géothermie d'AXPO AG (Glattburg) : participation à un projet de géothermie profonde à Taufkirchen (Allemagne) et préparation de projets en Suisse.
- Geo-Energie Suisse SA (Bâle) : un consortium de sept entreprises énergétiques a créé un centre suisse de compétences pour la géothermie avec comme but la production à moyen terme d'électricité par la géothermie.

En conclusion, même si les systèmes géothermiques stimulés (EGS) possèdent un fort potentiel de production d'électricité et de chaleur en Europe et en Suisse, ils ne pourront faire réellement partie du mix énergétique que lorsque les barrières technologiques et économiques connues auront été surmontées. A ce moment-là, des centrales EGS de 10 à 50 MW_e pourront être installées de manière reproductible dans divers environnements géologiques et l'énergie produite pourra être vendue aux conditions du marché. Ce défi peut être relevé à l'horizon 2020 – 2050, mais il ne sera atteint qu'au moyen d'efforts politiques et financiers conséquents, inscrits dans la durée, en vue de la réalisation de plusieurs installations EGS pilotes dans les pays souhaitant le développement de la géothermie profonde.

9.4 Synthèse des données du sous-sol genevois

La région genevoise au sens cantonal est, d'un point de vue géologique, indissociable du reste du Bassin genevois. De ce fait la présente étude considère la région délimitée au sud-ouest par la faille du Vuache, à l'ouest par la Haute-Chaine du Jura, à l'est par le Mont Salève et au nord par une limite arbitraire qui est un prolongement vers le nord-ouest et le sud-est de la limite septentrionale du petit lac (Figure 9-10).

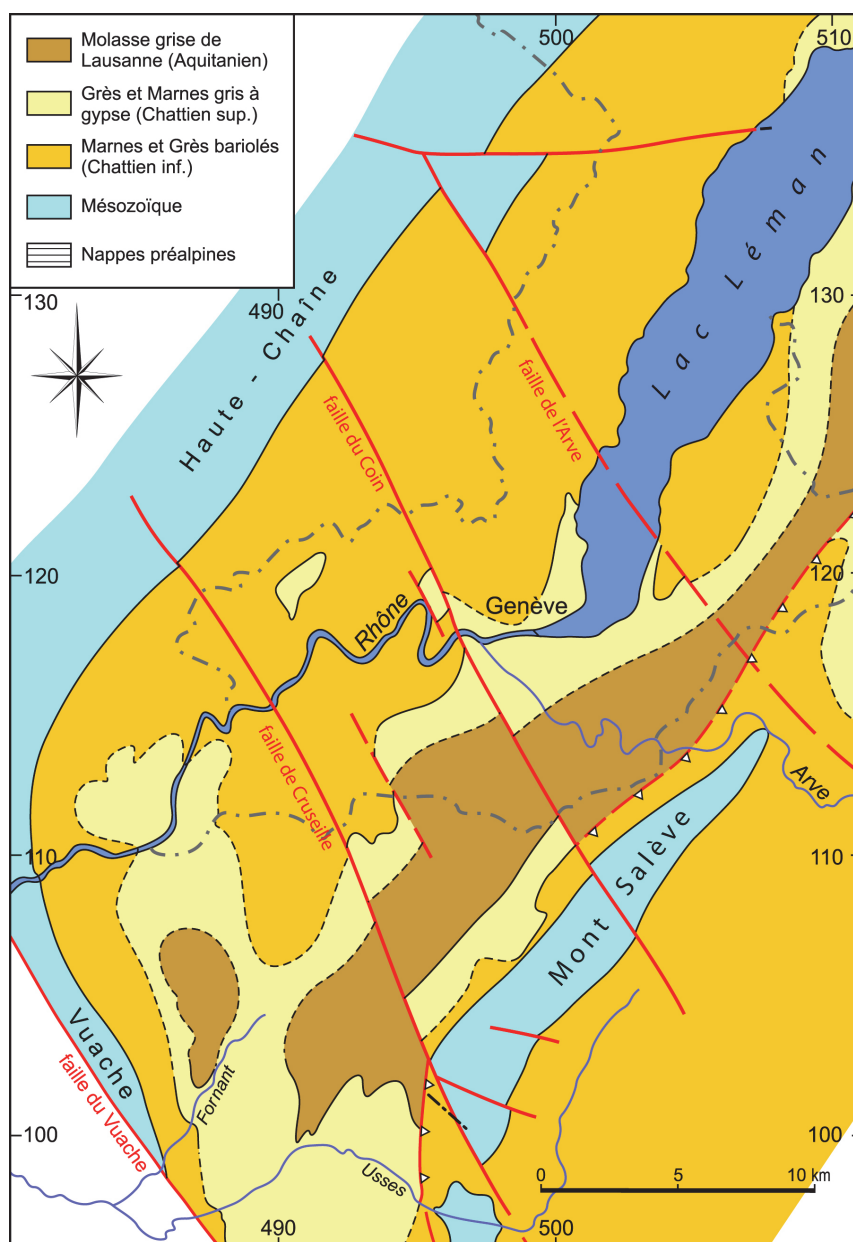


Figure 9-10. Situation de l'étude (modifié d'après Charollais et al., 2007).

9.4.1 Géologie

Le Bassin genevois est la partie la plus méridionale du plateau molassique suisse. Cette situation est particulière car la distance séparant le Jura des formations alpines est réduite relativement au reste de la Suisse. Les formations géologiques présentes dans le sous-sol genevois couvrent quatre ères géologiques. Elles sont présentées sur la figure 9-11 en allant des plus anciennes aux plus jeunes. Les informations présentées sont issues de recoupements entre les données des affleurements, lorsqu'ils existent, et celles recueillies grâce aux différents forages profonds effectués dans la région.

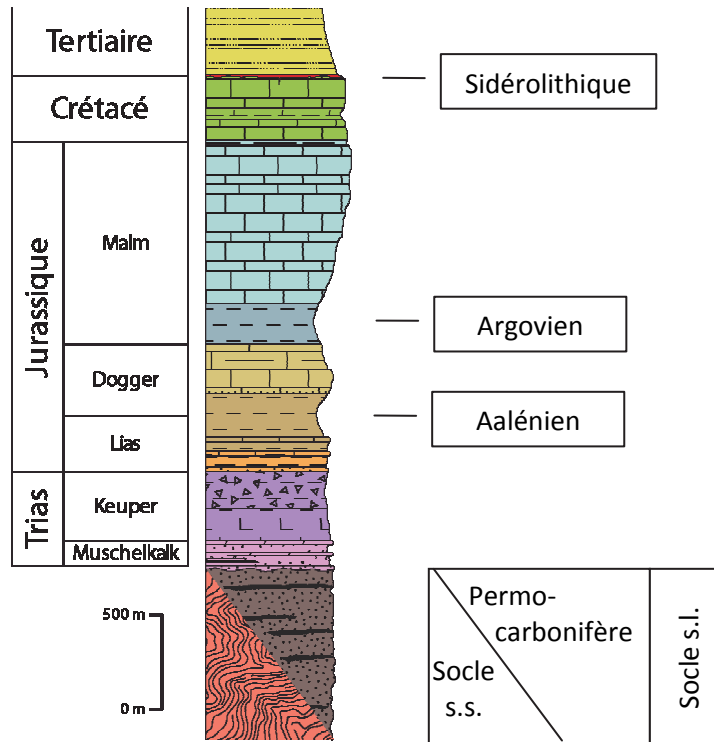


Figure 9-11. Stratigraphie synthétique des formations géologiques du Bassin genevois. A gauche : nom des périodes et des époques géologiques. A droite : dénomination utilisée dans ce rapport lorsqu'elle diffère du nom des époques géologiques.

Socle et Permo-carbonifère

Le socle s.s. est formé de roches magmatiques ou métamorphiques d'âge ante carbonifère qui ont subi l'orogénèse hercynienne. Lors de cette phase, des dépressions ou grabens d'orientation générale SW-NE à WSW-ENE se sont formés. Ils ont été comblés par des sédiments détritiques d'âge permien et carbonifère issu de l'érosion de la chaîne hercynienne. C'est ce qui est communément appelé graben permo-carbonifère. Morphologiquement on appelle « graben » les structures basses (vallée) et « horst » les parties hautes. Leur présence est suspectée sous le Jura et sous une bonne partie du plateau suisse (Figure 9-12). Sous le Bassin genevois ils ont vraisemblablement un aspect de demi-graben c'est-à-dire en escalier car les couches qui sont au-dessus s'approfondissent progressivement en direction des Alpes ne laissant la place qu'à un horst au lieu de deux. Ils forment, avec les roches magmatiques et métamorphiques, le socle s.l. qui a été intensément érodé à la fin de l'ère primaire (pénéplanation). A la fin de cette ère, la région genevoise est donc relativement plane et c'est sur cette surface que viendront se déposer les sédiments mésozoïques.

En bordure du Bassin genevois, le forage pétrolier d'Humilly-2 a atteint les formations permo-carbonifères à plus de 3'000 m de profondeur. Cependant du fait de leur profondeur et de leurs caractéristiques géophysiques, la cartographie des grabens est le plus souvent sujette à caution et leurs structures incertaines. Dans le forage d'Humilly-2, le Permo-carbonifère est une alternance de grès plus ou moins argileux et d'argile. C'est cette composition qui est considérée pour l'ensemble du canton en y ajoutant la présence, avérée par différentes lignes sismiques, d'importants bancs de charbon.

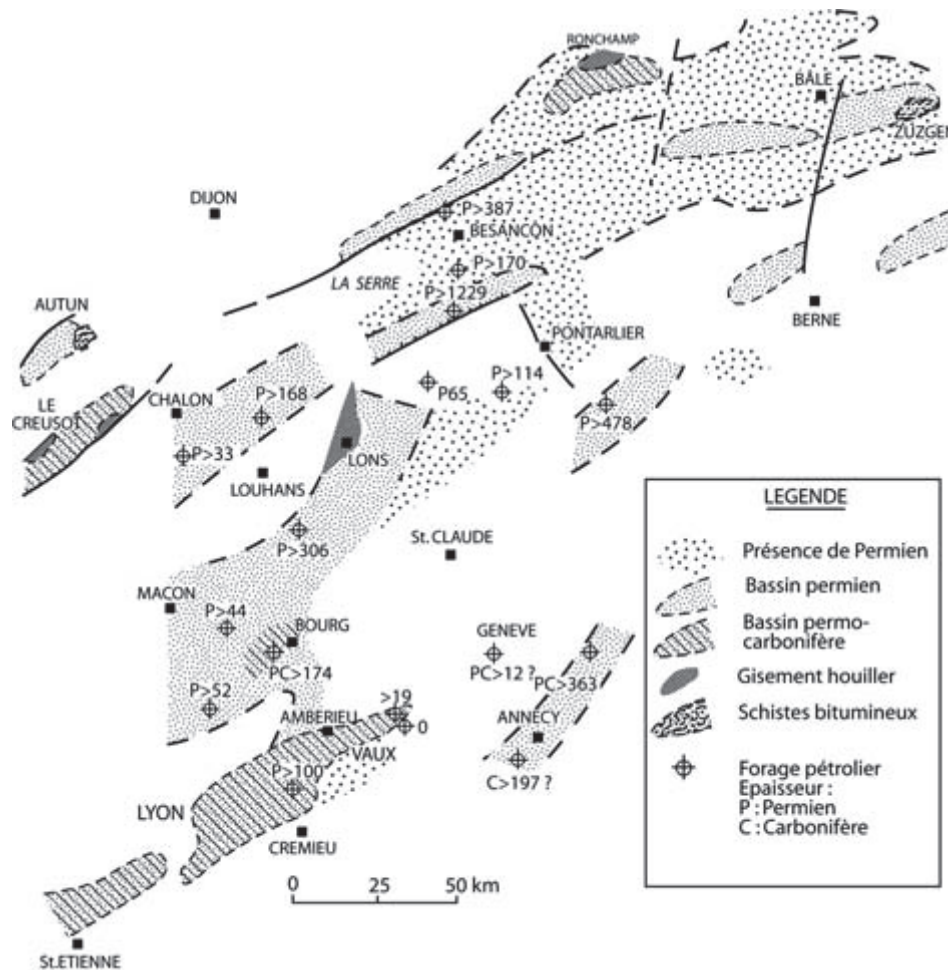


Figure 9-12. Essai de cartographie composite des Bassins permo-carbonifères (P. Chauve, d'après Rigassi, IFP-AFTP, et Bichet et Campy, 2009)

Les deux formations présentées précédemment forment le socle s.l. au-dessus duquel les formations d'âge mésozoïque sont venues se déposer et ont été déformées par l'orogénèse alpine. Il affleure dans le Massif central, dans les Vosges, le massif de la Serre et en Forêt Noire, il plonge doucement en direction des Alpes. Il affleure également au cœur de ces dernières sous la forme des massifs cristallins où il est également possible d'y trouver des formations permo-carbonifères comme, par exemple, dans le synclinal de Dorénaz (VS).

Mésozoïque

Lors de l'ère secondaire (Mésozoïque) se trouve, à l'emplacement du Jura actuel, une mer épicontinentale qui a déposé une importante couche de sédiments marins, majoritairement des calcaires et des marnes. Cette ère se subdivise en trois périodes : le Trias, le Jurassique et le Crétacé, en allant de la plus ancienne à la plus récente.

Trias (245 – 205 Ma)

Le faciès du Trias du Bassin genevois ainsi que celui du Jura est de type germanique. Il débute donc par un grès continental d'altération du socle : les grès bigarrés du Buntsandstein. Il s'ensuit la première transgression marine au Muschelkalk et les sédiments qui y sont associés sont composés de grès, d'argiles, de dolomies et d'évaporites qui attestent d'un milieu de dépôts peu profonds de type lagune. Au-dessus du Muschelkalk se trouve le Keuper, série composée de marnes et d'évaporites (sel gemme et gypse) qui ont été exploitées par le passé. Ce sont ces couches évaporitiques du Trias moyen qui ont permis aux couches plus jeunes du Jurassique et du Crétacé de se décoller pour former les plissements jurassiens et le Salève. Le Trias se termine au Rhétien par un épisode sans évaporites, formé d'argiles, de grès et de calcaire.

Jurassique (205 – 146 Ma)

Le Jurassique inférieur (Lias) commence par un approfondissement rapide de la mer épicontinentale et débute par un épisode carbonaté formé d'alternance de marnes et de calcaires argileux. Cette série est plus importante que dans le Jura avec une épaisseur de plus de 180 m rencontrée dans le forage d'Humilly-2 où un épisode moins marneux a également été rencontré proche du sommet. Le reste du Lias est essentiellement argileux et il est difficile de le différencier de l'Aalénien qui forme la base du Dogger (Jurassique moyen) car cette formation est également argileuse.

C'est vers le milieu du Dogger que se met en place la première plateforme carbonatée qui donne lieu à des dépôts calcaires plus ou moins argileux. Cette partie du Dogger datée du Bajocien – Bathonien fait plus de 250 m d'épaisseur dans le forage d'Humilly-2, où elle est composée de calcaires, de calcaires oolithiques, de calcaires marneux et de marnes.

