

Rapport final du 27 septembre 2002

# **Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques**

## **Méthodologie de détermination des zones potentielles**

élaboré par  
Patric Joliquin  
GEOLEP - EPFL  
1015 Lausanne





# Résumé

Cette étude se focalise sur l'exploitation de la chaleur terrestre par les géostructures énergétiques. Les géostructures sont des ouvrages en béton, en contact avec le sol, servant de fondation à une construction ou de soutènement. Les trois grands types de géostructures sont les pieux, les parois et les dalles. Ces structures peuvent être équipées d'un réseau de tubes dans lesquels circule un fluide caloporteur qui permet l'échange de chaleur avec le sol. On les appelle dans ce cas des géostructures énergétiques.

Cette technologie est encore peu répandue en Suisse, d'où l'objectif de cette étude qui est de permettre son développement en fournissant une méthodologie, basée sur des critères, pour l'identification et la sélection des zones potentielles à sa réalisation. L'aménagement du territoire est le premier critère et permet de définir le type de construction et, par la suite, la charge transmise sur le sol. Les caractéristiques mécaniques du sol vont ensuite déterminer le type de fondation ou de soutènement à réaliser. Dans le cas où des géostructures seraient requises, se pose la question de leur équipement en échangeurs de chaleur. Pour y répondre, les caractéristiques thermiques du sol, la présence d'eau souterraine et sa vitesse d'écoulement doivent être connues. Enfin, il reste à vérifier certains critères concernant la protection des nappes souterraines, les effets thermiques induits, la création de barrages hydrauliques et l'exécution des travaux. Cette analyse aboutit ainsi à la détermination de zones où des géostructures énergétiques pourraient être réalisées.

De manière à valider cette méthodologie, plusieurs sites ont été étudiés dans le canton de Genève. Deux de ces sites, soit les périmètres d'aménagement coordonné de La Chapelle - Les Sciens et de Frontenex - Gradelle, ont été retenus pour y appliquer les critères. Dans les deux cas, il ressort que des bâtiments d'une certaine importance doivent être fondés sur pieux ou radier général et que l'équipement de ces géostructures en échangeurs de chaleur est possible et recommandé. Pour le premier site, la présence en profondeur de la nappe du genevois, utilisée pour l'eau potable, exclut la réalisation de pieux reportant la charge en pointe. En effet, ces derniers transperçant la couche imperméable au-dessus de l'aquifère, il existe un risque de pollution depuis la surface. La protection de cette nappe peut ainsi, suivant les cas, limiter ou exclure l'exécution de certains types de géostructures énergétiques.

# Zusammenfassung

Das Ziel dieser Studie ist die Nutzung von Geostrukturen zur Energiegewinnung zu fördern. Geostrukturen sind Betonteile, die in Form von Fundamenten oder Stützwerten in einem engen Kontakt mit dem Boden stehen. Die drei wichtigsten Typen von Geostrukturen bilden Pfähle, Stützwände und Fundationsplatten. Diese Strukturen können mit Rohrleitungen versehen werden, die dann als Wärmetauscher zur Energiegewinnung funktionieren. Somit können sie auch als Energie-Geostrukturen bezeichnet werden.

Heute ist diese Technologie in der Schweiz noch relativ wenig bekannt. Das Ziel dieser Arbeit ist daher ein Werkzeug zu schaffen um die Verbreitung von Energie-Geostrukturen in Schwung zu setzen. Zu diesem Zweck wurde eine Methodologie ausgearbeitet um aufgrund von ausgewählten Kriterien potentielle Anwendungsgebiete frühzeitig identifizieren zu können. Die Hauptkriterien bilden Angaben über Raum- und Zonenplanung, über mechanische und thermische Kennwerte des Untergrundes und der Grundwasserverhältnisse.

Es gibt aber auch Kriterien, die die Nutzung von Energie- Geostrukturen einschränken, wie z.B. der Schutz des Grundwassers an sich bzw. eine unerwünschte thermische Beeinflussung des Bodens und des Grundwassers.

Um diese Methodologie zu prüfen, wurden sechs potentielle Bauzonen im Kanton Genf identifiziert. Zwei davon wurden unter Anwendung der oben erwähnten Kriterien näher untersucht. Es sind dies die beiden Gebiete "La Chapelle - Les Sciers" und "Frontenex – Gradelle". Hier sind die Untergrundverhältnisse derartig, dass zukünftige Gebäude sehr wahrscheinlich unter Anwendung von Geostrukturen ausgeführt werden müssen. Diese Verhältnisse des Untergrundes würden somit die Ausführung von Geostrukturen als Wärmetauscher ermöglichen.

Im Fall des Gebietes "La Chapelle - Les Sciers" gibt es allerdings eine Einschränkung, da ersteres sich in einer Wasserschutzzone, eine der wichtigsten Grundwasserzonen zur Trinkwasserversorgung des Kantons, befindet. Aus diesem Grunde dürfen Pfähle nicht eine den Aquifer überlagernde undurchlässige Schicht durchbohren. Sowohl die Fundationstiefe und als auch zulässige Pfahllängen müssen also vor einem Baubeginn genau festgelegt werden.

# Abstract

This study focuses on the realisation of earth heat exchangers by means of so called geostructures. These geostructures are works of concrete being in close contact with the ground and which are used for foundation or as retaining structures. The three main types of geostructures are piles, the walls and the foundation slabs. These structures can be equipped with a network of tubes where a liquid circulates to permit a heat exchange with the ground. In this case, they can be called energetic geostructures.

To date, the use of this technology is rather limited in Switzerland. Therefore, the aim of this study is to increase its development, and a methodology to identify potential zones of application will be given for the purpose of energy planning. The correct landplanning and the geotechnical properties of the ground are the two basic criteria to select the type of geostructure and its foundation conditions. Additional criteria like the thermal properties of the ground and the presence of groundwater will determine whether geostructures can be equipped with heat exchangers. Finally, the protection of the groundwater and thermal ground disturbances are possible criteria which could limit the application of energetic geostructures.

To validate this methodology, six sites were selected in the canton of Geneva. Two of them ("La Chapelle - Les Sciens" and "Frontenex – Gradelle"), were investigated by applying the above mentioned criteria.

The conclusion is that the two sites represent potential zones for using energetic geostructures. Nevertheless, within the site "La Chapelle - Les Sciens", the presence of an important groundwater resource was identified. To protect it, it is not permitted to pierce the impermeable layer above the aquifer, and therefore foundation depths must carefully be chosen by controlling the lengths of piles.

# Remerciements

Arrivé au terme de ce travail, j'aimerais remercier toutes les personnes qui en ont permis ou facilité la réalisation.

Premièrement, je remercie l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) et M. Harald Gorhan pour la participation au financement de cette étude.

Je remercie sincèrement M. Jules Wilhelm, ingénieur-conseil à Pully, qui est l'initiateur de cette étude et qui m'a suivi et conseillé avec beaucoup de motivation tout au long des quatre mois du travail.

Tous mes remerciements vont aussi à M. Albert Ghiraldi, administrateur délégué de l'entreprise GRAM SA, pour avoir accepté d'encadrer et de cofinancer ce travail et pour son intérêt dans l'étude ainsi que ses conseils pratiques.

A l'état de Genève, je désirerais remercier les personnes qui ont permis la réalisation de ce travail. Je pense notamment à Mme Hillevi Perraudin pour ses nombreux conseils et informations en matière d'aménagement du territoire, à M. Gabriel De los Cobos pour ces informations géologiques et pour m'avoir permis de consulter de nombreux relevés de sondages et à M. Rémy Beck pour son intérêt et son enthousiasme vis-à-vis de cette étude.

A l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, je remercie le professeur Dr Aurèle Parriaux en tant que directeur de la formation postgrade internationale en géologie de l'ingénieur et de l'environnement et M. Pascal Turberg, responsable de la formation postgrade, pour le suivi accordé pendant ce travail.