Le Jurassique supérieur ou Malm débute par une sédimentation plus marneuse datant de l'Oxfordien avec plus de 200 m d'épaisseur. Il est suivi par une barre de calcaires massifs qui datent du Kimméridgien – Tithonien et qui sont plus ou moins argileux avec également quelques passées marneuses. L'ensemble fait plus de 450 m d'épaisseur. Ces dépôts attestent la présence d'une succession de plates-formes carbonatées jusqu'au Tithonien. Ce sont ces calcaires qui forment les falaises des crêtes de la Haute-Chaîne. Le Malm se termine par le Purbeckien avec une épaisseur d'environ 20 m. Il est plus marneux que le reste du Malm avec une différence de faciès importante entre les forages d'Humilly-2 et de Thônex-1 qui l'ont tous deux traversé. En effet, à Humilly, il est nettement plus calcaire qu'à Thônex car les marnes n'ont pas été rencontrées.

Crétacé (146 – 65 Ma)

Le Crétacé inférieur est marqué par une nouvelle transgression marine au Valanginien. A ce moment, une nouvelle plate-forme carbonatée s'installe. De ce fait, le Crétacé inférieur est essentiellement composé de formations calcaires à l'exception de l'Hauterivien inférieur. En effet, un approfondissement a eu lieu à cette époque et les dépôts sont plus marneux. Il s'agit des marnes d'Hauterive et elles sont épaisses d'environ 60 m à Thônex comme à Humilly. L'ensemble des formations du Crétacé inférieur représente une épaisseur de près de 300 m. Suite à une émergence généralisée, il s'agit des seuls sédiments crétacés présents dans la Haute-Chaîne mais également dans le Bassin genevois, le Crétacé supérieur et moyen ayant été érodés.

Tertiaire et Quaternaire

De cette émergence résulte la première formation d'âge tertiaire (vraisemblablement l'Éocène) qui est un sédiment continental appelé Sidérolithique. Il s'agit d'un grès d'une épaisseur maximum de quelques mètres qui est venu remplir les karsts et les fractures. Le reste du Tertiaire est essentiellement représenté par la Molasse qui est une formation détritique résultant de l'érosion des Alpes. La Molasse est, de ce fait, composée essentiellement de grès et de marnes. Une spécificité de la Molasse dans le canton de Genève montre que certains niveaux peuvent être riches en hydrocarbures (Molasse bitumineuse).

Le Quaternaire quant à lui n'est pas suffisamment épais pour entrer dans le domaine d'investigation profond et n'a donc que peu d'importance pour ce chapitre sur les APR. Il est essentiellement composé de dépôts d'origine glaciaire.

9.4.2 Contexte tectonique et sismicité naturelle

La formation des reliefs actuels a principalement eu lieu lors des phases tardives de l'orogénèse alpine, à la fin du Tertiaire. Les sédiments mésozoïques se sont décollés du socle grâce aux couches du Trias qui ont agi comme du savon et, dans la région genevoise, ils ont formé des plis sur rampes comme ceux de la Haute-Chaîne et du Salève qui s'enfoncent ensuite sous un Bassin molassique (respectivement le Bassin genevois et le Bassin savoyard). Pendant le Quaternaire, ces reliefs ont été, au moins par deux fois, recouverts par une calotte glaciaire qui les a modelés.

Il faut par conséquent distinguer la partie jurassienne du Bassin molassique où les sédiments secondaires sont peu déformés. Cette différence est vraisemblablement due à l'importante épaisseur de Molasse déjà présente lors des phases de déformation et qui a, par son poids, empêché les couches de se déformer.

Ces structures « jurassiennes » possèdent une orientation principalement NE-SW qui est la même que l'orientation supposée des grabens permo-carbonifères. Il est cependant possible de noter la présence d'autres structures d'orientation générale SE-NW sur la figure 9-10. Il s'agit de grandes failles décrochantes sénestres qui tronçonnent les sédiments secondaires : faille du Vuache, de Cruseilles, du Coin et de l'Arve. Ces failles, à l'exception de celle du Vuache, ne s'expriment pas en surface dans le Bassin genevois, mais elles s'y prolongent vraisemblablement comme l'atteste l'interprétation des lignes sismiques.

L'évolution de ces différentes structures se poursuit car elles sont liées à l'orogénèse alpine qui n'est pas terminée. Il existe donc une sismicité naturelle régionale et historique : plus de 150 séismes ont été répertoriés de 1322 à 1988. Dix de ces séismes d'une magnitude allant de 2.2 à 4.4 ont été analysés (Figure 9-13) : ils montrent des épïcêtres peu profonds compris entre 2 et 5 km, situés sur les fractures décrochantes.

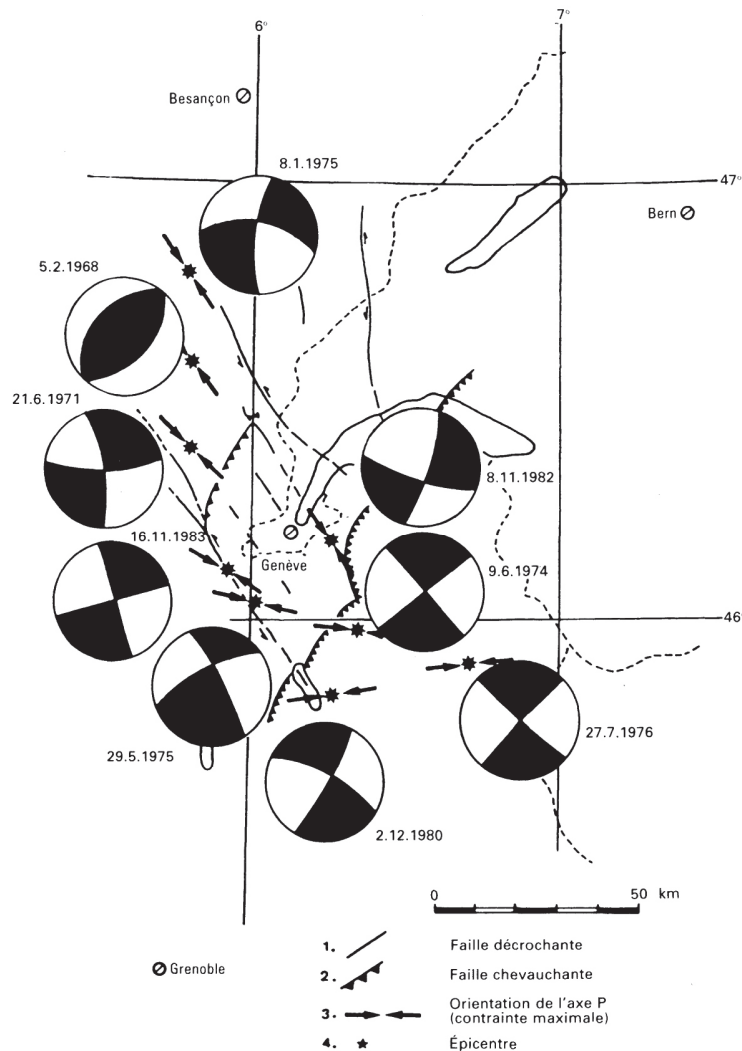


Figure 9-13. Localisation et mécanismes au foyer des séismes ressentis dans la région genevoise durant 20 ans (Donzeau et al., 1997).

9.4.3 Conditions hydrogéologiques et géothermiques

Formations aquifères

Les formations aquifères potentielles connues de Suisse occidentale (Figure 9-14) sont situées dans le Crétacé, le Malm, le Dogger, le Lias, le Trias et la Molasse. Même si la Molasse peut localement être aquifère, elle n'a pas été considérée dans cette étude du fait de sa relative faible profondeur et de l'extension limitée des niveaux potentiellement aquifères dans le Bassin genevois.

Dans le Tertiaire, citons également le cas particulier des calcaires inférieurs qui sont des calcaires d'eau douce. Charollais (2007) signale que ces calcaires ne sont pas toujours présents mais qu'ils peuvent parfois atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et qu'ils se trouvent à la base des séries molassiques. Il signale également que dans deux forages (L133 et SPM 11) il s'agissait d'un niveau de calcaires fracturés et karstifiés qui étaient aquifères et artésiens. La présence des calcaires inférieurs n'étant pas constante et leur profondeur relativement faible, cet aquifère potentiel ne sera pas considéré dans la présente étude.

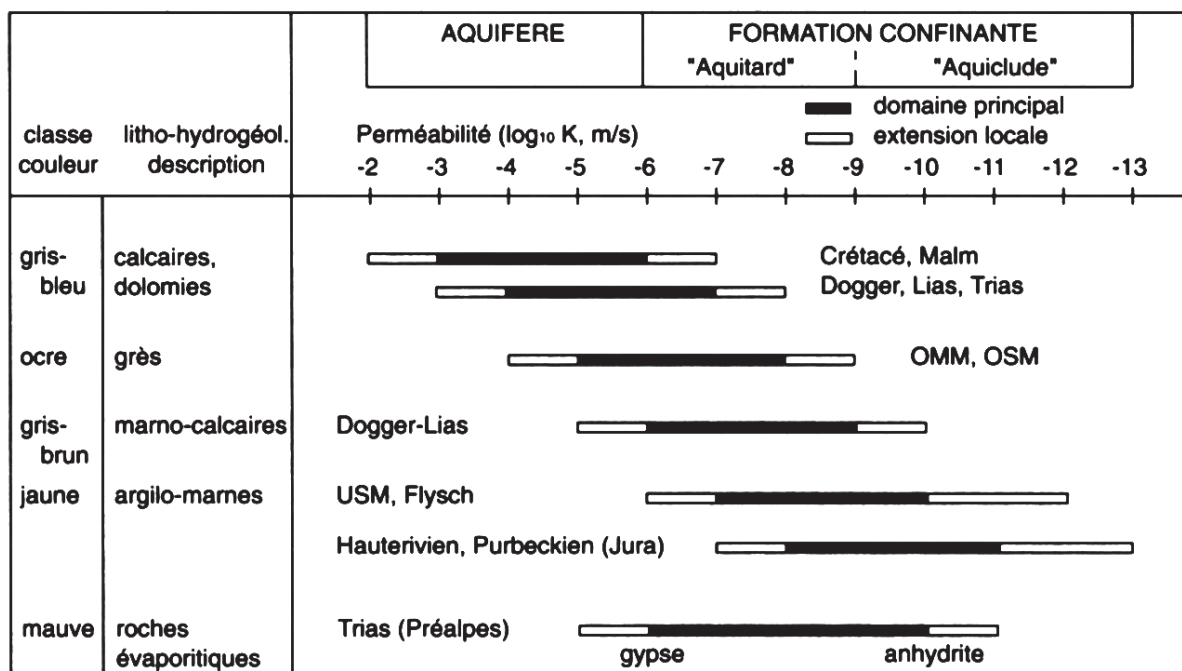


Figure 9-14. Domaines de conductivité hydraulique des horizons hôtes des principaux aquifères de Suisse occidentale (Pasquier et al., 1999).

Dans la région genevoise, les formations potentiellement aquifères sont représentées par les différents niveaux calcaires du Mésozoïque comme cela est décrit dans le tableau 9-7 pour les formations entre le Lias et le Quaternaire. Dans la plupart des cas, il s'agit d'aquifères fissuraux et/ou karstiques. Ces formations ont également été traversées par les nombreux forages profonds présents en France voisine (Figure 9-15) ce qui a également permis de vérifier leurs caractéristiques.

La formation du Permo-carbonifère, dont la présence, l'épaisseur et la lithologie sont très peu connues dans le Bassin genevois, n'a pas été prise en considération dans l'évaluation du potentiel des aquifères profonds. Cependant, les conditions tectoniques et lithologiques pourraient rendre les grabens ou demi-grabens permo-carbonifères intéressants pour la géothermie des aquifères fissuraux et/ou les systèmes géothermiques stimulés.

Tableau 9-7. Comportement hydrogéologique de l'ensemble des formations géologiques du Jura (Donzeau et al., 1997).

	Stratigraphie	Puissance	Lithologie	Observations
	Dépôts glaciaires et fluvio glaciaires (argiles à blocs, graviers, galets) en plaques sur les autres formations (puissance 0 à 40-50 m)			
	Tertiaire Turonien Cénomaniens Albien	0 à 40-50 m	Grès, marnes, calcaires, molasses en niveaux de 2 à 15 m de puissance	En lambeaux préservés par l'érosion sur le calcaire urgonien ou en cœur de synclinaux
	Sommet de l'Urgonien érodé et karstifié (émersion anté-albienne)			
	Barrémien inférieur, Hauterivien supérieur et moyen	100 à 130 m	Calcaire, dont environ 70 m de calcaires massifs du faciès urgonien (Barrémien inférieur)	
	Marnes d'Hauterive Hauterivien inférieur et Valanginien supérieur	100 m	Plusieurs niveaux de 10 à 20 m de puissance, alternativement calcaires et marneux	
	Valanginien inférieur, Berriasien, Tithonien Kimméridgien, sommet de l'Oxfordien	500 à 600 m	Calcaires	Quelques niveaux de marnes (10 à 20 m) au Valanginien inférieur et au Tithonien (marnes de Vions, Purbeckien)
	Oxfordien supérieur	170 m	Alternances de marnes et de calcaires	
	Bathonien moyen et Bajocien	250 m	Calcaires	Un niveau marneux (10 m) : Bajocien moyen
	Lias		Argiles et marnes	

 Formation perméable

 Formation peu perméable

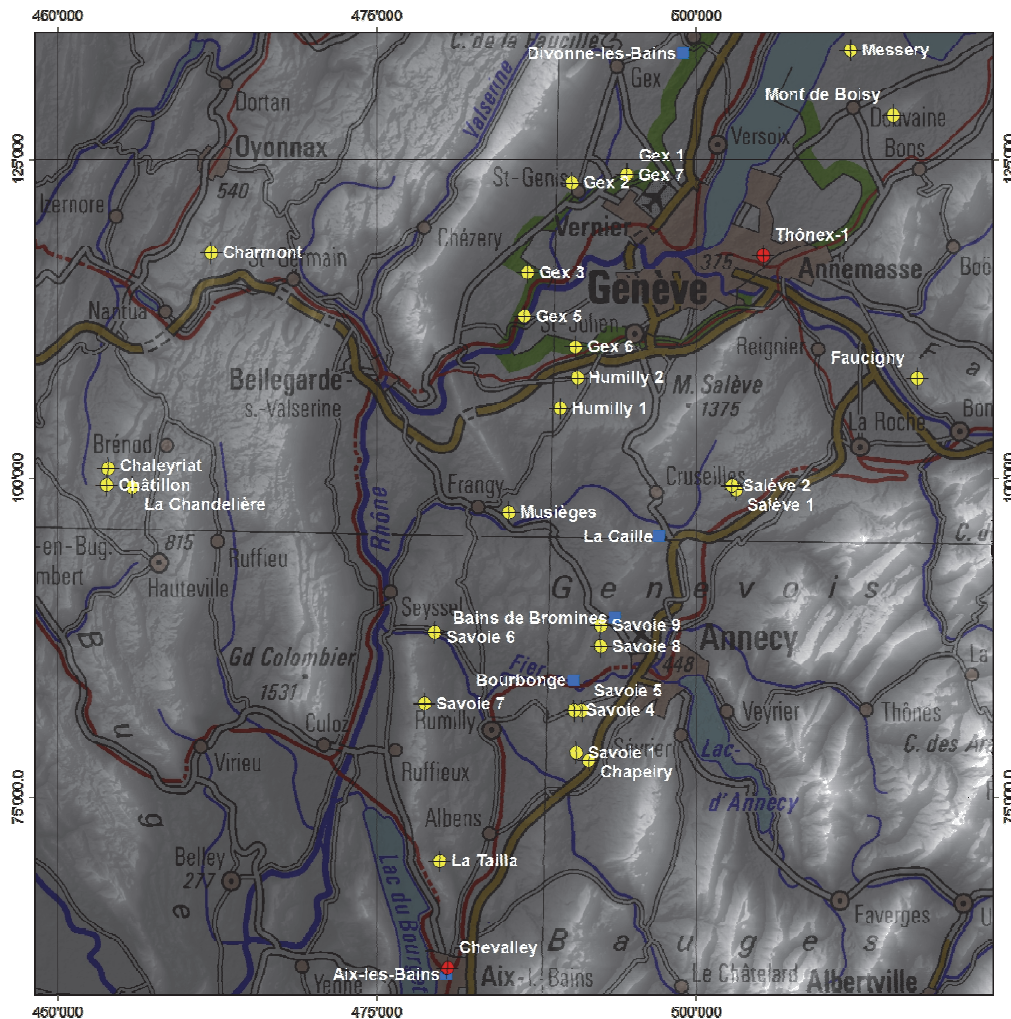


Figure 9-15. Présentation des forages pétroliers (points jaunes), des forages géothermiques (points rouges) ainsi que des sources thermales et subthermales (carrés bleus) considérés dans la présente étude.

Crétacé

Comme évoqué précédemment, le Crétacé se situe au sommet de la pile sédimentaire du Mésozoïque. Cette situation a deux conséquences importantes : le faible enfouissement de la formation induit une température trop faible pour une utilisation géothermique sans recours à une pompe à chaleur et d'autre part, les grès sidérolithiques peuvent boucher les karsts ainsi que les fissures ouvertes, rendant la formation peu perméable comme c'était le cas dans le forage de Thônex. L'ensemble de la formation peut cependant être considéré comme potentiellement aquifère, à l'exception des marnes d'Hauterive situées en son milieu.

Dans le forage d'Humilly-2, le Crétacé inférieur (Urgonien) a été rencontré à partir de 430 m de profondeur. Il était saturé en eau peu minéralisée (salinité de $1.2 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$) mais aucun test de pompage n'ayant été effectué, le débit de production reste inconnu.

Les sources subthermales de la Caille, celles de Bourbonge ainsi que celles des Bains de Bromines ont leur exutoire dans le Crétacé comme d'ailleurs un certain nombre de sources karstiques des environs. Il faut également signaler que l'aquifère du Crétacé est exploité par l'établissement thermal de Divonne-les-Bains qui extrait $25 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ d'eau à $14.4 \text{ }^\circ\text{C}$ grâce à deux forages d'un peu plus de 100 m de profondeur.

Deux sources karstiques froides sont inventoriées au nord du Salève, il s'agit de celle du Pont de Dingy qui laisse sortir une eau à $9 \text{ }^\circ\text{C}$ avec un débit compris entre 0.5 et $300 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (ordre de grandeur) et de celle de Fringles avec une eau à $6.6 \text{ }^\circ\text{C}$ et un débit compris entre 10 et $100 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (ordre de grandeur) (Charollais, 1988).

Malm supérieur

Le Malm constitue l'aquifère le plus important du Bassin en termes de volume : composé des calcaires du Portlandien, du Kimméridgien et de l'Oxfordien moyen son épaisseur dépasse 400 m. Il est compris entre les aquicludes du Purbeckien (toit) et de l'Argovien (mur). Cette formation constitue la majeure partie des crêtes de la Haute-Chaine et, de ce fait, elle bénéficie d'une excellente recharge. Elle est aussi intensément karstifiée comme les nombreux gouffres et pertes observables dans tout le Jura l'attestent. Citons un exemple extrême : au nord de Seyssel, le réseau karstique est recoupé par les galeries d'exploitation de la mine d'Orbagnoux où une seule venue d'eau débite entre 70 et 1'750 l·s⁻¹. Des essais de traçage ont montré que cette eau s'infiltré à proximité d'accidents décrochants qui lui ont permis de traverser l'aquiclude de l'Oxfordien ainsi que deux anticlinaux.

Le forage d'exploration géothermique THX-1 à Thônex dans le canton de Genève a été réalisé en 1993. Il a été dévié à partir de la profondeur de 700 m avec un angle de 25° et a atteint la profondeur verticale de 2530 m, pour une longueur forée de 2690 m. Le forage THX-1 a traversé la Molasse tertiaire, les unités du Crétacé et du Jurassique supérieur (Jenny et al., 1995).

Les deux cibles géothermiques visées étaient les calcaires urgoniens du Crétacé inférieur et les calcaires récifaux du Jurassique supérieur. Pour obtenir des débits de production économiquement intéressants, il fallait rencontrer des formations karstiques et/ou fracturées. Malheureusement, après l'acidification de la première cible (Crétacé), la productivité du puits est restée très faible et le forage a repris. Dans les formations de la deuxième cible (Jurassique), trois niveaux dans le Malm ont été détectés en cours de forage et par les diagraphies, mais les résultats des tests de production successifs réalisés après des stimulations massives à l'acide HCl se sont montrés décevants avec un débit de production par air-lift de 3 l·s⁻¹ à la température de 39 °C. Le fluide produit par la formation du Malm est de type chloruré sodique (Na-Cl) mais montre une minéralisation relativement faible (IDS 1.5 g·l⁻¹), alors que son temps de résidence souterrain est élevé ($\geq 10'000$ ans) (Vuataz & Giroud, 2010).

Dans le forage d'Humilly-2, l'aquifère du Malm supérieur a été rencontré dès 846 m de profondeur. Un test de production a été effectué sur le Kimméridgien à 1'137 m de profondeur, mais il n'a livré qu'un débit très faible (< 1 l·s⁻¹) d'eau peu minéralisée (< 1 g·l⁻¹) à la température de 38 °C.

Régionalement, le Malm est une ressource géothermique : dans la zone d'Aix-les-Bains, l'aquifère du Malm est en effet un exutoire naturel connu depuis longtemps ainsi que, dans une moindre mesure, celui du Crétacé grâce à une faille. Ces aquifères sont actuellement exploités par deux forages profonds : Reine-Hortense d'une profondeur de 1'104 m où le fluide est pompé avec un débit compris entre 16 et 22 l·s⁻¹ à la température de 39 °C, ainsi que le forage Chevalley (Figure 9-15 pour la localisation) d'une profondeur de 2'166 m, où le fluide est pompé avec un débit compris entre 14 et 20 l·s⁻¹ à la température de 72 °C (Muralt, 1999).

Dogger

Moins connu que le Malm en région genevoise, le Dogger peut fournir un aquifère géothermique potentiel intéressant en raison de son enfouissement plus profond. L'épaisseur totale de cet aquifère mesure environ 300 m. Il est compris entre les aquicludes de l'Argovien (toit) et de l'Aalénien (mur).

Sa composition plus marneuse le rend moins sensible à la karstification et plus ductile (pâteux) ce qui a pour conséquence que les fractures ouvertes devraient être moins nombreuses que dans le Malm.

L'aquifère du Dogger dans le forage d'Humilly-2 est situé entre 1'855 et 2'088 m de profondeur, mais aucun test de production n'a été effectué à ce niveau. Cette formation aquifère est bien connue dans le Jura, où elle est utilisée pour les besoins en eau potable. Par exemple, la source de Quarts située à l'ouest de Bellegarde sort des calcaires bathoniens avec un débit d'étiage de 0.3 l·s⁻¹. Dans la région de l'étude, le Dogger affleure peu, mais il devrait malgré tout bénéficier d'une bonne recharge car les accidents décrochants sont nombreux dans la région, ce qui permettrait aux fluides de traverser les aquicludes.

Un certain nombre de forages pétroliers (Figure 9-15) ont recoupé le Dogger. Aux forages de Chaleyriat et de Châtillon, la majorité de la boue de forage a été perdue ce qui laisse présager d'une forte perméabilité.

Dans les forages Savoie 106 (1953) et Savoie 107 (1954), cette formation a été testée à plusieurs reprises pendant un cours laps de temps : elle a produit entre 0.1 et 0.5 l·s⁻¹ d'une eau relativement minéralisée (9 à 40 g·l⁻¹ d'équivalents NaCl).

Lias inférieur

Bien que la série carbonatée du Lias soit beaucoup plus importante dans le forage d'Humilly-2 que dans le Jura, il est peu vraisemblable que cette formation soit un aquifère intéressant d'un point de vue géothermique. En effet, même si sa position dans la pile stratigraphique fait qu'elle atteint des températures intéressantes, les calcaires qui la composent sont relativement argileux et, de ce fait la karstification et la fissuration doivent être très limitées.

Muschelkalk

Le Muschelkalk n'affleure pas dans la région. Il est bien connu dans l'est du Jura et a été rencontré dans le forage d'Humilly-2. Le Muschelkalk supérieur y mesure 130 m d'épaisseur et se situe à près de 3'000 m de profondeur. La formation est saturée en eau à plus de 100 °C, mais le test de production effectué a montré une faible perméabilité. Le Muschelkalk se compose de dolomies, de grès et d'argiles : il est limité à son sommet par des couches évaporitiques, ce qui explique que les fluides rencontrés sont généralement fortement minéralisés. A sa base se trouvent les grès du Buntsandstein qui montrent un bon indice de fracturation dans le forage d'Humilly-2. Dans cette étude, les formations du Muschelkalk, de la Lettenkohle et du Buntsandstein sont réunies sous l'appellation de Muschelkalk.

Le Muschelkalk supérieur a été rencontré dans les forages de Riehen (BS), Reinach (BL) et Schinznach Bad (AG) (localisation sur la figure 9-8). A Riehen, le débit de production atteint les 20 l·s⁻¹ et est utilisé pour un réseau de chauffage urbain (température de 65 °C et salinité de 18 g·l⁻¹). Un débit de production de 8.3 l·s⁻¹ à Schinznach Bad permet d'alimenter le centre thermal et d'en chauffer les bâtiments (44 °C et 2.2 g·l⁻¹). A Reinach par contre le débit de 0.1 l·s⁻¹ n'a permis aucune exploitation (72 °C et 46 g·l⁻¹).

Il faut encore signaler que le Buntsandstein a été reconnu comme une formation aquifère fortement fissurée dans trois forages pétroliers (Chaleyriat, La Chandelière et Charmont) avec un débit pouvant atteindre 2 l·s⁻¹.

Conditions géothermiques

Puissance théorique des installations

La puissance thermique théorique maximale d'un forage géothermique peut être calculée en suivant les recommandations de l'OFEN (1992), au moyen de la formule de Gringarten (1978) :

$$Q_{\text{géo}} = \rho C_p \cdot D \cdot \Delta T \text{ en } W_{\text{th}}$$

avec :

- ρ la masse volumique du fluide en kg·m⁻³
- C_p la chaleur spécifique en J·kg⁻¹·°C⁻¹
- D le débit en m³·s⁻¹
- ΔT la différence entre la température de production et celle de réinjection en °C

Le fluide géothermique étant de l'eau, ρC_p vaut donc $4.186 \cdot 10^6$. En utilisant l'unité de débit $l \cdot s^{-1}$, pour obtenir une puissance théorique en MW_{th} , ce nombre doit être multiplié par 10^{-9} , ce qui donne la formule la suivante :

$$Q_{géo} = 4.186 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot \Delta T \text{ en } MW_{th}$$

La puissance théorique dépend donc uniquement du débit et du différentiel de température et donc, si l'une de ces deux variables est fixe, la puissance théorique est proportionnelle à la deuxième.

Température

Comme cela est mentionné ci-dessus, la puissance d'une installation géothermique dépend principalement de deux facteurs : le débit et la différence entre la température du fluide produit et celle du fluide réinjecté. Cette différence va dépendre de plusieurs facteurs, parmi lesquels la température de la ressource et le mode d'utilisation du fluide ont évidemment une influence prépondérante.

La température de la ressource dépend principalement de la profondeur de la roche réservoir et de la vitesse du fluide dans l'aquifère comme dans le forage. En effet, la roche va chauffer le fluide jusqu'à l'équilibre thermique. Dans le cas de roches fortement karstifiées, les vitesses d'écoulement ne permettent pas cet équilibre et la température de la ressource sera donc inférieure à celle du massif régional. Les forages effectués dans la région de l'arc jurassien et du plateau suisse montrent qu'en règle générale, lorsque les débits sont élevés (phénomènes karstiques), la température de la ressource est sensiblement plus basse que celle attendue pour une profondeur donnée (Tableau 9-8 et Figure 9-16).

Tableau 9-8. Caractéristiques d'une sélection de forages dans la région de l'arc jurassien (Suisse et France). Données BDFGeotherm (www.crege.ch) sauf forage de Bevaix et Aix-les Bains (Muralt, 1999).

Nom	Canton / Pays	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Profondeur (m)	Aquifère
Aix-les-Bains Source Alun R.-Hortense Chevalley	Savoie, France	40 – 44 39 72	25 16 – 22 14 – 20	5 1104 2166	Malm
Bevaix	NE	9 – 15	75	300	Malm
Courtemaîche	JU	25	7.9	257	Malm
Delémont S1 S2 S3	JU	22	28 15 28	356 352 352	Malm
Hermrigen F1	BE	50	2.8	1300	Dogger
Itingen	BL	22	4.8	246	Muschelkalk
Moiry	VD	18	6	370	Malm
Muriaux FM1 FM2	JU	13	12 5	498 500	Dogger
Reinach	BS	80	0.1	1793	Muschelkalk
Riehen	BS	65	20	1247	Muschelkalk
Schinznach Bad S2 S3A1 S3A2	AG	50 55 65	6.8 8.3 0.75	692 744 944	Muschelkalk
Sonvillier SON1 SON2	JU	20 15	22.5 18.3	445 330	Malm
St-Aubin SA1 SA2 SA3	NE	11 13 12	31 20 20	313 380 315	Malm
Tavannes	BE	14	27.5	315	Malm
Thônex THX-1	GE	70	3.1	1998	Malm
Yverdon-les-Bains La Grève F4 F5 (200) F5 (400) F5 (784) F5 (1117)	VD	30 – 35 35 – 40 25 30 – 35 40 – 45 40 – 60	15.3 28 83 42 1.8 2.5	682 455 200 400 784 1117	Malm Dogger

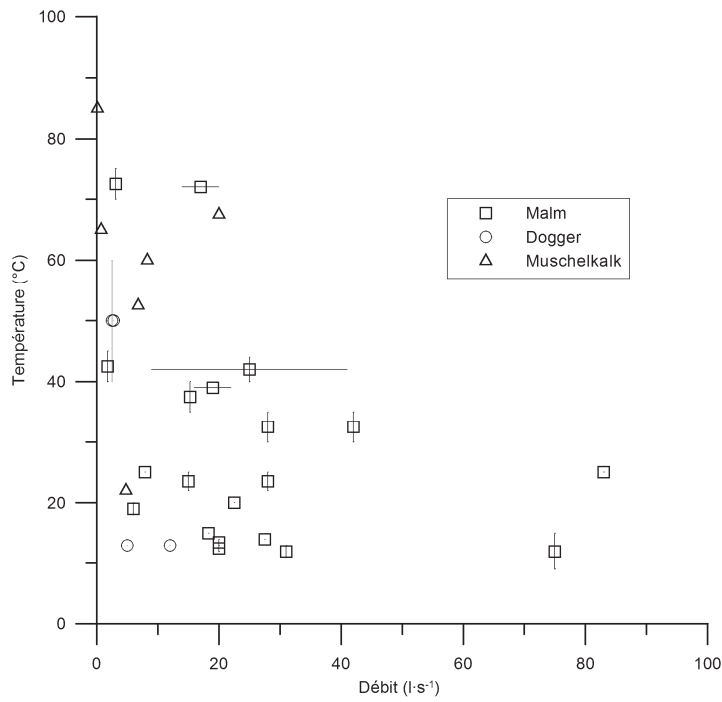


Figure 9-16. Relation entre la température et le débit dans différents forages de la région de l’arc jurassien. Les données utilisées proviennent du Tableau 9-8.