# Table des matières

<i>Résumé</i> .....	I
<i>Zusammenfassung</i> .....	II
<i>Abstract</i> .....	III
<i>Remerciements</i> .....	IV
<i>Table des matières</i> .....	V
<b>1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1 Contexte général de la géothermie.....	1
1.2 Objectifs de l'étude .....	1
1.3 Démarche de l'étude.....	2
1.4 Les géostructures énergétiques .....	2
1.4.1 Les pieux énergétiques .....	3
1.4.2 Les parois et dalles énergétiques.....	4
<b>2. Critères d'identification et de sélection des zones potentielles</b> .....	<b>5</b>
2.1 Critères conditionnant la réalisation de géostructures .....	5
2.1.1 Aménagement du territoire .....	5
2.1.2 Caractéristiques mécaniques du sol.....	6
2.2 Critères conditionnant l'équipement des géostructures en échangeurs de chaleur .....	7
2.2.1 Caractéristiques thermiques du sol .....	7
2.2.2 Présence d'eau souterraine.....	8
2.2.3 Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine .....	8
2.3 Critères pouvant limiter la réalisation de géostructures énergétiques .....	10
2.3.1 Protection des nappes souterraines .....	11
2.3.1.1 Court-circuit entre aquifères .....	11
2.3.1.2 Contamination provenant de la surface .....	12
2.3.1.3 Contamination lors de la construction.....	12
2.3.1.4 Fuites de liquide caloporteur .....	12
2.3.1.5 Critères en fonction des secteurs de protection des eaux, ainsi que des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines .....	12

2.3.2	Effets thermiques.....	13
2.3.3	Barrages hydrauliques.....	14
2.3.4	Exécution des travaux .....	14
2.4	Synthèse .....	14
<b>3.</b>	<b>Présentation des différents sites étudiés dans le canton de Genève.....</b>	<b>19</b>
3.1	Démarche de la recherche .....	19
3.2	Introduction à la géologie genevoise .....	20
3.3	PAC de Sécheron.....	21
3.4	PAC de Bernex - Est .....	22
3.5	PAC de La Chapelle - Les Sciens .....	22
3.6	PAC de la Gare des Eaux - Vives.....	23
3.7	PAC de Frontenex - Gradelle .....	24
3.8	PAC de Mon Idée - Communaux d'Ambilly.....	26
3.9	Synthèse des sites étudiés.....	27
<b>4.</b>	<b>Application des critères aux deux sites pilotes.....</b>	<b>29</b>
4.1	Site pilote du PAC de La Chapelle - Les Sciens.....	29
4.1.1	Généralités .....	29
4.1.2	Application des critères .....	32
4.1.2.1	Aménagement du territoire .....	32
4.1.2.2	Caractéristiques mécaniques du sol.....	32
4.1.2.3	Caractéristiques thermiques du sol et présence d'eau souterraine.....	32
4.1.2.4	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine .....	33
4.1.2.5	Protection des nappes souterraines .....	33
4.1.2.6	Effets thermiques, barrages hydrauliques et exécution des travaux.....	34
4.1.3	Conclusions.....	34
4.2	Site pilote du PAC de Frontenex – Gradelle .....	35
4.2.1	Généralités .....	35
4.2.2	Application des critères .....	37
4.2.2.1	Aménagement du territoire .....	37
4.2.2.2	Caractéristiques mécaniques du sol.....	37
4.2.2.3	Caractéristiques thermiques du sol et présence d'eau souterraine.....	38

4.2.2.4	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine .....	38
4.2.2.5	Protection des nappes souterraines, effets thermiques, barrages hydrauliques et exécution des travaux .....	38
4.2.3	Conclusions .....	39
4.3	Synthèse .....	39
<b>5.</b>	<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>41</b>
	<i>Bibliographie .....</i>	<i>43</i>



# 1. Introduction

Ce rapport est basé sur le mémoire réalisé dans le cadre de la formation postgrade internationale en géologie de l'ingénieur et de l'environnement pour l'obtention du diplôme d'études postgrades en géologie de l'ingénieur et de l'environnement (Joliquin, 2002). Cette étude a été effectuée de mai à septembre 2002 au sein de l'entreprise GRAM SA à Villeneuve-près-Lucens et du Laboratoire de Géologie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Le suivi du travail a été assuré par M. Jules Wilhelm, ingénieur-conseil à Pully et par M. Albert Ghiraldi, administrateur délégué de l'entreprise GRAM SA.

## 1.1 Contexte général de la géothermie

Une énorme quantité d'énergie calorifique est stockée sous la surface terrestre et constitue ce que l'on appelle l'énergie géothermique. L'origine de cette énergie réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs. Les températures dans le noyau terrestre culminent à 6'000°C et atteignent encore 1'300°C environ dans le manteau supérieur du globe terrestre. Le flux géothermique qui parvient à la surface du globe dépasse 40 milliards de kW. On constate qu'en moyenne, la température augmente à partir de la surface terrestre de 3°C environ par 100 mètres de profondeur, ce qui correspond à un gradient géothermique normal. De plus, à dix mètres de profondeur déjà, le terrain présente une température presque constante tout au long de l'année.

La géothermie est une source d'énergie permanente, disponible partout sur Terre et inépuisable à la dimension de l'ère humaine. Il existe de nombreuses techniques permettant son utilisation pour la production de chaleur ou d'électricité. Cette ressource énergétique est actuellement en forte croissance et devra poursuivre son développement à l'avenir. En effet, il s'agit d'une énergie respectueuse de l'environnement puisqu'elle n'engendre dans l'atmosphère ni substances polluantes, ni dioxyde de carbone. Elle remplace de manière idéale les agents énergétiques fossiles et permet ainsi de réduire les impacts environnementaux liés à ces sources d'énergie, dont principalement l'effet de serre.

## 1.2 Objectifs de l'étude

La présente étude se focalise sur une seule des méthodes d'extraction de l'énergie géothermique du sous-sol, soit la méthode des géostructures énergétiques. Cette technologie montre un fort développement en Autriche et en Allemagne et commence également à être utilisée en Suisse alémanique. Très peu de réalisations ont actuellement été effectuées en Suisse romande. L'objectif de cette étude est donc de permettre un développement de cette technologie en Suisse en fournissant une méthodologie et des critères pour l'identification et la sélection des zones potentielles à sa mise en œuvre. Ainsi, ce travail devrait permettre que pour chaque nouveau projet de réalisation de géostructures la possibilité d'équiper ces dernières en échangeurs de chaleur soit prise en compte. Ces critères pourront par la suite

également servir de base lors de l'établissement par les cantons de cartes d'utilisation de la chaleur du sol par les géostructures énergétiques.

### 1.3 Démarche de l'étude

La première partie de ce travail consiste à définir les différents critères pour l'identification des zones potentielles pour la réalisation de géostructures énergétiques. Dans la deuxième partie du travail, ces critères ont été appliqués à deux sites pilotes dans le canton de Genève, sélectionnés parmi six sites d'études définis en collaboration avec les autorités cantonales (Service cantonal de géologie, service du plan directeur et service cantonal de l'énergie).

### 1.4 Les géostructures énergétiques

Ce chapitre a pour but de décrire brièvement les géostructures et leur équipement en échangeurs de chaleur.

Les géostructures sont des ouvrages, généralement en béton ou en béton armé, en contact avec le sol servant de fondation à une construction sur un terrain de faible portance ou assurant la sécurité d'un massif de terre instable. On distingue trois grands types de géostructures qui sont les pieux, les parois et les dalles. Toutes ces structures peuvent être munies d'un dispositif permettant l'échange de chaleur entre le sol et la géostructure. Dans ce cas, elles sont appelées géostructures énergétiques. Ces systèmes peuvent souvent être conçus pour fonctionner en association avec d'autres dispositifs énergétiques, tels les capteurs solaires. Leur but est de fournir de la chaleur pour le chauffage en hiver et également de permettre la production de froid durant l'été. Ces structures tirent principalement profit du fait que la température du sol à une profondeur de 10 m déjà est presque constante au cours de l'année.

Les trois grands types de géostructures peuvent être subdivisés en différentes catégories (Wilhelm, 2001) :

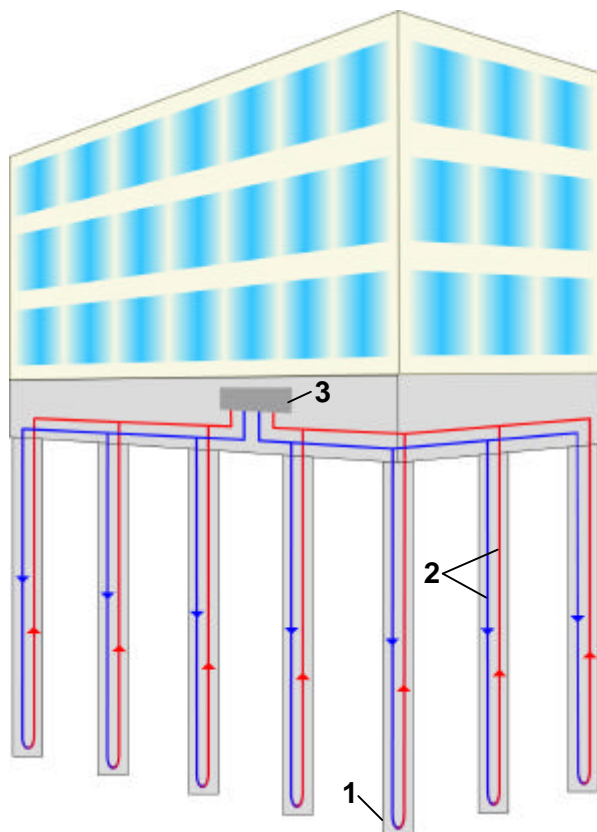
- |               |  |
|---------------|--|
| <i>Pieux</i>  | - Pieux battus (pieux préfabriqués)<br>- Pieux moulés dans le sol  |
| <i>Parois</i> | - Rideaux de pieux<br>- Parois moulées de fondation ou de soutènement<br>- Parois de fondation ou de soutènement préfabriquées |
| <i>Dalles</i> | - Dalles de fondation<br>- Dalles diverses   |

Les premières applications de géostructures énergétiques en Suisse remontent à la fin des années 1980. Ce sont les pieux énergétiques qui ont pris le plus grand essor, alors que les autres types de géostructures, comme les parois moulées et les rideaux de pieux, ne sont encore actuellement que peu utilisés comme échangeurs

de chaleur. La grande majorité des travaux de recherche sur les géostructures énergétiques se sont également focalisés sur ces pieux énergétiques.