Dans cette étude du potentiel des APR et en l’absence de données suffisantes, seuls la profondeur et un gradient géothermique moyen de 32 °C/km ont été pris en compte pour estimer la température de la ressource dans le canton de Genève. La valeur du gradient géothermique a été déterminée grâce aux forages régionaux pour lesquels des informations de température étaient disponibles (Figure 9-17).

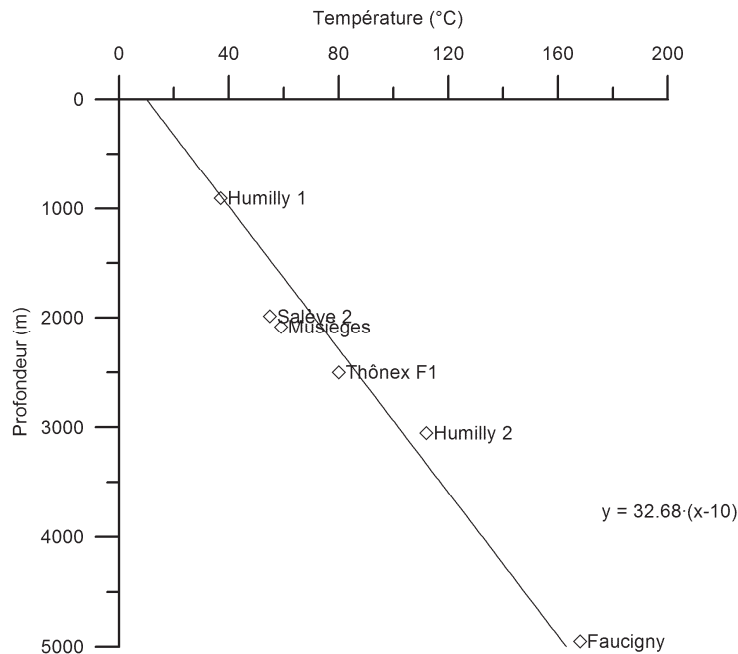


Figure 9-17. Détermination du gradient géothermique régional à l’aide des données de température disponibles dans une sélection de forages. Le gradient a été calculé avec une corrélation linéaire des données et une température annuelle moyenne en surface de 10 °C (données PGV, 2003).

Débit

Les débits attendus dépendent du faciès de la roche réservoir. Dans les cas qui nous intéressent ici, plus la composante marneuse (impermeable) est importante, plus les débits seront faibles. Pour l'estimation des débits, il faut également tenir compte de la profondeur. En effet, il a été constaté qu'en général, plus un forage est profond, moins les débits sont importants, en raison d'une diminution de la karstification dans les calcaires et de la plus faible densité des fractures ouvertes (Figure 9-18).

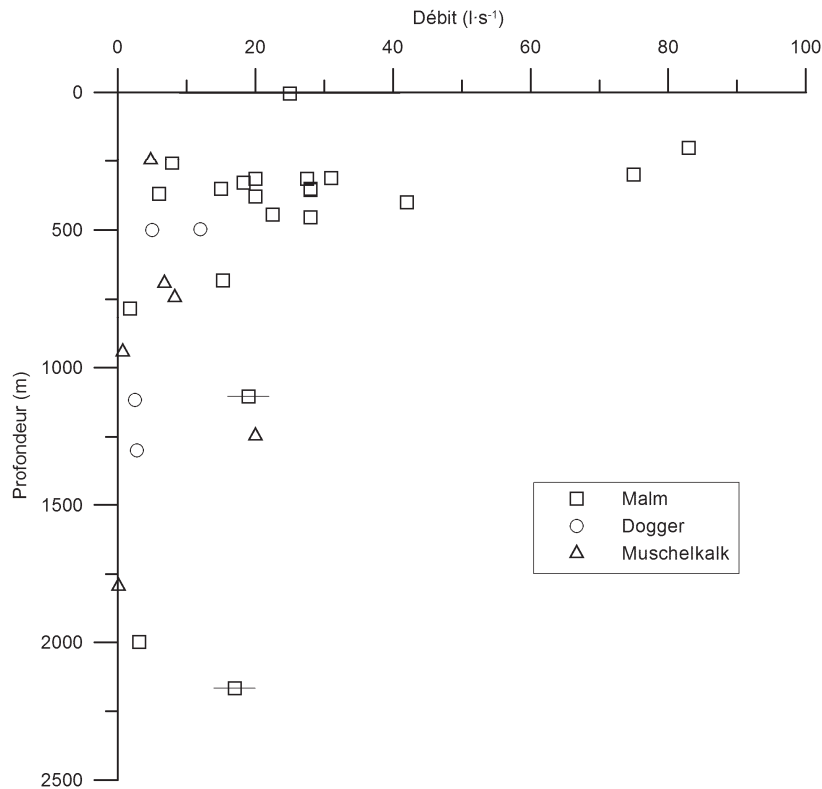


Figure 9-18. Variation du débit en fonction de la profondeur pour les différents forages de l'arc jurassien (données du Tableau 9-8).

Un autre facteur important pour la détermination des débits est l'état de fracturation de la roche. En effet, une roche dure (par ex. calcaire) fortement tectonisée aura une perméabilité nettement plus importante et par conséquent, les débits seront vraisemblablement plus élevés. Les domaines de débit pour chaque aquifère potentiel ont été choisis selon plusieurs critères semi-quantitatifs tels que les faciès sédimentologiques, l'état de fissuration et de karstification, ainsi que les données de débit des forages de l'Arc jurassien. Ces débits sont présentés dans le tableau 9-9.

Tableau 9-9. Débits attendus dans les différents aquifères profonds du canton de Genève.

Débit (l·s ⁻¹)	Crétacé	Malm	Dogger	Muschelkalk
Roche massive	10 – 15	15 – 20	10 – 15	10 – 15
Roche tectonisée	15 – 30	20 – 40	15 – 30	15 – 20

On distingue deux modes d'utilisation thermique du fluide : l'usage direct ou l'usage indirect au moyen d'une pompe à chaleur. Pour l'utilisation directe, la chaleur du fluide est uniquement transférée par un échangeur de chaleur au fluide de chauffage, dont l'énergie sera, si possible, utilisée en cascade jusqu'à une température de l'ordre de 20 °C.

Avec une pompe à chaleur, la température du fluide sera élevée par cette dernière avant de servir dans l'installation de chauffage. Cette technique a l'avantage de permettre l'usage de fluides géothermiques dont la température est trop basse pour un usage direct, mais évidemment elle a un coût énergétique plus élevé. Par contre, l'utilisation d'une pompe à chaleur permet d'abaisser la température du fluide géothermique à 10 °C environ, ce qui représente un gain par rapport à l'usage thermique direct des fluides.

9.5 Résultats

9.5.1 Structures géologiques profondes du Bassin genevois

Les structures du Bassin genevois ont été établies principalement grâce à deux types de données : les données géologiques et les données géophysiques. Pour les données géologiques, il s'agit principalement d'articles, de thèses et de cartes géologiques suisses et françaises. Ces données ont permis de déterminer les différentes lithologies, leur comportement en profondeur ainsi que leur structure, là où les coupes sont proches d'affleurements.

Les données du deuxième type sont les données géophysiques : il s'agit essentiellement de données sismiques issues d'une thèse de doctorat en cours (S. Paolacci, communic. orale ; G. Gorin, communic. écrite), ainsi que des lignes sismiques établies lors des campagnes de 1987 et 1990 et interprétée par G. Gorin (Gorin, 1989, 1992 ; Gorin et al., 1993 ; Signer & Gorin 1995). En ce qui concerne les données de ce travail de thèse, il s'agit de cinq horizons sismiques fournis sous forme de cartes à l'échelle du Bassin sur lesquelles la profondeur est exprimée en temps, ainsi que des cartes des vitesses dans les différentes couches.

La première étape a consisté à digitaliser ces cartes, ce qui a induit un lissage des structures. En effet, l'établissement d'une carte passe par l'interpolation de différentes données dont les dissemblances vont être réduites grâce à plusieurs méthodes mathématiques. Par conséquent la réalisation d'une carte en digitalisant une autre carte fait passer les données de base deux fois par cette interpolation et provoque donc un lissage plus important des structures.

Les cinq horizons sismiques sont :

- La base du Tertiaire.
- Le sommet Dogger.
- La base du Dogger.
- Le sommet du Muschelkalk.
- Un horizon considéré comme la limite entre le Permo-Carbonifère et le socle cristallin.

Il a alors fallu convertir le temps en profondeur à l'aide des cartes de vitesse. Le principe est relativement simple : si la vitesse d'une onde dans une formation ainsi que son temps de parcours sont connus, il est possible d'obtenir la profondeur. En réalité, les couches géologiques n'étant pas homogènes, le résultat est moins précis. De plus, la densité de données est relativement faible, et par conséquent, les profondeurs présentées doivent être utilisées avec précaution. Quant aux puissances géothermiques, elles seront considérées comme des ordres de grandeur et des tendances plus que comme des valeurs réelles. Il est également évident que cette incertitude augmente avec la profondeur.

Etant donné qu'une seule vitesse moyenne est utilisée pour l'ensemble des couches entre deux horizons, il n'est pas possible dans le cadre de cette étude de traiter correctement l'épaississement local des évaporites du Trias. Par conséquent, la profondeur du Muschelkalk et des couches plus profondes est, selon toute vraisemblance, exagérée.

Coupes géologiques

L'ensemble de ces données ont permis de réaliser cinq coupes géologiques à travers le Bassin genevois (Figure 9-19 et en annexe), quatre transversales (coupe 1 à 4) et une longitudinale (coupe 5). Les données sismiques n'ont été utilisées que pour la partie des coupes se trouvant dans le Bassin genevois (Figure 9-19, partie contenue à l'intérieur de la ligne discontinue grise).



Figure 9-19. Implantation des coupes géologiques (traits orange). Le fond de carte représente la carte géologique et les couleurs des formations correspondent à celles de la figure 9-11. Les lignes rouges représentent les failles répertoriées et les lignes bleues les principaux chevauchements (d'après cartes BRGM 628, 629, 653, 654, 677 et 678). La ligne discontinue grise donne les limites de la partie « Bassin sédimentaire » à l'intérieur de laquelle les données sismiques ont été utilisées. Traits violets : lignes sismiques. Points jaunes : forages pétroliers. Point rouge : forage de Thônex.

Sur les figure 9-20 et figure 9-21 ainsi que dans les annexes, les isothermes en lignes discontinues permettent d'approcher la température des formations potentiellement aquifères. Ces isothermes ont été calculés en utilisant le gradient de 32 °C/km calculé précédemment (Figure 9-17) mais ils n'ont été appliqués que dans la partie « Bassin sédimentaire » de la région afin de tenir compte de l'effet du karst. En effet, la vitesse d'écoulement dans les massifs karstiques pouvant être très élevée, cela induit généralement un drainage du flux géothermique. De plus, avec des vitesses de circulation élevées, les fluides profonds peuvent être plus froids que la roche encaissante, car ils n'ont pas eu le temps de se réchauffer.

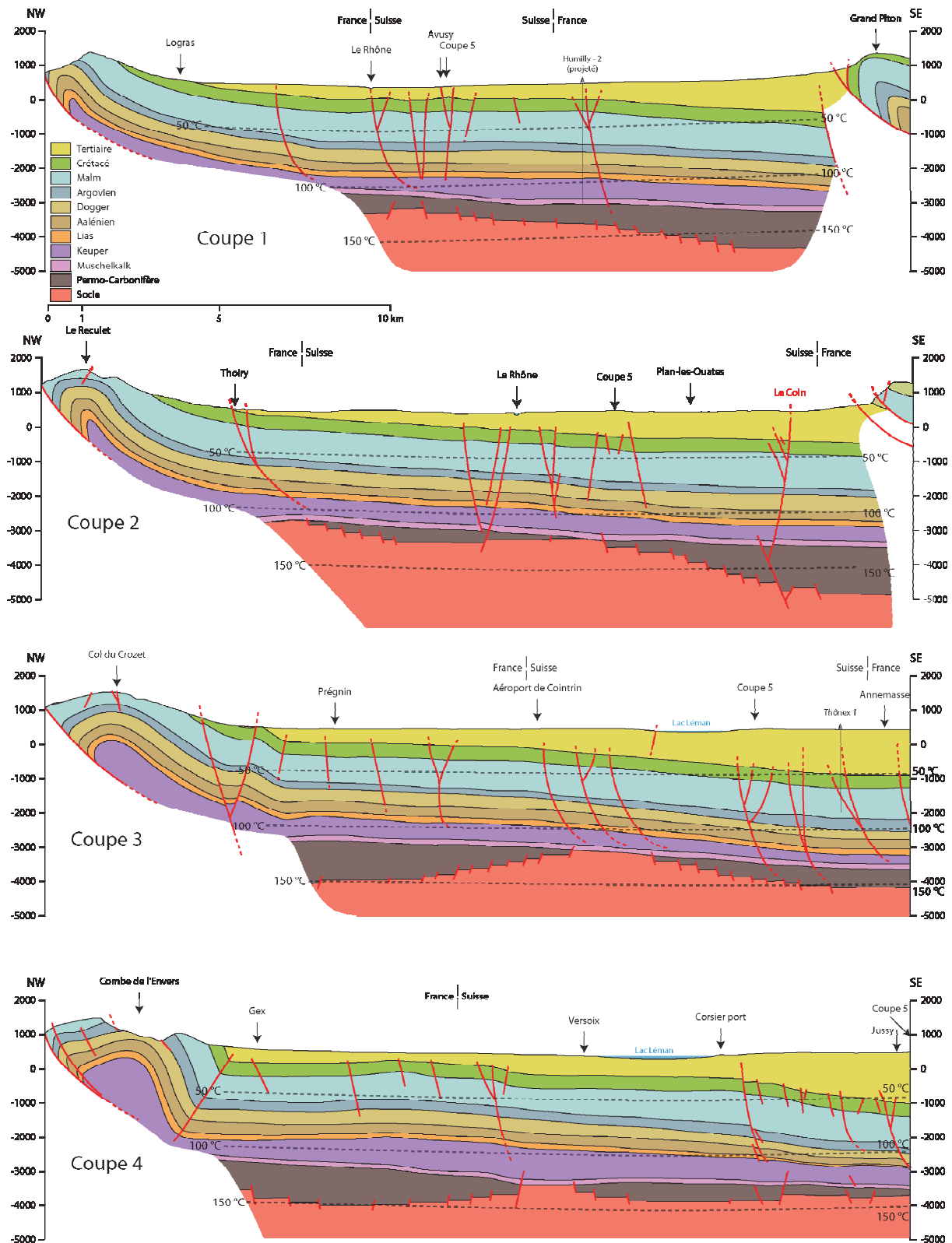


Figure 9-20. Coupes géologiques n° 1 à 4 transversales aux structures du Bassin genevois. Ces coupes sont reproduites à plus grande échelle dans l'Annexe (volume 2 – chap 9). Coupe n°2 d'après Burri (1981), Amberger (1982), Signer & Gorin (1995), Charollais (2007), Meyer (2000) modifié. L'axe vertical est une altitude en m/mer.

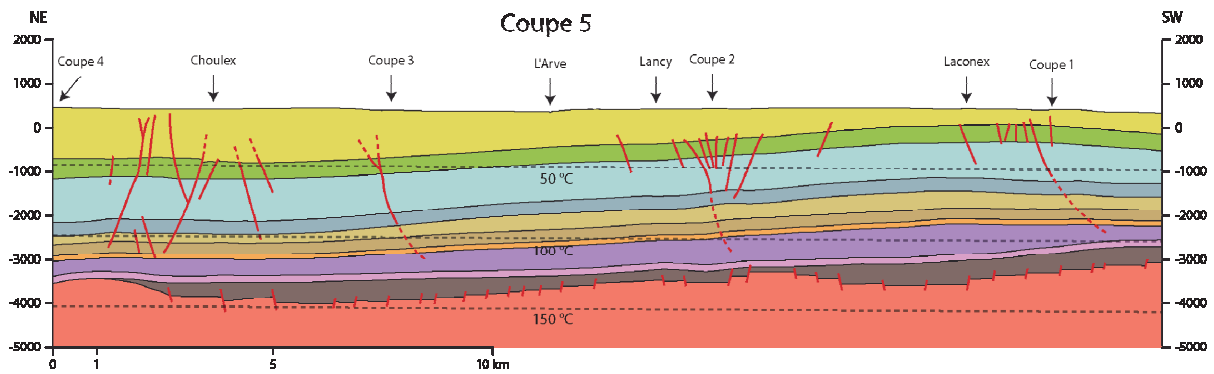


Figure 9-21. Coupe géologique n° 5 longitudinale aux structures du Bassin genevois. Cette coupe est reproduite à plus grande échelle en annexe (volume 2 – chap. 9). L'axe vertical est une altitude en m/mer.

La structure générale est celle d'une rampe sur laquelle s'est formé un anticlinal, la Haute-Chaîne du Jura. Au pied de cette dernière, les couches géologiques vont plonger sous la Molasse avec un pendage faible. La profondeur des couches et, par conséquent, leur température vont donc augmenter en direction du sud-est.

Autres résultats

En plus des résultats directement liés à la présente étude, les données sismiques ont permis d'établir une carte des zones où il y a, selon toute vraisemblance, un épaissement du Trias (Figure 9-22).

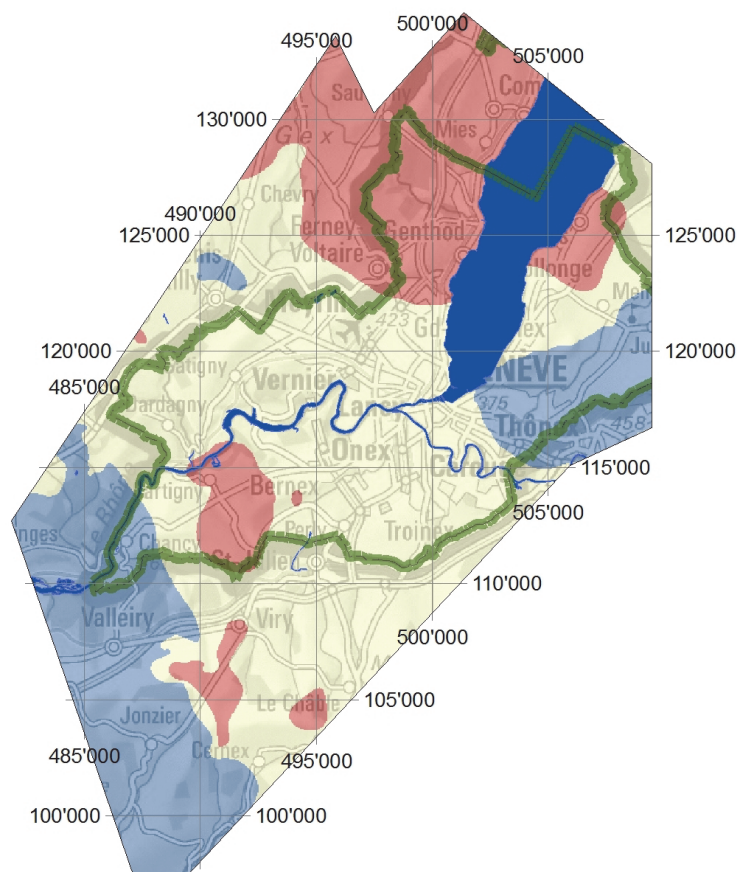


Figure 9-22. Variation d'épaisseur du Keuper. En raison de l'incertitude liée à la méthode de conversion du temps en profondeur, la carte est présentée sans valeurs quantitatives d'épaissement et à titre indicatif. Légende : épaissement marqué (en rouge), épaissement probable mais peu marqué (en beige) et épaisseur standard (en bleu).

Ces mêmes données nous ont également permis d'établir une carte sur laquelle sont représentés les demi-grabens permo-carbonifères supposés (Figure 9-23). Il est aisé de reconnaître ces structures typiques sur les coupes transversales (Figure 9-20 et Annexes - volume 2 – chap. 9).

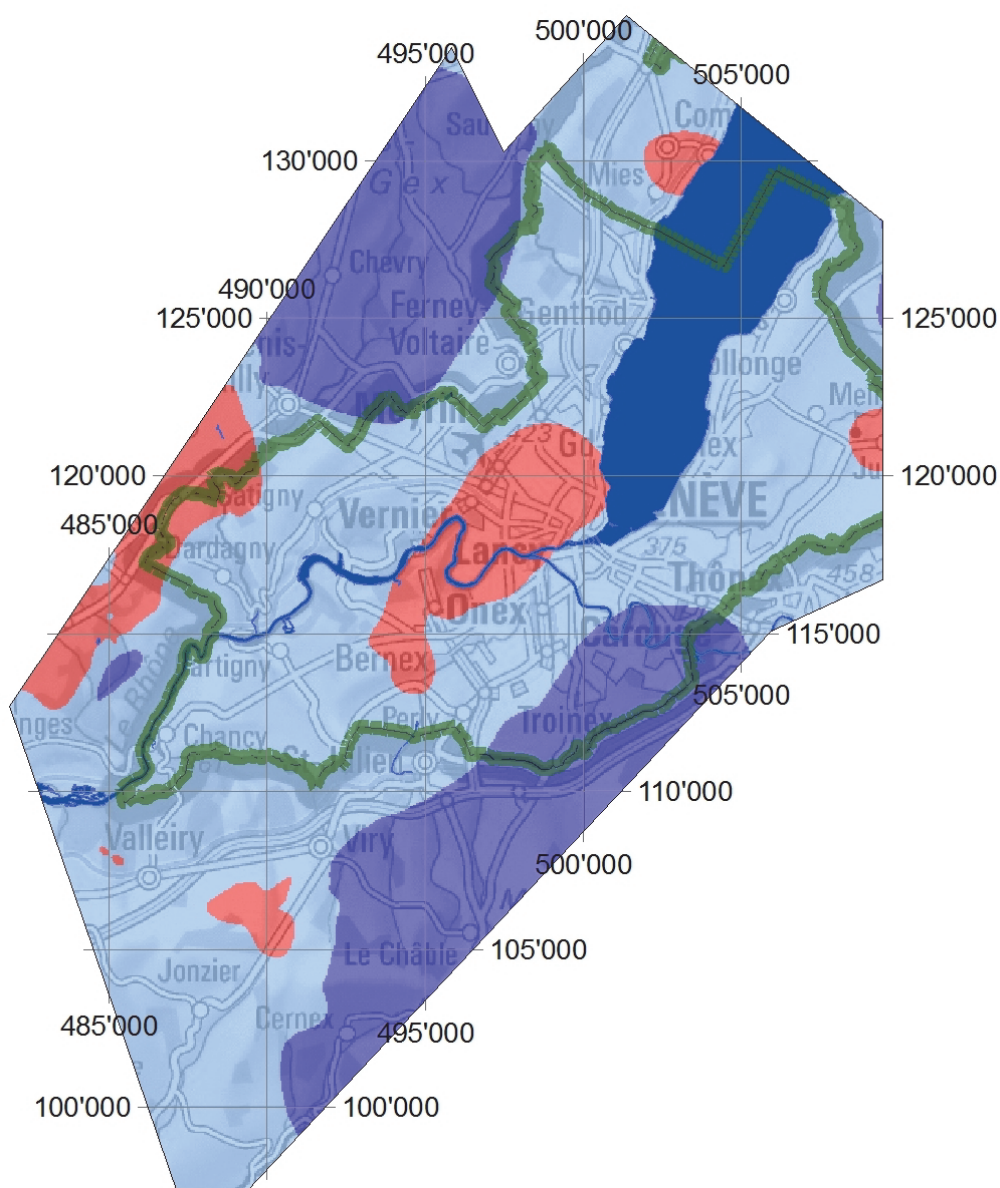


Figure 9-23. Cartographie des demi-grabens permo-carbonifères du Bassin genevois. En raison de l'incertitude liée à la méthode de conversion du temps en profondeur, la carte est présentée sans valeurs quantitatives de profondeur et à titre indicatif. Légende : zone sans graben permo-carbonifère, c'est-à-dire des horsts (en rouge), graben permo-carbonifère (en bleu foncé) et zone d'approfondissement des grabens (en bleu clair).

9.5.2 Potentiel géothermique des aquifères profonds

Afin de pouvoir comparer les potentiels géothermiques obtenus entre les aquifères, les mêmes critères ont été appliqués pour tous les aquifères potentiels. Le premier critère est celui de la température de réinjection : elle a été fixée à 30 °C, ce qui correspondrait à une utilisation optimale en cascade de la ressource géothermique sans pompe à chaleur.

Ce premier critère nécessite le choix de la température minimum dans l'aquifère. Nous avons en effet considéré qu'en dessous d'une différence de 10 °C entre la température du fluide pompé et celle du fluide réinjecté, aucune installation ne pourrait être envisagée. A nouveau ce critère exclut le recours aux pompes à chaleur qui permettent d'abaisser davantage la température du fluide. Le potentiel a été calculé au milieu de la hauteur de l'aquifère à l'exception de celui du Malm, où, il a été calculé à son sommet et à sa base en raison de sa très forte épaisseur.

Comme cela a été évoqué précédemment, les zones de failles favorisent certainement les écoulements des fluides et il en est tenu compte dans le calcul du potentiel. Dans ce but, des zones de failles ont été déterminées dans lesquelles un forage peut atteindre des cibles intensément fracturées et donc bénéficier d'un débit plus important (Figure 9-24).

Le potentiel exprimé sur les différentes cartes représente par conséquent une puissance moyenne potentielle pour un doublet dans l'aquifère concerné. Cette puissance pouvant varier fortement, des tableaux donnant des valeurs moyennes pour chaque aquifère sont présentés ci-dessous (Tableau 9-10 à tableau 9-13).

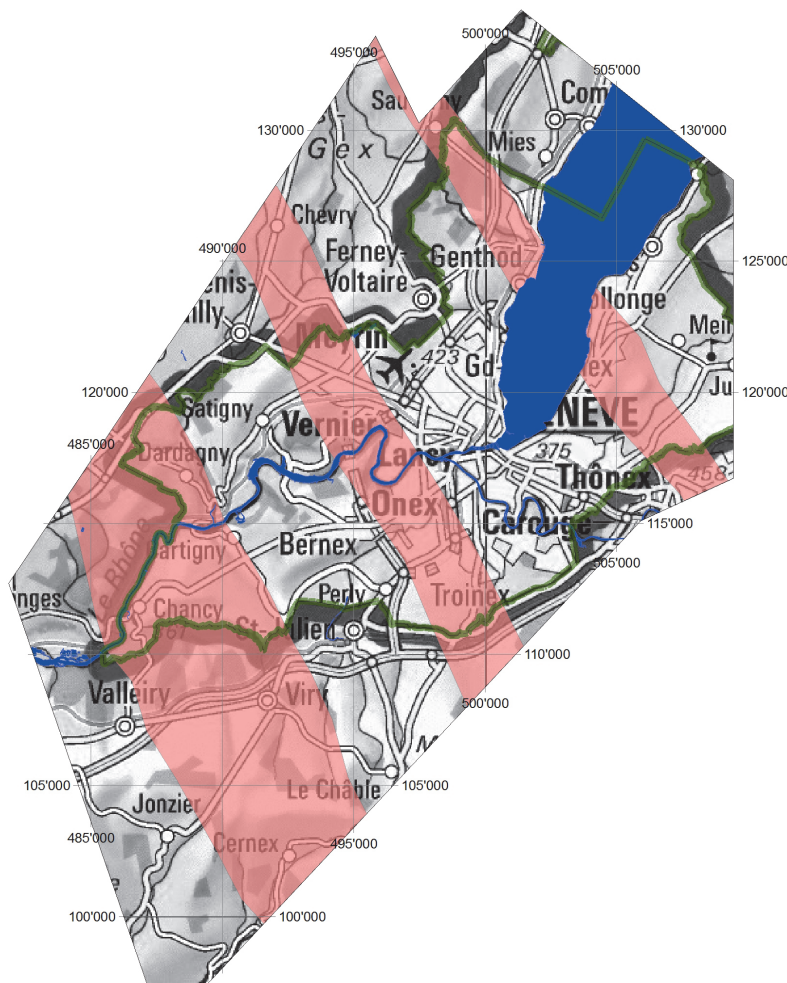


Figure 9-24. Localisation des zones de failles dans lesquelles un forage peut atteindre des cibles intensément fracturées.