### 1.4.1 Les pieux énergétiques

Un pieu énergétique ou pieu échangeur est un pieu de fondation dans lequel un tube ou un réseau de tubes a été installé, de manière à pouvoir faire circuler un fluide caloporteur pour échanger de la chaleur avec le terrain. Ces deux principales fonctions sont donc de reporter en profondeur les charges d'une construction et de servir d'échangeur de chaleur avec le terrain. La figure 1.1 montre un schéma d'un bâtiment fondé sur pieux énergétiques.



**Figure 1.1** : Schéma d'un bâtiment fondé sur pieux énergétiques

(source : Joliquin, 2002)

- 1 Pieux énergétiques
- 2 Tubes permettant l'échange de chaleur
- 3 Pompe à chaleur

Un système de pieux échangeurs est ainsi constitué par les pieux que l'on équipe de tubes en polyéthylène permettant la circulation du fluide caloporteur. Ces tubes sont ensuite connectés entre eux et reliés à une pompe à chaleur pour le chauffage. Le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et le sol est déterminé par la différence de température, la vitesse d'écoulement dans les tubes et les conductivités thermiques des parois des tubes et des matériaux constituant le pieu (béton, matériau de remplissage). Il est recommandé d'utiliser de l'eau comme fluide caloporteur du fait qu'elle ne constitue pas un danger de pollution de l'environnement (von der Hude & Kapp, 1998). Si nécessaire, de l'anti-gel peut être ajouté à l'eau circulant dans les tubes.

Pour la production de froid, deux variantes existent en fonction du niveau de température souhaité. La première utilise une machine de froid à la place de la

pompe à chaleur pour abaisser la température. La deuxième est ce que l'on appelle le refroidissement direct (free cooling) où la chaleur excédentaire du bâtiment est simplement injectée dans le terrain par le biais des pieux. Dans beaucoup de cas, le système de production de froid est couplé à la pompe à chaleur dans la même installation de manière à pouvoir effectuer une production alternée de chaleur et de froid. Ceci est fortement recommandé pour l'évolution à long terme de la température du terrain, notamment dans le cas avec faible écoulement de la nappe souterraine.

#### **1.4.2 Les parois et dalles énergétiques**

Le rôle principal d'une paroi est d'assurer la stabilité du sol lors d'une excavation d'une profondeur relativement importante. Au contraire, une dalle de fondation ou un radier général est une dalle d'épaisseur importante qui permet de fonder un bâtiment sur des terrains de très mauvaise qualité. Ces parois et dalles peuvent être équipées d'échangeurs de chaleur sur le même principe que les pieux énergétiques, soit en plaçant des tubes en polyéthylène à l'intérieur de la structure pour la circulation du liquide caloporteur. L'isolation thermique de ces géostructures est un point essentiel dans la conception du projet. Il faut en effet éviter, le cas échéant, des pertes de chaleur trop importantes par ces surfaces en contact avec un sol refroidi.

## **2. Critères d'identification et de sélection des zones potentielles**

Ce chapitre a pour objectif d'énumérer et de préciser les divers critères qui permettent l'identification et la sélection de zones potentielles pour la réalisation de géostructures énergétiques. Ceci donnera au promoteur et au concepteur de projet une première indication sur la possibilité d'inclure l'utilisation des géostructures énergétiques lors de la réalisation d'un bâtiment. Ce chapitre permettra aussi de prendre connaissance des divers paramètres qu'il est nécessaire de déterminer pour la construction d'un tel système d'échangeurs de chaleur par des géostructures. Enfin, ces critères constituent la base pour l'élaboration des cartes de potentialité, ayant pour but de promouvoir la réalisation de géostructures énergétiques.

Pour chaque nouveau projet de bâtiment, le concepteur doit, après avoir défini le genre de construction, déterminer si des géostructures sont nécessaires comme fondation ou soutènement. Dans la phase suivante de réflexion et au cas où des géostructures seraient requises, il pourra envisager la possibilité d'équiper celles-ci en échangeurs de chaleur. Enfin, il devra tenir compte de plusieurs limitations pour l'exécution de ces géostructures énergétiques. A chacun de ces stades de réflexion, correspondent des critères qui sont présentés ci-dessous. Une synthèse de ces critères est donnée en fin de chapitre. La structure de ce chapitre est donc la suivante :

- 2.1 Critères conditionnant la réalisation de géostructures
- 2.2 Critères conditionnant l'équipement des géostructures en échangeurs de chaleur
- 2.3 Critères pouvant limiter la réalisation de géostructures énergétiques
- 2.4 Synthèse

### **2.1 Critères conditionnant la réalisation de géostructures**

Pour déterminer si des géostructures sont nécessaires comme fondation de bâtiment ou soutènement, le concepteur d'un projet doit considérer les points suivants :

- 2.1.1 Aménagement du territoire
- 2.1.2 Caractéristiques mécaniques du sol

#### **2.1.1 Aménagement du territoire**

L'aménagement du territoire détermine, par l'intermédiaire de plans de zones, le genre de construction qu'il est possible de réaliser sur un terrain donné. Cette information permettra au promoteur de dimensionner son projet de construction, duquel découleront ensuite différents paramètres comme le nombre d'étages et de sous-sols du bâtiment. Ces données permettront de déterminer le poids du bâtiment par unité de surface et la profondeur de l'excavation. Ces informations seront ensuite comparées aux caractéristiques mécaniques du sol (voir 2.1.2) et permettront de

définir le type de fondation ou de soutènement à exécuter. Par exemple, sur un sol peu consolidé, une villa pourra ne pas nécessiter de fondations sur pieux, alors qu'un immeuble de plus de dix étages en requerra.

Ainsi, on constate que les géostructures énergétiques seront principalement applicables aux bâtiments de grande taille avec plusieurs étages et quelques sous-sols, comme les bâtiments locatifs et administratifs. Ces derniers possèdent, de plus, l'avantage de nécessiter un refroidissement des locaux durant l'été, ce qui permet d'effectuer une recharge thermique du terrain. L'aménagement du territoire va donc indirectement influencer la réalisation de géostructures par les limitations imposées sur le genre de construction.

### **2.1.2 Caractéristiques mécaniques du sol**

Comme vu au paragraphe précédent, les caractéristiques mécaniques du sol sont nécessaires pour pouvoir les comparer aux informations sur la construction et permettre de définir le type de fondation ou de soutènement à exécuter.

La charge admissible par le sol par unité de surface ainsi que la tenue du sol à l'excavation peuvent être déterminées à partir des caractéristiques mécaniques du sol, comme la résistance à la compression simple, l'angle de frottement interne ou la cohésion, mais aussi directement par la réalisation d'essais géotechniques (sondage SPT, pressiomètre, pénétromètre,...).

La valeur de la charge admissible par le sol sera comparée à la charge du bâtiment et deux cas peuvent se présenter :

- a) La charge admissible par le sol est nettement supérieure à la charge du bâtiment et ce dernier peut être fondé sur des fondations superficielles, par exemple sur semelles. Sol à bonne portance.
- b) La charge admissible par le sol est de peu supérieure ou inférieure à la charge du bâtiment et il est nécessaire de fonder le bâtiment sur pieux ou radier général. Sol à mauvaise portance.

Il est très difficile de déterminer à l'avance la charge qu'un sol pourra soutenir en ne connaissant que sa nature. En effet, la compacité et la consistance d'un sol peuvent varier fortement pour une même lithologie en fonction des événements géologiques que le sol a subi (glaciations, érosion,...). Dans la suite, on parlera donc simplement d'un sol à bonne portance ou à mauvaise portance, indépendamment de sa lithologie.

La tenue du sol à l'excavation dépend, en plus de sa lithologie et de ses caractéristiques mécaniques, de la présence d'eau et de la profondeur de l'excavation. Ici aussi, il est difficilement possible d'avoir des règles générales sur la tenue d'un sol en fonction de la lithologie. On dira donc qu'un sol a une tenue à l'excavation qui nécessite ou, au contraire, qui ne nécessite pas un soutènement.

En admettant que l'on soit en présence d'une couche de mauvaise portance, il faut encore connaître son épaisseur pour déterminer la nécessité de géostructures. Par exemple, il est rare que des pieux soient effectués si la couche de faible portance a

une épaisseur inférieure à environ 5 à 8 m. Il est, en effet, souvent beaucoup plus rentable d'excaver jusqu'à la couche de bonne portance et d'y appuyer le bâtiment. La plupart du temps, une excavation est de toute manière requise pour la création de sous-sols.

En conclusion, on constate que les caractéristiques mécaniques du sol sont déterminantes dans la réalisation de géostructures, mais qu'elles ne constituent pas l'unique critère et que seule une étude cas par cas et tenant compte de chaque paramètre pourra déterminer la nécessité et le type de géostructure à construire.

## 2.2 Critères conditionnant l'équipement des géostructures en échangeurs de chaleur

Après avoir défini qu'il est nécessaire de réaliser des géostructures comme soutènement ou fondation d'un bâtiment, il faut évaluer si ces géostructures peuvent être équipées en échangeurs de chaleur. Les critères suivants permettent d'y répondre :

- 2.2.1 Caractéristiques thermiques du sol
- 2.2.2 Présence d'eau souterraine
- 2.2.3 Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine

### 2.2.1 Caractéristiques thermiques du sol

Les deux principaux paramètres déterminant les caractéristiques thermiques d'un sol sont :

- la conductibilité thermique  $\lambda$ , en  $[W/m \cdot K]$ , qui correspond au flux de chaleur transmis par conduction au travers d'un corps soumis à un gradient de température de 1  $[K/m]$ .
- la capacité thermique volumique  $C_v$ , en  $[J/m^3 \cdot K]$ , qui est la quantité de chaleur nécessaire à l'élévation de température de 1  $[K]$  d'un volume de 1  $[m^3]$ .

Le tableau 2.1 montre les domaines de variation de ces paramètres pour les quatre types de sols les plus fréquents.

Type de sol	Conductibilité thermique		Capacité thermique volumique	
	$\lambda$		$C_v$	
	[W/mK]		[MJ/m <sup>3</sup> K]	
	sec	saturé	sec	saturé
Argile	0.2 - 0.3	1.1 - 1.6	0.3 - 0.6	2.1 - 3.2
Limon	0.2 - 0.3	1.2 - 2.5	0.6 - 1.0	2.1 - 2.4
Sable	0.3 - 0.4	1.7 - 3.2	1.0 - 1.3	2.2 - 2.4
Gravier	0.3 - 0.4	1.8 - 3.3	1.2 - 1.6	2.2 - 2.4

**Tableau 2.1** : Conductibilité thermique et capacité thermique volumique de divers types de sols (Source : Fromentin et al., 1997)

On constate que les valeurs de la conductibilité thermique comme celles de la capacité thermique volumique sont fréquemment plus de cinq fois supérieures dans le cas saturé que dans le cas sec. Cette différence montre l'importance de l'eau dans les processus thermiques. Les sols secs étant ainsi très résistants thermiquement, il est préférable que le sol soit saturé ou du moins partiellement saturé pour un meilleur échange de chaleur avec le sol (voir 2.2.2). Pour les principales installations de pieux échangeurs en Suisse, la conductibilité thermique des sols est de l'ordre de 2.0 [W/m·K] et la capacité thermique volumique de 2.35 [MJ/m<sup>3</sup>K] environ (Fromentin et al., 1997). Ce sont de bonnes valeurs pour ces paramètres. Ainsi, on en déduit que la conductibilité thermique du sol devrait être d'au moins 1.3 [W/m·K] et si possible supérieure à 1.8 [W/m·K] pour un bon fonctionnement d'un système avec géostructures énergétiques.

Pour déterminer la conductibilité thermique et la capacité thermique volumique d'un sol, il existe des méthodes simples basées sur des mesures en laboratoire et l'utilisation d'abaques (SIA, 1988). Si l'on désire des valeurs plus fiables et représentatives de l'ensemble du terrain, des tests de réponse géothermique, effectués in-situ, doivent être réalisés.

### 2.2.2 Présence d'eau souterraine

La présence d'eau est un élément important à déterminer lors de la conception d'un système avec géostructures énergétiques. En effet, il est préférable, voire indispensable que le sol soit saturé ou du moins partiellement saturé. Un terrain sec constituerait un cas critique pour lequel on ne pourrait garantir la rentabilité d'une installation. Selon Fromentin (Fromentin *et al.*, 1997), il serait même recommandé de renoncer à la mise en place de pieux échangeurs si aucun aquifère n'est mis en évidence dans le volume concerné par les fondations. Comme le montre le tableau 2.1, la conductibilité thermique pour un sol sec est d'environ cinq fois inférieure à celle d'un sol saturé. La résistance thermique du sol sec est donc trop grande et ne permet pas d'assurer une extraction de chaleur suffisante par l'intermédiaire des géostructures.

### 2.2.3 Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine

La vitesse d'écoulement d'une nappe d'eau souterraine dépend de la conductivité hydraulique du sol et du gradient de charges hydrauliques. On a :

$$v_D = k \cdot i$$

où :  $v_D$  : vitesse de Darcy ou vitesse d'écoulement de la nappe [m/s]  
 $k$  : conductivité hydraulique du sol [m/s]  
 $i$  : gradient hydraulique [-]

Un paramètre important est donc la conductivité hydraulique des sols qui dépend du type de sol et dont les valeurs sont indiquées dans le tableau 2.2.

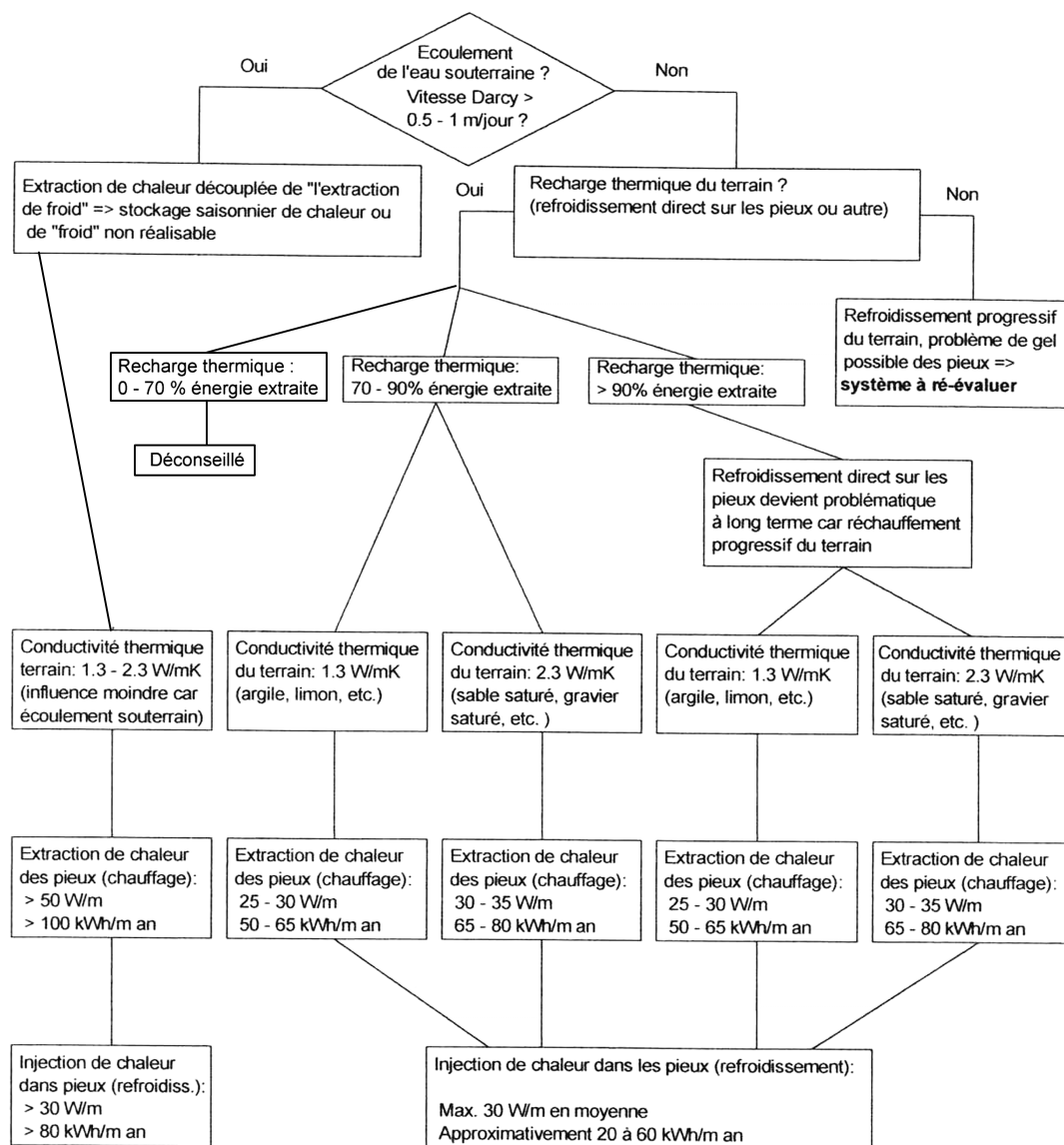
Type de sol	Conductivité hydraulique k [m/s]
Argile	$10^{-10} - 10^{-8}$
Limon	$10^{-8} - 10^{-5}$
Sable	$10^{-4} - 10^{-3}$
Gravier	$10^{-3} - 10^{-1}$