Crétacé

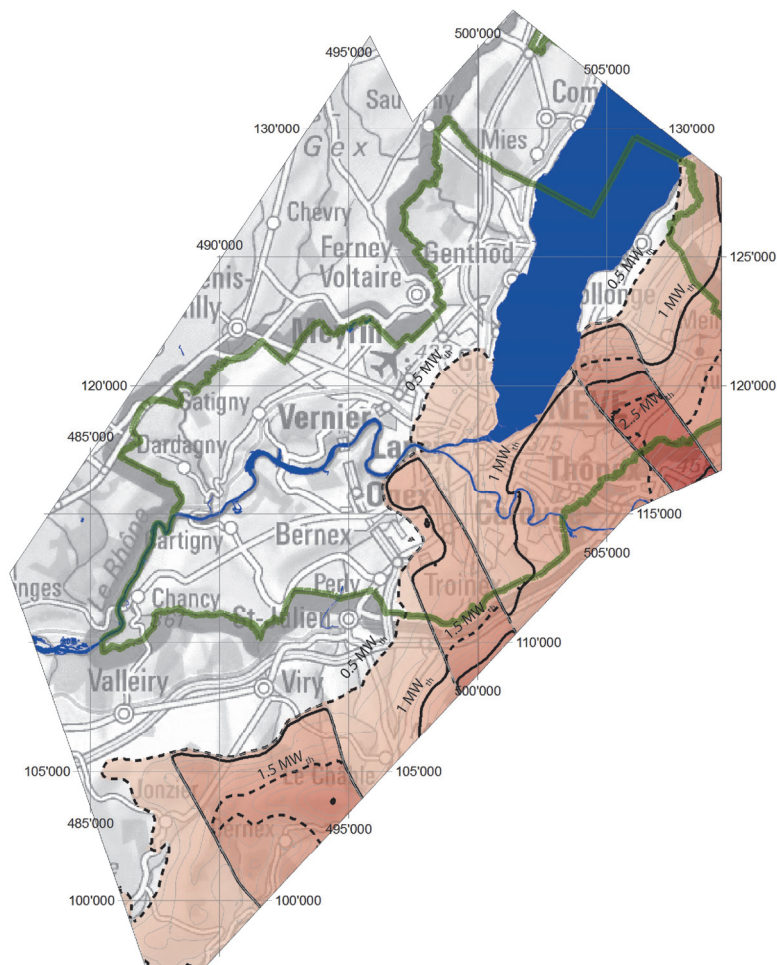


Figure 9-25. Puissance théorique pour un doublet dans le Crétacé. Les températures en dessous de 40 °C n'ont pas été considérées.

Tableau 9-10. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Crétacé en fonction du débit et de la température. La température de 40 °C est la valeur minimale considérée. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
Roche massive	15 (40) - 63	10 – 15	0.4 – 2.1
Roche tectonisée		15 – 30	0.6 – 4.1

Malm

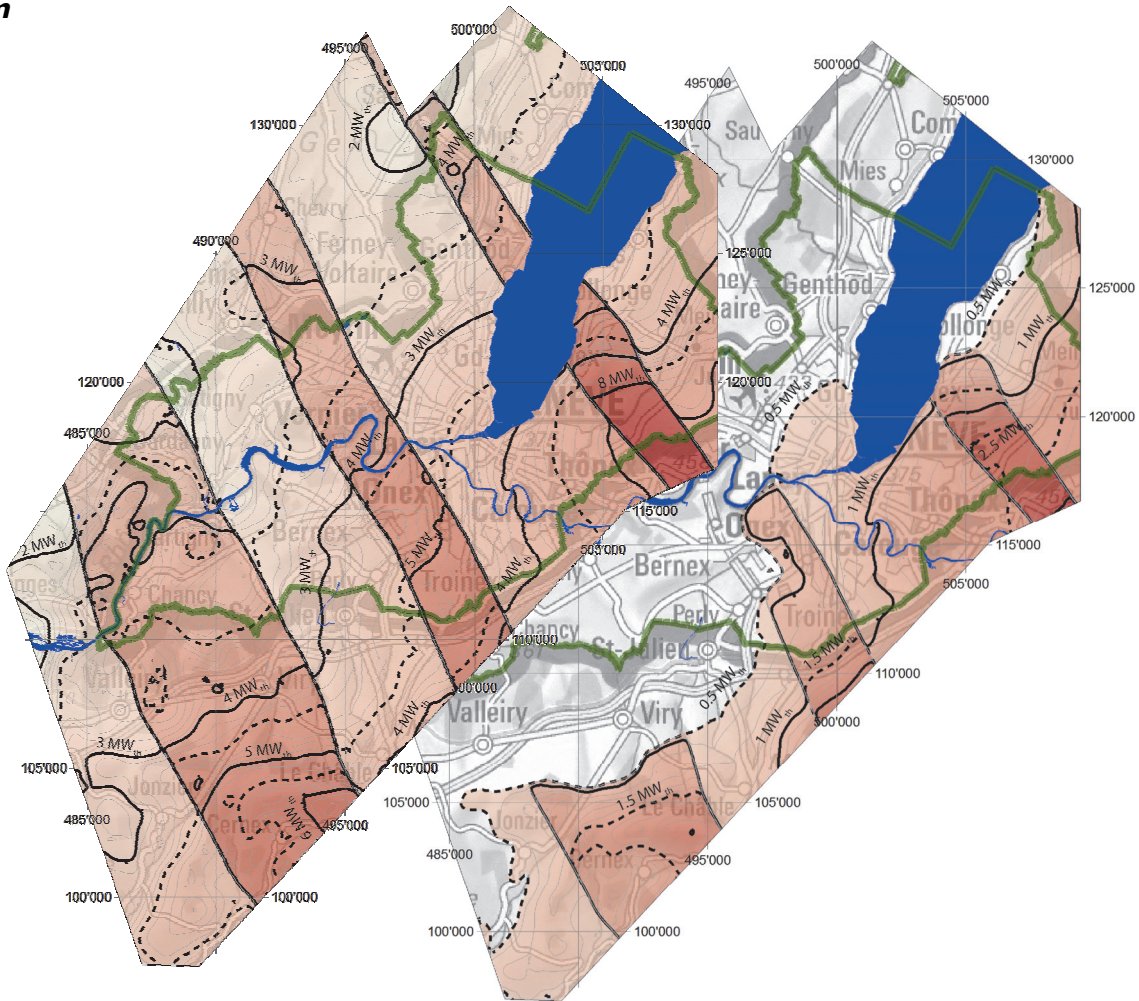


Figure 9-26. Puissance théorique pour un doublet au sommet de l'aquifère du Malm (à droite) et à sa base (à gauche). Les températures en dessous de 40 °C n'ont pas été considérées.

Tableau 9-11. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Malm en fonction du débit et de la température. La température de 40 °C est la valeur minimale considérée. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

		Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
sommet	Roche massive	20 (40) – 69	15 – 20	0.6 – 3.3
	Roche tectonisée			
base	Roche massive	49 – 102	15 – 20	1.2 – 6
	Roche tectonisée			

Dogger

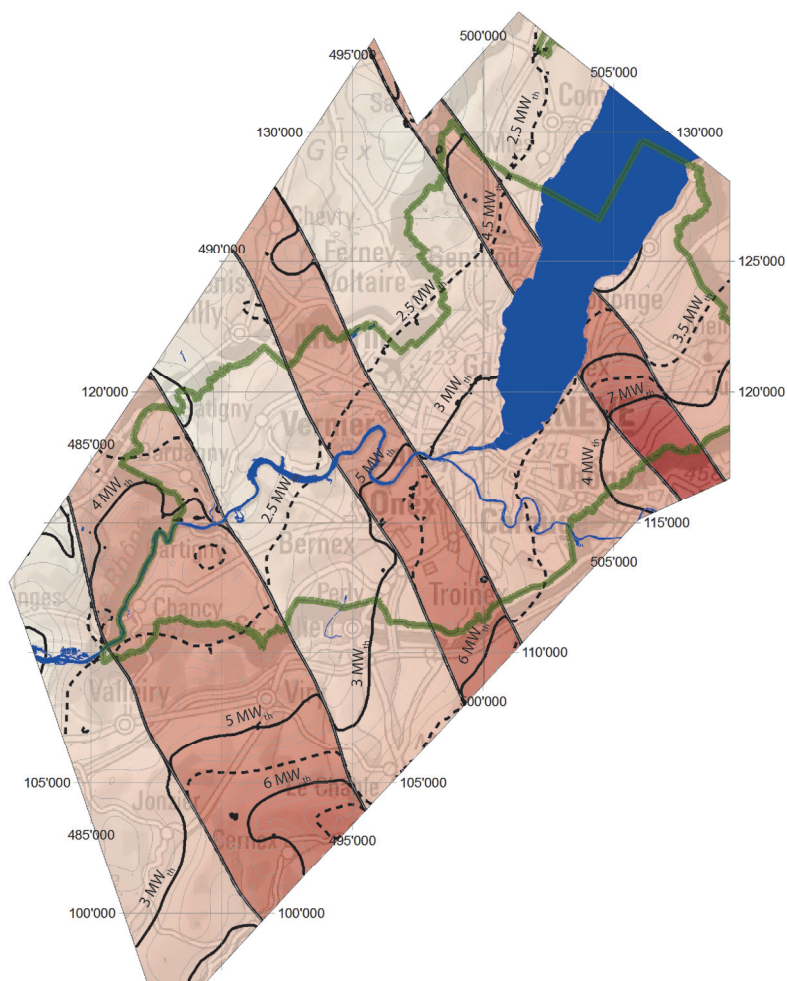


Figure 9-27. Puissance théorique pour un doublet dans le Dogger.

Tableau 9-12. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Dogger en fonction du débit et de la température. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
Roche massive	63 – 112	10 – 15	1.4 – 5.1
Roche tectonisée		15 – 30	2.1 – 10.3

Muschelkalk

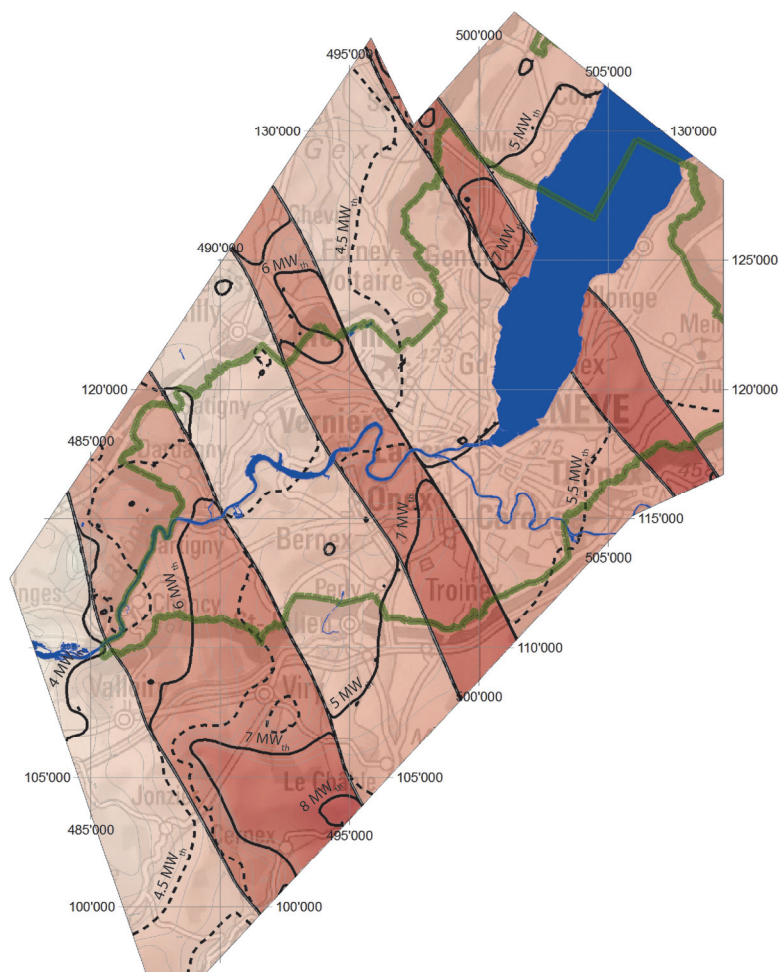


Figure 9-28. Puissance théorique pour un doublet dans le Muschelkalk.

Tableau 9-13. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Muschelkalk en fonction du débit et de la température. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
Roche massive	93 – 141	10 – 15	2.6 – 7.0
Roche tectonisée		15 – 30	4.0 – 9.3

9.5.3 Synthèse des résultats

La structure générale du Bassin genevois implique un approfondissement des formations géologiques et donc des aquifères potentiels profonds en direction du sud-est. Cet approfondissement se traduit par une augmentation de la température des formations et cela induit donc également une augmentation de la puissance théorique d'un doublet.

Les autres structures ayant un effet important sur le potentiel thermique sont les zones de failles, car elles ont pour conséquence d'augmenter le débit et donc également la puissance extractible. Dans cette étude, les différentes zones de failles ont toutes été traitées de la même manière car les connaissances à leur sujet restent très limitées. Le prolongement du décrochement de l'Arve à travers le canton, par exemple, n'est pas encore avéré, mais reste une hypothèse valable.

Les puissances obtenues reflètent par conséquent l'effet de ces structures, mais les conditions les plus favorables où les moins favorables ne sont jamais toutes réunies en une même zone. La variation réelle des puissances potentielles a donc été calculée en effectuant des géostatistiques sur les cartes des figures 9.25 à 9.28 et le résultat est présenté dans le Tableau 9-14.

Tableau 9-14. Synthèse des données compilées sur les aquifères profonds du Bassin genevois et puissance potentielle par doublet.

Formation aquifère	Profondeur (km)	Température (°C)	Puissance (MW _{th})
Crétacé	0 – 1.8	10 – 63	0 – 3.1
Malm	0.3 – 2.9	20 – 102	0 – 8.9
Dogger	1.5 – 3.4	63 – 112	1.9 – 7.6
Muschelkalk	2.5 – 4.3	93 – 141	3.5 – 8.1

Les paramètres fixés dans cette étude pour l'utilisation thermique des fluides ont comme conséquence un potentiel géothermique nul pour le Crétacé et le sommet du Malm sur une bonne partie du canton de Genève. Au nord-ouest du canton, là où elles sont les moins profondes, ces formations aquifères pourraient toutefois être exploitées à l'aide d'une pompe à chaleur et fournir de l'énergie à un quartier de bâtiments à basse consommation. De plus, la faible profondeur de ces formations dans certaines zones rend leur identification plus simple et les forages pour les atteindre bien moins coûteux.

En ce qui concerne la production d'électricité, seul l'aquifère potentiel du Muschelkalk possède une température suffisante pour envisager une coproduction de chaleur et d'électricité. Cependant il s'agit de l'aquifère le moins connu, tant du point de vue de sa lithologie que de sa géométrie. Par conséquent un projet ayant pour cible l'aquifère du Muschelkalk, devra procéder à des investigations complémentaires par les méthodes géophysiques avant de positionner un premier forage d'exploration.

9.6 Conclusions et recommandations

Les quatre aquifères profonds du Bassin genevois pourraient être potentiellement exploités à des fins thermiques, mais ce sont le niveau de température et la quantité d'énergie recherchée qui vont dicter quelles seront les futures cibles à prospector. Il faut cependant garder en mémoire que la connaissance hydrogéologique et tectonique des formations profondes reste actuellement très lacunaire et des investigations détaillées par les méthodes géophysiques d'abord et par des forages d'exploration ensuite seront indispensables si l'on souhaite assurer un développement économique et durable des ressources géothermiques profondes du Bassin genevois.