**Tableau 2.2 :** Conductivité hydraulique de divers types de sols (Source : Fromentin *et al.*, 1997)

Le gradient hydraulique de la nappe devra être déterminé au cas par cas et permettra ainsi, en combinaison avec la conductivité hydraulique des sols, de calculer la vitesse de Darcy.

On constate que la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine influence la régénération thermique du terrain. Il s'agit donc d'un critère qui permettra de déterminer si le stockage de chaleur ou de froid dans le sous-sol est nécessaire et rentable ou si la recharge thermique du sol s'effectue naturellement. Une valeur limite pour la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine a été définie pour un système de référence avec pieux échangeurs (Fromentin *et al.*, 1999). Bien entendu, cette valeur peut varier en fonction du système échangeur de chaleur (différents types de pieux ou parois), mais permet de donner un ordre de grandeur tout à fait valable pour un pré-dimensionnement lors d'un avant-projet. La valeur limite de la vitesse de Darcy est de 0.5 à 1 m/jour. Si l'écoulement est plus rapide que cette valeur, la recharge thermique s'effectue naturellement par le renouvellement de l'eau. Un stockage de chaleur ou de froid est en général irréalisable. Au contraire, une vitesse d'écoulement inférieure à cette limite rend la recharge thermique du terrain très souvent nécessaire pour maintenir à long terme une température constante dans le sol. Un système combiné de chauffage et climatisation permet de répondre à ces objectifs. La figure 2.3 montre une synthèse de ces différents cas et donne des valeurs d'extraction et d'injection de chaleur que l'on peut espérer pour des conductibilités thermiques du sol variables.

Ainsi, idéalement, pour un système combiné de chauffage et de refroidissement, il faut un faible écoulement de l'eau souterraine pour empêcher le gel du sol en hiver, mais cet écoulement doit être limité pour éviter la perte de l'énergie stockée. Dans ce cas, avec une recharge thermique de 70 à 90 % de l'énergie extraite et une conductivité thermique du terrain de 2.3 [W/mK] (correspondant à des sables ou graviers saturés), l'extraction de chaleur par les pieux est de 30 à 35 W par mètre linéaire de pieu échangeur ou de 65 à 80 [kWh/m an]. L'injection de chaleur dans les pieux (refroidissement) doit être d'au maximum 30 [W/m] en moyenne soit approximativement 20 à 60 [kWh/m an] (Fromentin *et al.*, 1999).



**Figure 2.3 :** Synthèse des différents cas selon la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine et valeurs d'extraction et d'injection de chaleur que l'on peut espérer pour des conductibilités thermiques du sol variables (Source : Fromentin et al., 1999)

## 2.3 Critères pouvant limiter la réalisation de géostructures énergétiques

Les différents points traités dans cette partie doivent être bien considérés puisqu'ils pourraient empêcher la réalisation de géostructures énergétiques même si tous les critères précédents y seraient favorables. Il s'agit des points suivants :

- 2.3.1 Protection des nappes souterraines
- 2.3.2 Effets thermiques
- 2.3.3 Barrages hydrauliques
- 2.3.4 Exécution des travaux

### 2.3.1 Protection des nappes souterraines

Les éventuelles sources de pollution d'une nappe souterraine par la réalisation de géostructures énergétiques sont de quatre types :

- Court-circuit entre aquifères
- Contamination provenant de la surface
- Contamination lors de la construction
- Fuites de liquide caloporteur

Cette pollution peut être provoquée principalement par les pieux et parois, mais aussi par les dalles en ce qui concerne le quatrième cas. De manière à limiter les risques de pollution de l'eau souterraine, la Confédération Suisse et les cantons ont édicté différentes lois et ordonnances. Les géostructures énergétiques doivent respecter cette législation, malgré le fait qu'elles n'y sont souvent pas encore intégrées, vu qu'il s'agit d'une nouvelle technologie. Les deux lois concernées sont la loi sur la protection de l'environnement du 7 octobre 1983 (LPE) et la loi sur la protection des eaux du 24 janvier 1991 (LEaux). L'ordonnance sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les polluer du 1<sup>er</sup> juillet 1998 (OPEL), découlant de ces lois, touche plus précisément notre étude. Plusieurs directives existant déjà pour les sondes géothermiques, on pourra se baser sur celles-ci, en les adaptant pour les géostructures énergétiques. Ceci nous mènera à donner des critères quant à la construction de géostructures énergétiques en fonction des secteurs de protection des eaux, ainsi que des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines.

#### 2.3.1.1 Court-circuit entre aquifères

Il n'est pas rare d'observer la superposition de deux aquifères, séparés par une couche imperméable. L'aquifère inférieur est en général un aquifère captif dont l'eau sous pression est souvent pauvre en oxygène et parfois fortement minéralisée, alors que l'aquifère supérieur, libre, peut être sujet à des pollutions provenant de la surface.

Dans une telle situation, lors du creusement d'une tranchée pour des parois énergétiques ou d'un forage pour les pieux moulés, on crée un contact entre les deux aquifères en perçant la couche imperméable les séparant. Il y aura donc mélange des eaux de ces deux nappes et risque de contaminations. Ce phénomène peut également se produire lors du battage des pieux, le contact entre les deux aquifères s'effectuant par les maigres espaces entre le sol et le pieu. Il existe des techniques d'étanchéification autour des pieux de manière à éviter des circulations entre les deux aquifères, mais on ne peut jamais garantir une efficacité totale de ces procédés. Il est donc conseillé de renoncer aux pieux et parois moulées dans de telles situations où deux aquifères pourraient être mis en contact. Selon l'article 43, al.3 LEaux, il est même interdit d'établir un contact entre deux aquifères, si ceci peut diminuer les réserves en eaux souterraines ou altérer leur qualité.

### 2.3.1.2 Contamination provenant de la surface

Les pieux ou parois constituent un chemin préférentiel pour les liquides s'infiltrant dans le sol. En effet, ils transpercent la couche de couverture de l'aquifère qui permet la filtration des eaux de surface. La protection de l'aquifère est donc affaiblie et il est envisageable que des substances polluantes puissent atteindre la nappe. De telles géostructures ne devraient donc pas être effectuées dans des nappes exploitées pour l'eau potable et particulièrement dans des sites contaminés, comme des anciennes décharges.

### 2.3.1.3 Contamination lors de la construction

Ce point ne concerne que les ouvrages construits à l'aide de bentonite, soit les parois moulées et les parois préfabriquées ainsi que partiellement les pieux moulés dans le sol et les rideaux de pieux. Les boues bentonitiques contenant souvent des adjuvants chimiques, elles peuvent, en effet, contaminer les eaux de l'aquifère traversé par l'excavation. Malgré tout, comme la bentonite forme une sorte d'écran étanche sur les parois de la fouille, le risque de pénétration des adjuvants dans la nappe reste faible.

### 2.3.1.4 Fuites de liquide caloporteur

Des fuites de liquide caloporteur sont peu probables, vu que les tubes sont en polyéthylène et qu'ils sont en général pris dans du béton. Malgré tout, elles ne peuvent être exclues. Selon l'article 8 de l'ordonnance sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les polluer (OPEL), il faut veiller à utiliser les liquides caloporteurs les moins polluants pour les eaux. Une liste des liquides autorisés est disponible auprès de l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEP). Si aucun risque de gel du fluide n'est à prévoir, il est recommandé d'utiliser simplement de l'eau.

### 2.3.1.5 Critères en fonction des secteurs de protection des eaux, ainsi que des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines

Toutes les considérations sur les risques de pollution citées ci-dessus ont mené la Confédération Helvétique à créer des limitations sur la réalisation de "circuits qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans les eaux ou le sol" (OFPE, 1977). Les géostructures énergétiques, au même titre que les sondes géothermiques, sont concernées par ces obligations qui découlent de l'ordonnance sur la protection des eaux contre les liquides pouvant les polluer (OPEL). Ces restrictions d'utilisation sont données suivant l'affectation du terrain comme secteur de protection des eaux, zone ou périmètre de protection des eaux souterraines (Tableau 2.4).

Zones S de protection des eaux souterraines			Périmètre de protection des eaux souterraines	Secteurs de protection des eaux		
S1	S2	S3		A	B	C
<b>non autorisé</b>		<b>autorisé</b>	<b>non autorisé</b>	<b>autorisé</b>	<b>autorisé</b>	<b>autorisé</b>
Art. 9 al.2 OPEL		Art. 9 al.3 OPEL	Art. 9 al.2 OPEL	Art. 9 OPEL		

**Tableau 2.4** : Restrictions d'utilisation des géostructures énergétiques suivant les secteurs de protection des eaux, les zones et périmètre de protection des eaux souterraines

Ainsi les géostructures énergétiques ne sont autorisées ni dans les zones S1 et S2 de protection des eaux souterraines, ni dans les périmètres de protection des eaux souterraines. Il est par contre autorisé de réaliser de telles installations dans les zones S3 de protection des eaux souterraines et dans tous les secteurs de protection des eaux. Dans la zone S3, certaines limitations doivent malgré tout être érigées en tenant compte des risques de pollution décrits dans les paragraphes précédents. Pour des captages d'eau très vulnérables, il est parfois plus prudent d'interdire les installations d'échangeurs de chaleur dans la zone S3 (Bapst *et al.*, 1994). De plus, dans les cas où les géostructures énergétiques sont autorisées, seuls des liquides caloporteurs autorisés peuvent être utilisés et des mesures de protection contre les fuites doivent être prises. Concernant les périmètres de protection des eaux souterraines, certaines dérogations à l'interdiction peuvent être accordées dans les cas où les données hydrogéologiques disponibles permettent de montrer que la construction ne se trouvera en aucun cas dans des futures zones S1 et S2.

Bien que les autorisations pour la construction de systèmes échangeurs de chaleur avec le sous-sol relèvent des cantons, les restrictions développées ci-dessus, qui ont un caractère obligatoire, constituent un critère très important dans un projet et peuvent aboutir à l'abandon de celui-ci ou du moins à sa modification.

### 2.3.2 Effets thermiques

L'exploitation des géostructures énergétiques crée des perturbations thermiques dans le sous-sol en refroidissant ou réchauffant le terrain et l'eau de la nappe souterraine autour des ouvrages. Ces perturbations thermiques peuvent engendrer des modifications de l'écoulement de l'aquifère. Par exemple, un refroidissement implique une augmentation de la viscosité de l'eau et de sa teneur en gaz dissous ainsi qu'une modification de ses caractéristiques chimiques et biologiques. Les effets de ces variations thermiques sont encore mal connus et difficiles à évaluer. Ainsi, par mesure de prudence et suivant les directives sur l'utilisation de la chaleur des eaux et du sol (OFPE, 1982), il faut veiller à ne pas modifier la température annuelle moyenne des eaux souterraines concernées de plus de 1°C. De plus, il est recommandé de ne pas autoriser l'utilisation de chaleur dans les zones et périmètres de protection des eaux souterraines (OFPE, 1982).

Un autre effet thermique est lié au court-circuit entre aquifères qui peut, dans le cas où la température des deux aquifères est différente, provoquer des perturbations de température dans ces nappes. Ici aussi, il est difficile d'évaluer ces effets et il est donc conseillé de renoncer aux géostructures dans ce cas, comme vu au paragraphe 2.3.1.1.

### **2.3.3 Barrages hydrauliques**

Ce point concerne uniquement les parois moulées et préfabriquées. Ces ouvrages ont en général pour but de créer une enceinte étanche permettant d'effectuer les sous-sols d'un bâtiment hors d'eau. L'écoulement de la nappe d'eau souterraine se trouve ainsi perturbé par ces géostructures qui forment ce que l'on appelle un barrage hydraulique. Dans certains cas, ce critère pourrait mener à l'abandon ou à la modification d'un projet si l'effet de barrage hydraulique modifie d'une façon trop importante l'écoulement souterrain.

### **2.3.4 Exécution des travaux**

Plusieurs méthodes de construction étant possibles pour chaque type de géostructure énergétique, différentes contraintes lors de la construction pourront favoriser l'une ou l'autre de ces méthodes de construction. Les principales contraintes sont le bruit et les vibrations qui peuvent parfois limiter le recours au battage de pieux préfabriqués. Une nouvelle méthode de fonçage des pieux préfabriqués permet l'enfoncement des pieux sans vibrations. Parfois l'accès à l'emplacement de la construction est également une contrainte qui limite le choix de la méthode de réalisation.

## **2.4 Synthèse**

De manière à synthétiser les différents critères permettant l'identification et la sélection des zones potentielles pour la réalisation de géostructures énergétiques, ces critères ont été regroupés dans un tableau et un organigramme. Le tableau 2.5 permet de montrer quelles sont les situations plutôt favorables ou alors défavorables à la réalisation de géostructures énergétiques. Comme déjà dit précédemment, les valeurs limites sont souvent difficiles à fixer et ce tableau a donc principalement un but indicatif. L'organigramme de la figure 2.6 essaie de donner une marche à suivre dans la réflexion sur l'éventualité de réalisation des géostructures énergétiques. En posant diverses questions en relation avec les critères, il permet d'aboutir à des conclusions négatives ou positives sur la réalisation de géostructures énergétiques ou alors propose des alternatives.

Le tableau 2.7, résume quant à lui les différents paramètres qu'il faut déterminer pour répondre aux critères présentés précédemment.

		Critères	Plutôt favorable à la réalisation de géostrucures énergétiques	Plutôt défavorable à la réalisation de géostrucures énergétiques
Critères conditionnant la réalisation de géostrucures	Aménagement du territoire (genre de construction)		Bâtiment locatif et administratif de taille importante	Bâtiment de petite taille, villa
	Caractéristiques mécaniques du sol	Charge admissible par le sol	De peu supérieure ou inférieure à la charge du bâtiment	Nettement supérieure à la charge du bâtiment
		Tenue du sol à l'excavation	Ne permettant pas une excavation sans soutènement	Permettant une excavation sans soutènement
Critères conditionnant l'équipement des géostrucures en échangeurs de chaleur	Conductibilité thermique		Supérieure à environ 1.3 [W/mK]	Inférieure à environ 1.3 [W/mK]
	Eau souterraine		Présence d'eau	Absence d'eau
	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine pour un cas sans recharge thermique		Supérieure à 0.5 - 1 [m/jour]	Inférieure à 0.5 - 1 [m/jour]
	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine pour un cas avec recharge thermique		Inférieure à 0.5 - 1 [m/jour]	Supérieure à 0.5 - 1 [m/jour]
Critères pouvant limiter la réalisation de géostrucures énergétiques	Protection des nappes souterraines		Autorisé dans les zones S3 de protection des eaux souterraines et les secteurs de protection des eaux	Non autorisé dans les zones S1 et S2 de protection des eaux souterraines et dans les périmètres de protection des eaux souterraines
	Effets thermiques		Perturbation moyenne annuelle de la température du sol inférieure à 1°C	Perturbation moyenne annuelle de la température du sol supérieure à 1°C
	Barrages hydrauliques		Faible modification de l'écoulement souterrain	Forte modification de l'écoulement souterrain
	Exécution des travaux		Faibles vibrations, peu de bruit	Beaucoup de vibrations et de bruit

**Tableau 2.5 :** Synthèse des différents critères avec évaluation plutôt favorable ou plutôt défavorable à la réalisation de géostrucures énergétiques