Dans un premier temps, c'est la recherche d'aquifères profonds depuis le Crétacé jusqu'au sommet du socle cristallin qui doit être prioritaire. Lorsque les structures tectoniques et les formations géologiques les plus profondes auront été reconnues par forage, voire exploitées, et que la technologie des systèmes géothermiques EGS aura atteint une certaine maturité, alors la recherche de nouvelles ressources pourra se diriger naturellement vers les roches fracturées du socle cristallin entre 4 et 5 km de profondeur.

Recommandations

Tâches pour la reconnaissance du sous-sol profond du bassin genevois

- Compilation et synthèse de l'ensemble des informations contenues dans les rapports de la trentaine de forages pétroliers sur territoire français à la périphérie du bassin genevois.
- Mesures de sismique sur l'ensemble du territoire du canton, éventuellement du Bassin. Dans le cas récent des travaux de prospection menés à St Gall, au moyen d'un réseau de lignes sismiques sur une superficie de 300 km², seuls 80 km² sont réellement interprétables en 3D. Le but étant d'obtenir une géométrie précise pour un modèle géologique 3D.
- Utilisation des données de gravimétrie existantes et mesures complémentaires dans des zones sélectionnées. Les buts étant de localiser d'éventuels grabens permio-carbonifères et de préciser la localisation des failles et leur porosité (anomalie négative).
- Etude de l'activité sismique historique du Bassin genevois : mécanismes au foyer, localisation des failles actives. Amélioration du réseau de mesures sismologiques et collecte de données (par ex. CERN ?).
- Photogrammétrie sur les affleurements du Salève et du Jura : orientation et ouverture des principales familles de failles.
- Télédétection sur la base des images satellites : localisation et précision des accidents tectoniques.
- Mesures des propriétés thermiques des roches : acquisition de données pour réaliser un modèle thermique des APR, respectivement du Bassin genevois.
- Collaboration active avec la chaire de sismique de l'Université de Genève.

Tâches pour la prospection géothermique profonde liée à un projet

- Un projet de prospection des APR devrait cibler l'une des grandes failles traversant le canton, par exemple celle du Coin qui est la mieux localisée, ou celle de l'Arve, ou encore celle de Cruseilles, afin de maximiser les chances de succès d'un premier forage d'exploration profonde.
- Prospection des failles transformantes au moyen des méthodes géophysiques (sismique 2D et 3D, gravimétrie et éventuellement magnétotellurique). Seules les méthodes sismiques pourront apporter une précision suffisante pour localiser la cible d'un projet en aquifère profond telle qu'une structure tectonique (faille, décrochement, graben) : il est important de localiser les intersections, les limites, ainsi que la géométrie d'un accident tectonique (longueur, largeur, profondeur). Les autres méthodes (gravimétrie, MT) permettront de corriger et de détailler le modèle géologique.
- Etude technico-économique des zones d'investigation (du type de l'étude de BG pour le projet PAV).
- Synergie avec le projet de Thônex (données, projet, etc.).

9.7 Bibliographie

ADEME – BRGM, 2004. *La géothermie*, Collection Les enjeux des géosciences. Val de Loire Impression, 44 pp.

Affolter T. & Gratier J.-P., 2004. *Map view retrodeformation of an arcuate fold-and-thrust belt : The Jura case*. Journal of Geophysical research, vol. 109, 20pp.

Altwegg P., Schill E. & Vuataz F.-D., 2009. *Programme GEOTHERMEOS : Etude A – Valorisation des projets en cours en Suisse Romande*. Rapport CREGE 11-09/01 pour EOS Holding, Neuchâtel, 47pp.

Amberger G. 1982. *Profil tectonique schématique à travers le canton de Genève*. In Encyclopédie de Genève, 1: Le Pays de Genève, éd. Roto-Sadag, Genève.

Andenmatten-Berthoud N. & Kohl T., 2003. *Assessment & Evaluation of geothermal potential in Switzerland (Atlas des ressources Géothermiques Suisses)*. Rapport Annuel 2003 pour l'Office Fédéral de l'Energie, Bern. Commission Suisse de Géophysique CSGP, 70 pp.

Bianchetti G., Crestin G., Kohl T. & Graf O, 2006. Agepp, *Alpine Geothermal Power Production, Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône*. Etude préliminaire, 77 pp.

Bianchetti G., Marillier F. & Arn R., 2009. *GP La Côte. Rapport de Phase A. Module A1 « Aquifères profonds »*. Rapport pour l'OFEN et le SEVEN, 53 pp.

Blondel T., Charollais S. & Wildi W., 1990. *Terminaison de la première chaîne du Jura : rampe latérale et complication*. Réunion de la société Géologique Suisse, Genève. Excursion A (2.10.1990).

Boissier F., Desplan A. & Laplaige P., 2010. *France country update*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

BRGM & AFME, 1985. *Prescriptions minimales et recommandations spécifiques aux forages géothermiques, Dogger du Bassin parisien*. Service public géothermie et hydroénergie, 65 pp.

BRGM, 1952. *Extrait du rapport du sondage Savoie 101*. N° BRGM 0701-4x-0001. 5 pp.

- BRGM, 1952. *Extrait du rapport du sondage Savoie 104*. N° BRGM 0701-4x-0003. 5 pp.
- BRGM, 1953. *Extrait du rapport du sondage Savoie 105*. N° BRGM 0701-4x-0002. 4 pp.
- BRGM, 1954. *Extrait du rapport du sondage Savoie 106*. N° BRGM 0677-6x-0001. 10 pp.
- BRGM, 1954. *Extrait du rapport du sondage Savoie 107*. N° BRGM 0701-2x-0001. 8 pp.
- BRGM, 1956. *Extrait du rapport du sondage Savoie 108*. N° BRGM 0677-8x-0003. 4 pp.
- BRGM, 1959. *Extrait du rapport du sondage Savoie 109*. N° BRGM 0677-8x-0002. 6 pp.
- BRGM, 1960. *Extrait du rapport d'implantation du sondage Salève 1*. N° BRGM 0678-1x-0002. 15 pp.
- BRGM, 1962. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 677 : Seyssel, avec notice explicative*, 17 pp.
- BRGM, 1963. *Extrait du rapport d'implantation du sondage Salève 2*. N° BRGM 0678-1x-0001. 11 pp.
- BRGM, 1970. *Rapport géologique sur le projet de captage de la source des Quarts, commune de Montanges (Ain)*. N° BRGM 0653-1x-0015, 1 pp.
- BRGM, 1972. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 628 : St Claude, avec notice explicative*, 17 pp.
- BRGM, 1982. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 03*. N° BRGM 0653-3x-0032, 1 pp.
- BRGM, 1982. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 04*. N° BRGM 0653-3x-0031, 2 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 01*. N° BRGM 0653-4x-0040, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 02*. N° BRGM 0653-3x-0033, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 05*. N° BRGM 0653-7x-0010, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 06*. N° BRGM 0653-9x-0009, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 07*. N° BRGM 0653-9x-0039, 1 pp.
- BRGM, 1992. *Résumé du rapport géologique sur le forage Charmont 1 (CHT1)*. N° BRGM 0652-3x-0121/gb, 1 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1969. *Extrait du rapport d'implantation du forage d'exploration Faucigny 1*, N° BRGM 0654-7x-0010, 5 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1976. *Extrait du rapport technique de fin de forage (forage d'exploration) La Tailla*, N° BRGM 0701-6x-0004, 32 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1989. *Extrait du rapport de fin de sondage Chaleyriat 1*, N° BRGM 0676-2x-0031, 4 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1990. *Extrait du rapport de fin de sondage La Chandelière (LCD 1)*, N° BRGM 0676-3x-0014, 4 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1992. *Extrait du rapport de fin de sondage Chatillon 1D (CTL 1D)*, N° BRGM 0676-2x-0032, 4 pp.
- BRGM, Prepa-Transworld Petroleum S.A.F., 1958. *Extrait du rapport de fin de sondage Humilly n°1*, N° BRGM 0653-7x-0001, 11 pp.

BRGM, Prepa-Transworld Petroleum S.A.F., 1958. *Extrait du rapport d'implantation du sondage d'exploration d'Humilly 2 (Viry)*, N° BRGM 0653-7x-0003, 8 pp.

BRGM, Prepa-Transworld Petroleum S.A.F., 1959. *Extrait du rapport de fin de sondage Messery 1 / Haniel et Lueg*, N° BRGM 0629-7x-0002, 11 pp.

BRGM, Société de prospection et d'exploration pétrolière en Alsace, 1963. *Extrait du rapport de fin de sondage mont de Boisy 1*, N° BRGM 0629-7x-0001, 11 pp.

BRGM, *Société de prospection et d'exploration pétrolière en Alsace, 1963. Extrait du rapport de fin de sondage mont de Musiège 1*, N° BRGM 0677-3x-0001, 11 pp.

Buonassorte G., Rizzi R. & Passaleva G., 2007. *Direct Uses of Geothermal Energy in Italy 2005-2009: Update Report and Perspectives*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

Burger A. & Gohran H.L., 1986. *Etude des ressources géothermiques suisses. Prospection géothermique le long du pied Sud du Jura*. Rapp. de recherches NEFF N° 165, in Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 6 : 91-198.

Burkhard M. & Sommaruga A., 1998. *Evolution of the western Swiss Molasse basin : structural relations with the Alps and the Jura belt*. In : Mascle A., Puigdefàbregas C, Luterbacher H. P. & Fernández M. (eds) *Cenozoic Foreland Basins of Western Europe*. Geological Society Special Publications, 134 : 279-298.

Burri J. -P. & Associé, 1981. *Energie géothermique dans le canton de Genève, 2^{ème} étude complémentaire. Etude hydrodynamique des aquifères profonds du bassin genevois*. République et canton de Genève, département de l'intérieur et de l'agriculture. Service cantonal de géologie. Rapport, 76 pp.

Charollais J. et al., 1988. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 678 : Annecy - Bonneville, avec notice explicative*. BRGM, 133 pp.

Charollais J. et al., 1993. *Précisions stratigraphiques sur les Collines du Faucigny, Préalpes ultrabelvétiques de Haute-Savoie (France)*. Eclogae geol. Helv 86/2 : 397-414.

Charollais J. et al., 2007. *La molasse du Bassin franco-genevois et son substratum. Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève*. Archives des Sciences Vol. 60, Fasc. 2-3, 174 pp.

Charollais J., Plancherel R., Monjuvent G. & Debelmas J., 1998. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 654, Carte géologique de la Suisse spéciale N°125 : Annemasse, avec notice explicative*. BRGM, 139 pp.

Chauve P., Contini D. & Millet M., 2009. *Le Jura dans son cadre régional. Evolution paléogéographique et géodynamique*. Géologue N° 160 : 20 – 33.

Coudret J.-M. & Ferrandes R., 1987. *Energie géothermique*. Technique de l'ingénieur 8, 20 pp.

Dewarrat P. & Bianchetti G., 2009. AGEPP. *Phase B - Etude de faisabilité technico-financières. Valorisation de la chaleur & business plan*. Rapport de synthèse, 49 pp.

DGRST, 1976. *La géothermie. Chauffage de logements*. Rapport, 24 pp.

Donzeau M., Wernli R. & Charollais J., 1997. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 653. Carte géologique de la Suisse spéciale N° 124 : St-Julien-en-Genevois, avec notice explicative*. BRGM, 149 pp.

Donzeau M., Wernli R. & Charollais J., 1998. *Interprétation nouvelle de la géométrie de l'accident du Vuache dans le Jura méridional : le relais de failles transpressif sénéstre Léaz-Champfromier (Ain)*. Géologie de la France, N° 2: 25-45.

ENGINE Coordination Action, 2008. *Best practice handbook for the development of unconventional geothermal resources with a focus on enhanced geothermal systems*. ENGINE Coordination Action, 97 pp.

Fritz B. & Gérard A., 2010. *On the way to the exploitation of deep geothermal resources in naturally fractured environments*. C. R. Geoscience, 342 : 493-501.

Garnish J., 2002. *European activities in Hot Dry Rock research*. In: Open Meeting on Enhanced Geothermal Systems. U.S. Department of Energy, Reno, Nevada : 8-9.

Goldbrunner J., 2001. *Geothermieprojekt Simbach-Braunau (D/A)*. Bull. Geothermie CH, 30 : p. 10-11.

Goldbrunner J., 2010. *Austria – Country Update*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

Gorhan H.L. & Griesser J.C., 1988. *Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad - Baden*. Rapp. de recherches NEFF, in Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 76, 73 pp.

Gorin G., 1989. *Interprétation de la campagne sismique CG 87 dans le canton de Genève*. Département de l'intérieur et de l'agriculture, Service cantonal de géologie, 33 pp.

Gorin G., 1992. *Rapport sur l'interprétation de la campagne sismique réflexion 1990 dans le canton de Genève (Périmètre Vernier-Onex-Sezegnin-Aully-Vernier)*. Services industriels de Genève, Service du gaz, 14 pp.

Gorin G., Signer C. & Amberger G., 1993. *Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data*. Eclogae geol. Helv. 86/3 :693-716.

Gringarten, A.C., 1978. *Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for mountainous terrain: a model study*. Journal of Geophysical Research, 94 (B7) : 9439 – 9451.

Groupe de travail boucle géothermale, 1987. *Recommandations spécifiques pour la conception, l'exploitation et l'entretien d'une boucle géothermale, Dogger du Bassin parisien*, rapport, 129 pp.

Groupe de travail PDGN, 2010. *Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel (PDGN)*. Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, CREGE 07-10/01, Neuchâtel.

Groupe de travail PGN, 2008. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)*. Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, CREGE 11-08/02, Neuchâtel.

Groupement PGF, 2005. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg (PGF)*. Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, Service des transports et de l'énergie, Fribourg.

Groupement PGV, 2003. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud*, Rapport final pour le Service de l'environnement et de l'énergie, Vaud.

Häring M, Leimer T. & Wahl S., 2002. *Wärme-Contracting Geothermie-Doublette Siedlung Solar One, Itingen, BL*. Schlussbericht BFE, Projekt Nr 26745, 9 pp.

Jaffé F., Benoit F. & Roux D., 1976. *Low enthalpy geothermal energy in Switzerland : the thermal spring of Lavey and its utilisation*. Int. Congr. Thermal Waters, Geothermal Energy, Vulcanism Mediterranean Area, Athens, 1 : 268-274.

Jayet A., et al., 1964. *Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1281 Coppet*, N° 46, avec annexe de la feuille 1260 Col de la Faucille et notice explicative. Swisstopo.

Jenny J, Burri J.-P., Muralt R., Pugin A., Schnegg R., Ungemach P., Vuataz F.-D. & Wernli R., 1995. *Le forage géothermique de Thônex (Canton de Genève) : Aspects stratigraphiques, tectoniques, diagénétiques, géophysiques et hydrogéologiques*. Eclogae geol. Helv. 88/2 : 365-396.