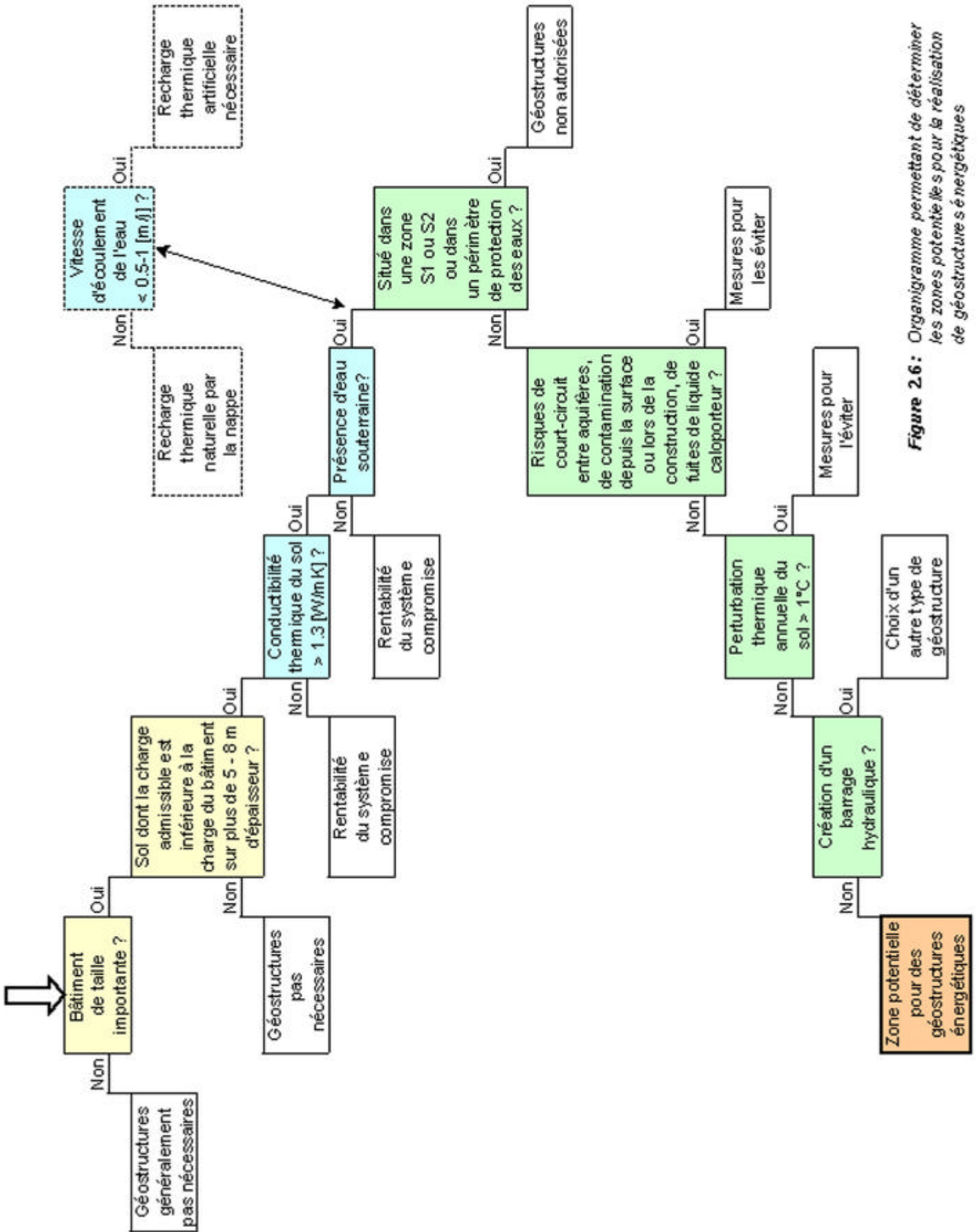


Figure 2.6 : Organigramme permettant de déterminer les zones potentielles pour la réalisation de géostrucures énergétiques

Critères	Paramètres à déterminer
Critères conditionnant la réalisation de géostructures	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Genre de construction</li> <li>- Caractéristiques mécaniques du sol (résistance à la compression simple, angle de frottement interne et cohésion,...)</li> </ul>
Critères conditionnant l'équipement des géostructures en échangeurs de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Caractéristiques de l'aquifère (profondeur, épaisseur, gradient et vitesse d'écoulement)</li> <li>- Caractéristiques thermiques du sous-sol (conductibilité thermique et capacité thermique volumique)</li> </ul>
Critères pouvant limiter la réalisation de géostructures énergétiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eventualité de courts-circuits entre aquifères, de contamination de l'aquifère ou de formation d'un barrage hydraulique.</li> <li>- Emplacement du site vis-à-vis des secteurs de protection des eaux, ainsi que des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines.</li> <li>- Evaluation de la perturbation thermique.</li> </ul>

**Tableau 2.7 :** Paramètres permettant de répondre aux critères d'identification et de sélection des zones potentielles.

Ainsi, en conclusion, on constate qu'en général une zone favorable à l'implantation de géostructures énergétiques est une zone où il est prévu de construire des bâtiments de taille importante et dont les caractéristiques mécaniques du sol montrent une faible portance sur une épaisseur de plus de 5 à 8 m depuis la surface. De plus la conductibilité thermique du sous-sol devrait être supérieure à environ 1.3 [W/mK]. La présence d'eau souterraine est aussi fortement souhaitée. Il est par contre interdit de réaliser des géostructures énergétiques dans les zones S1 et S2 ainsi que les périmètres de protection des eaux souterraines. Tout risque de court-circuit entre aquifères et de contamination depuis la surface, lors de la construction ou par une fuite de liquides caloporteurs doit être réduit au maximum. Enfin, il faut éviter la création d'un barrage hydraulique et limiter les vibrations et le bruit lors de la construction.



## **3. Présentation des différents sites étudiés dans le canton de Genève**

La deuxième partie de ce travail a été consacrée à l'application des critères sur des sites dans le canton de Genève. Il a donc été nécessaire de trouver des sites propices à cette application. Ce chapitre développe premièrement la démarche de recherche de ces sites puis donne un aperçu de la géologie genevoise avant de décrire les différents sites retenus et étudiés. Sa structure est donc la suivante :

- 3.1 Démarche de recherche des sites
- 3.2 Introduction à la géologie genevoise
- 3.3 PAC de Sécheron
- 3.4 PAC de Bernex - Est
- 3.5 PAC de La Chapelle - Les Sciers
- 3.6 PAC de la Gare des Eaux - Vives
- 3.7 PAC de Frontenex - Gradelle
- 3.8 PAC de Mon Idée - Communaux d'Ambilly
- 3.9 Synthèse des sites étudiés

### **3.1 Démarche de recherche des sites**

Pour cette recherche de sites, il est très vite apparu qu'il fallait se soucier de la géologie de manière à trouver une zone avec des terrains à faible portance sur une épaisseur suffisante et également de l'aménagement du territoire pour connaître les zones en développement et le genre de bâtiment. Ainsi nous avons pris contact à Genève avec le service cantonal de géologie ainsi que le service du plan directeur de la division de l'aménagement cantonal et régional.

Une première séance a eu lieu avec ces services ainsi que le service cantonal de l'énergie pour introduire le sujet et pour prendre connaissances des documents et informations disponibles au canton. Ces documents et particulièrement le plan directeur cantonal "Genève 2015" (DAEL, 2001) ont permis de cibler la recherche sur des zones limitées. Nous avons, en effet, choisi de prendre les périmètres d'aménagement coordonné (PAC) comme base de notre recherche. Ces périmètres sont destinés à un développement important dans les prochaines années et dans plusieurs cas, il est prévu d'y construire des bâtiments de grande taille correspondant au genre de construction pouvant avoir recours à des géostructures énergétiques.

Pour déterminer la géologie de chacun des périmètres choisis, nous avons consulté des relevés de sondages au service cantonal de géologie. Les paramètres importants sont bien sûr la lithologie, mais aussi l'épaisseur des différentes couches, la compacité et l'assise de celles-ci, les valeurs des sondages SPT (Standard Penetration Test) et la présence d'eau. Quelques périmètres ont d'emblée pu être écartés de l'étude à cause d'une géologie qui excluait la réalisation de géostructures.

Pour les autres PAC, il est apparu qu'il fallait examiner un maximum de sondages puisque la géologie genevoise est localement très variable.

Une nouvelle séance avec le service du plan directeur a permis de préciser le type de projet et les limites des périmètres d'aménagement coordonné. Certaines zones ont dû être exclues, alors que d'autres nécessitaient des compléments au niveau géologique. De nombreux sondages ont donc été à nouveau consultés au service cantonal de géologie.