- Lemale J. & Jaudin F., 1998. *La géothermie, une énergie d'avenir*, ARENE, 117 pp.
- Lemale J. & Pivin M., 1986. *La filière géothermique : premier bilan, évaluation technico-économique de la géothermie basse énergie en France*, AFME, 80 pp.
- Lombard A. et al., 1965. *Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1301 Genève*, N° 48, avec notice explicative. Swisstopo.
- Lund J. W., Freeston D. H. & Boyd T. L., 2010. *Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.
- Mariller F., Eichenberger U. & Sommaruga A., 2006. *Seismic synthesis of the Swiss molasse basin*. Rapport Annuel 2006. Commission Suisse de Géophysique CSGP, 15 pp.
- Marti J., 1969. *Rapport de fin de sondage d'Humilly 2. SNPA, direction exploration et production, division Europe*. Rapport, 33 pp., annexes 99 pp.
- Matousek F. & Graf H., 1998. *Trinkwasser und Wärme aus 300 m Tiefe*. GWA 1/98: 3-9.
- Mégel T., 2007. *Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur geothermischen Stromerzeugung in der Schweiz (FEGES)*. Internes Strategiepapier der Dachorganisation GEOTHERMIE.CH.
- Menjot A., 1989. *Gestion et exploitation des aquifères profonds du Bassin parisien*, Exposé du 13.06.1989 à Reinach, 18 pp.
- Meyer M., 2000. *Le complexe récifal kimméridgien – thithonien du Jura méridional interne (France), évolution multifactorielle, stratigraphie et tectonique*. Terre & Environnement Vol. 24, 179 pp.
- Meyer M., 2000. *Structure du « diapir » de Champfromier (Jura, Ain, France)*. Eclogae geol. Helv. 93 : 221-229.
- Meyer M., Meister C. & Wernli R., 2000. *Stratigraphie de Champfromier (AIN)*. Géologie de la France, No 1 : 47-57.
- Muralt R., 1999. *Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains)*. Matériaux pour la Géologie de la Suisse, série Géotechnique, 82, 236 pp.
- NEFF, 1980. *Geothermische Prospektion im Raum Koblenz – Wildegg – Dielsdorf. Schlussbericht*, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel.
- NEFF, 1984. *Nutzbarmachung des Geothermie im Raume Baden und Umgebung*. Schlussbericht, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel.
- Nissille J.-C., 1989. *Les sources thermales, subthermales et karstiques de la Caille (Cruseilles), Bromines et Lovagny (Haute-Savoie, France)*. Université de Genève, Diplôme ès Sciences de la Terre, 107 pp.
- OFEN, 1992. *Avant-projet d'installation de géothermie en Suisse : aspects techniques et financiers*. Brochure, 30 pp.
- OFEN, 1998. *Géothermie : exploitation de l'énergie géothermique. Guide pour concepteurs, maîtres d'ouvrages, investisseurs et décideurs*. Brochure, 23 pp.
- Paréjas E et al., 1938. *Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1280 Dardagny – Vernier – Chancy - Bernex* (N° 449 - 450bis), avec notice explicative. Swisstopo.
- Pasquier F., Bouzelboudjen M & Zwahlen F., 1999. *Carte Hydrogéologique de la Suisse, Sarine, Feuille 6*. Commission Géotechnique Suisse et Service Hydrologique et Géologique national.

Perritaz D. & Dewarrat P., 2009. *GP – La Côte, Projet de géothermie profonde sur la côte vaudoise*. Rapport de phase A, Module A2 « valorisation de la chaleur », 71 pp.

Pomerol C. et al., 1980. *France géologique : grands itinéraires*. Guides géologiques régionaux. Masson, Paris, 254 pp.

Projet GGP-Genève, 2004. *Géothermie de grande profondeur GGP-Genève. Etape 3*. Rapport d'étape, octobre 2004.

Rojas J., Brach M., Criaud A., Fouillac C., Martin J.C. & Menjoz A., 1989. *Characterization and modelling of low enthalpy geothermal reservoirs; example of the Paris Basin*. Geothermal European Update. Fourth international seminar on the results of EC geothermal energy research and demonstration, Florence, Italy, April 27-30, 1989: 109-118.

Rybach L., Büchi U.P., Bodmer Ph., Griesser J.-C., Israng L., Kappeler S., Rellstab W., Schlanke S. & Weiss H.P., 1981. *Geothermische Datensynthese der Schweiz. Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft*, 26, Bern, 122 pp. + 24 annexes (cartes).

ScanE, SIG & ADHM, 2003. *GGP - Valorisation de la géothermie de grande profondeur à Genève. Description générale*. Avril 2003, 34 pp.

Schellschmidt R., Sanner B., Pester S. & Schulz R., 2010. *Geothermal Energy Use in Germany*, . Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

Schroeder J.-W., 1958. *Géologie du pays de Genève. Le Globe*, Mémoires de la Société de géographie de Genève (Publication du Centenaire). Tome 97, 277pp.

Signer C. & Gorin G., 1995. *New geological observations between the Jura and the Alps in the Geneva area, as derived from reflection seismic data*. *Eclogae geol. Helv* 88/2 : 235-265.

Signorelli S. & Kohl T., 2006. *Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik*, N° 39, 107 pp.

Signorelli S. & Kohl T., 2007. *Atlas des ressources géothermiques de la Suisse occidentale. Contribution à la géologie de la Suisse*, Géophysique, 40, 57 pp.

Signorelli S., Andenmatten Berthoud N. & Kohl T., 2004. *Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz. Schlussbericht*, Energieforschung Projekt 100'022, 55 pp.

Sommaruga A., 1997. *Geology of the central Jura and the Molasse Basin : new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt*. Mémoire de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles, tome XII, 176 pp.

Syndicat mixte pour la géothermie à Meaux, 1984. *Géothermie à Meaux*, 10 pp.

Tester J.W. et al., 2006. *The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. MIT - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 372 pp.

Ungemach P. & Antics M., 2009. *Conception et réalisation d'un doublet géothermique dans le Bassin parisien : le cas de La Courneuve-Nord, GPC-IP, Roissy*. Présentation à la Table ronde sur les projets de géothermie profonde en Suisse romande, le 11.06.09, Neuchâtel.

U.S. DOE, 2008. *An evaluation of enhanced geothermal systems technology*. Geothermal technologies program. U.S. Department of energy, 23 pp.

Vallat P., 2009. *GP La Côte, Projet de géothermie profonde sur la côte vaudoise*. Rapport de synthèse de la phase A, 10 pp.

Vial R., Conrad M. & Charollais J., 1989. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 629 : St Douvaine, avec notice explicative*. BRGM, 25 pp.

Vuataz F.-D. & Fehr A., 2000. *25 ans d'activités géothermiques en Suisse*. Bull. Géothermie CH, 26 : 2-10.

Vuataz F.-D. & Giroud N., 2010. *Caractéristiques géochimiques du fluide profond du forage géothermique Thônex-1, Genève*. Rapport CREGE12-10/01, Neuchâtel.

Vuataz F.-D. (éd.), 2007. *PROGEO THERM - Programme national de développement de la géothermie en Suisse*. Rapport final élaboré par le Groupe de travail PROGEO THERM pour l'Office fédéral de l'énergie, 78 pp.

Vuataz F.-D., 1997. *Applications des techniques de forage slimbole pour la prospection des aquifères profonds*. Eclogae geol. Helv., 90 : 497-512.

Wildi W., Blondel T., Charollais J., Jaquet J.-M. & Wernli R., 1991. *Tectonique en rampe latérale à la terminaison occidentale de la Haute-Chaîne du Jura. Compte-rendu de l'excursion de la Société Géologique Suisse du 2 octobre 1990*. Eclogae geol. Helv., 84/1 : 265-277.

<www.geothermal-energy.org/304,iga_geothermal_conference_database.html>. *IGA Geothermal Conference Database*. International Geothermal Association.

10. Conclusions et recommandations finales

10.1 Conclusions

Les études menées dans le cadre de l'évaluation du potentiel géothermique du canton de Genève ont permis de faire un point de situation déterminant sur les possibilités d'utilisation de ces technologies dans notre région.

Pour la **géothermie de faible profondeur** (< 400 m), les sondes géothermiques verticales (SGV) représentent de loin la méthode la plus prometteuse. Déjà largement utilisée en Suisse et à Genève, cette technologie est bien maîtrisée et ne se heurte qu'à peu de contraintes dans notre canton (protection de la nappe souterraine du Genevois essentiellement). Les simulations effectuées montrent qu'une proportion importante de la demande actuelle en énergie de chauffage du canton (6'000 GWh/an) pourrait être couverte par des sondes ou des champs de sondes, soit au moins 20% avec des scénarios conservatifs, pouvant toutefois atteindre des valeurs nettement plus élevées en optimisant les techniques (recharge saisonnière avec possibilité de produire du froid).

Les géostructures énergétiques, sur les mêmes principes de fonctionnement que les sondes, représentent des solutions éprouvées à l'étranger et en Suisse mais encore peu utilisées à Genève (un seul exemple actuellement). Sur le canton, le potentiel global représenté par cette technique est relativement peu élevé car elle consiste à profiter de la réalisation d'ouvrages de fondation ou de soutènement pour les utiliser comme échangeur de chaleur. Or, ces ouvrages n'étant réalisés que dans des conditions particulières, il s'agit donc plutôt d'une technique opportuniste, relativement peu coûteuse puisque ces ouvrages souterrains sont réalisés dans le cadre du projet de génie-civil et peuvent couvrir en moyenne 30% des besoins en chaleur d'un bâtiment. L'importante zone de développement Praille - Acacias - Vernets (PAV) est un secteur particulièrement intéressant à cet égard. On citera également la possibilité de tirer profit des ouvrages souterrains (tunnels, tranchées couvertes). A cet égard, la mise en place de telles installations dans certains ouvrages du CEVA est à souligner comme particulièrement intéressante.

L'exploitation des nappes phréatiques peu profondes offre également des perspectives d'avenir, même si elle implique des contraintes hydrogéologiques et juridiques plus importantes que pour les deux premières méthodes. Les nappes principales de Montfleury et du Rhône présentent un potentiel élevé pour des projets de grande taille. Les nappes superficielles ont quant à elles des potentiels faibles à moyens pour des projets de taille réduite avec en plus des caractéristiques hydrogéologiques hétérogènes. La production potentielle totale de chaleur, toutes nappes confondues, a été estimée entre 40 et 110 GWh/an. Cette (recharge saisonnière, stockage). L'exploitation des nappes phréatiques offre également un important potentiel de production de froid.

Le stockage saisonnier se présente principalement comme une optimisation importante des autres méthodes géothermiques de faible profondeur (champs de sondes, exploitation des nappes) en profitant des cycles thermiques naturels (journaliers, saisonniers...) et de la réversibilité des systèmes (stockage de chaud ou de froid). Cette technique offre également la possibilité de valoriser des sources énergétiques disponibles (chaleur récupérée par refroidissement de bâtiments industriels) pour les utiliser ensuite pour des logements (stockage tampon). On peut également stocker de la chaleur dans des réservoirs d'eau enterrés avec des sources d'énergie diverses (solaire notamment). A Genève, le potentiel d'utilisation se présente plutôt sous la forme de stockage lié à des champs de sondes géothermiques verticales.

En ce qui concerne la **géothermie de grande profondeur**, les études montrent que le potentiel d'exploitation des aquifères profonds est réel dans le Bassin genevois. Il existe en effet plusieurs couches aquifères potentiellement intéressantes (Crétacé, Malm, Dogger, Muschelkalk) ainsi que plusieurs zones fracturées importantes les recoupant et qui permettraient de les exploiter dans des conditions plus favorables (débits plus importants). L'aquifère le plus profond (Muschelkalk), situé entre 2.5 à 4.3 km de profondeur est toutefois le seul à présenter une température suffisante ($\geq 110^{\circ}\text{C}$) pour envisager une coproduction de chaleur et d'électricité.

La technologie des systèmes géothermiques stimulés (EGS) pourrait également être envisagée à Genève (exploitation de la chaleur du socle cristallin entre 5 et 6 km de profondeur). Un tel projet avait d'ailleurs été initié en 1998. Les événements sismiques survenus à Bâle en 2006 ont conduit à l'interruption de ces projets, tant à Bâle qu'à Genève. Il n'en reste pas moins que cette ressource est très importante et qu'à terme, lorsque la technologie EGS aura atteint une certaine maturité et que les structures profondes auront été reconnues par forage, elle pourra certainement être exploitée pour la coproduction de chaleur et d'électricité.

10.2 Recommandations

Les **recommandations** exprimées dans chacun des chapitres 5 à 9 de ce rapport visent à définir les actions principales à entreprendre dans un avenir proche pour le développement des techniques géothermiques à Genève.

Pour la géothermie de faible profondeur, les techniques sont actuellement maîtrisées et peuvent donc être mises en œuvre. Une bonne expérience existe déjà pour les sondes géothermiques mais elle est moindre pour les autres méthodes. Leur cadre d'utilisation est désormais défini à Genève suite à la présente étude. Les actions à mener dès maintenant consistent d'une part à promouvoir la géothermie auprès des différents acteurs concernés et d'autre part à définir les cadres réglementaires de leur utilisation pour éviter de mauvaises expériences, notamment en termes de conflits de voisinage. Des cahiers des charges type pour les études à réaliser dans le cadre de projets géothermiques devraient être établis. Par ailleurs, une plate forme de coordination est à mettre en place pour toutes les méthodes de faible profondeur (planification énergétique, géologie, aménagement du territoire) afin d'optimiser leur application. Il apparaît également important de promouvoir des solutions thermiquement équilibrées (recharge saisonnière, stockage) qui permettent de rendre la ressource pratiquement inépuisable et de suivre les développements visant à augmenter l'efficacité énergétique des systèmes.

Pour la géothermie de grande profondeur, les techniques d'exploration et d'exploitation des aquifères profonds sont également maîtrisées à l'heure actuelle. En revanche, la connaissance des structures géologiques profondes du Bassin genevois est pour l'instant très lacunaire. Il s'agit donc dans un premier temps d'engager dès que possible des programmes d'investigations détaillées (géophysique, forages) pour être prêts, le moment venu à exploiter ces ressources de grande capacité potentielle. De telles reconnaissances sont en cours dans d'autres cantons.

Pour ce qui est de la technologie EGS (systèmes géothermiques stimulés), il apparaît qu'elle passe pour l'instant en deuxième priorité à Genève. Cette ressource reste toutefois clairement disponible à des profondeurs accessibles et il semble donc parfaitement adéquat de recommander de mettre à profit les reconnaissances ciblées sur les aquifères profonds pour également récupérer toutes les informations liées au sommet du socle cristallin.

En guise de conclusion finale, on constate que la mise en pratique intensive des méthodes géothermiques, tant de faible que de grande profondeur, est possible à Genève dont le sous-sol présente des caractéristiques favorables à cet égard. Ce passage à « l'ère géothermique » doit toutefois être précédé et accompagné par des mesures et des études à diverses échelles, qu'il s'agit d'entreprendre dès à présent pour éviter des erreurs à court terme (faible profondeur) et de prendre du retard à long terme (grande profondeur).