Ainsi, la comparaison de ces deux informations principales (géologie et aménagement du territoire) et la discussion avec les services cantonaux concernés ont permis de trouver, finalement, des zones potentielles pour la réalisation de géostructures énergétiques dans le canton de Genève.

Les différentes zones étudiées lors de cette démarche de recherche sont décrites dans les chapitres 3.3 à 3.8. La carte 3.1 situe ces six zones.

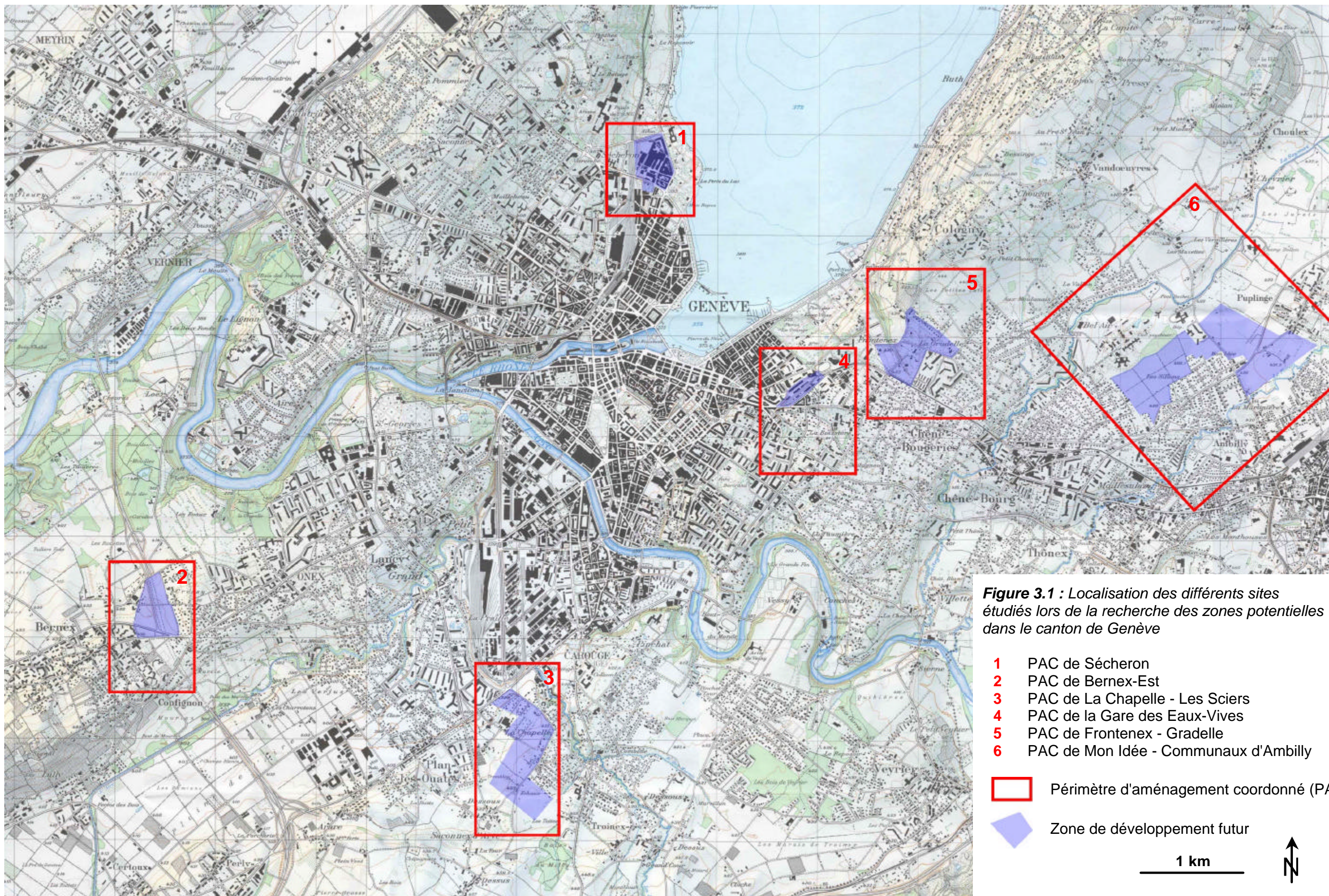
## 3.2 Introduction à la géologie genevoise

De manière générale, on peut résumer la géologie genevoise comme une superposition de dépôts glaciaires du Würm sur des formations molassiques du Chattien. Dans le détail, on observe la succession suivante du plus ancien au plus récent :

- Le **substratum rocheux molassique** qui se subdivise en différentes unités dont les principales sont :
  - La *molasse rouge du Chattien inférieur* formée de grès micacés, marnes et calcaires marneux.
  - La *molasse grise à gypse du Chattien supérieur* formée de marnes et calcaires marneux avec bancs de gypse.


On trouve également de la molasse du Rupélien (Lombard & Paréjas, 1965) et de l'Aquitaniens (Ruchat, 1989).


- Les **terrains glaciaires attribués au Riss** composés de *moraine à cailloux et blocaux alpins* et de *formations de retrait*.
- Les **terrains glaciaires du Würm** qui se divisent en plusieurs formations qui sont :
  - Les *cailloutis morainiques profonds* ou "*alluvion ancienne*" qui sont le plus souvent des graviers sablo-limoneux, de compacité élevée et qui renferment la plupart des nappes souterraines de taille importante du canton de Genève.
  - La *moraine à cailloux et blocaux alpins* principalement limono-argileuse et parfois plus sableuse, de compacité variable.
  - Les *formations supraglaciaires de retrait* qui montrent des phases à prédominance de graviers et de sables, mais qui sont le plus souvent composées principalement de limons, limons-argileux ou argiles. La compacité de ces formations est très variable.



**Figure 3.1 :** Localisation des différents sites étudiés lors de la recherche des zones potentielles dans le canton de Genève

- 1 PAC de Sécheron
- 2 PAC de Bernex-Est
- 3 PAC de La Chapelle - Les Sciers
- 4 PAC de la Gare des Eaux-Vives
- 5 PAC de Frontenex - Gradelle
- 6 PAC de Mon Idée - Communaux d'Ambilly

 Périmètre d'aménagement coordonné (PAC)

 Zone de développement futur

 1 km



- Les **terrains Holocènes et récents** formés d'alluvions, colluvions, éboulis et remblais et qui recouvrent partiellement les formations sous-jacentes.

Ces diverses formations ne se succèdent pas en couches uniformes et horizontales. Elles ne sont en effet pas présentes sur l'ensemble du canton et leur épaisseur varie fortement. Le toit de la molasse montre des surcreusements et des dômes où la molasse est subaffleurante. Les surcreusements sont les endroits où l'on retrouve principalement les graviers de l'alluvion ancienne. Les dépôts morainiques et de retrait würmien recouvrent quant à eux ces graviers ou directement la molasse et montrent aussi des variations importantes d'épaisseur.

On retrouve ces différentes formations dans les relevés de sondages consultés au service cantonal de géologie (Chapitres 3.3 à 3.8). Cette description géologique est basée sur différentes cartes de l'Atlas Géologique Suisse au 1 : 25'000 (feuilles 1281, 1300 et 1301) et sur les cartes géologiques et géotechniques du canton de Genève au 1 : 5'000.

### 3.3 PAC de Sécheron

Le PAC de Sécheron englobe l'ancienne zone industrielle située au nord-est de la Gare de Cornavin. Elle nécessite un réaménagement complet avec pour but d'y construire des bâtiments d'activités principalement.

De nombreux sondages ont été effectués dans cette zone et permettent d'obtenir une bonne idée de la géologie. Sous les remblais superficiels, on trouve en général une épaisseur de quelques mètres de limons argileux semi-consolidés à consolidés des formations supraglaciaires du retrait würmien. L'assise de cette couche est de consistance peu élevée dans le quart nord-est du site, alors qu'elle est de consistance élevée dans le reste du terrain (Ruchat, 1985). Au-dessous, on a une dizaine de mètres d'argiles, limons ou limons argileux de la moraine würmienne à cailloux et blocs alpins. Leur assise est de consistance élevée. Cette formation repose parfois directement sur la molasse rouge du chattien inférieur, alors que d'autres fois s'intercale encore une petite couche de graviers faisant partie de la formation des cailloutis morainiques profonds (alluvion ancienne). Ces différentes couches ont des épaisseurs assez variables sur le site et certaines sont parfois absentes. La consistance de ces dernières est aussi variable. Elle est en général plutôt élevée, mais un sondage montrait une épaisseur de 10 m de limons argileux peu consolidés dans la partie nord-est du site. Le toit de la molasse est situé plus ou moins profondément. Dans la partie nord du site (bâtiment de l'OMM) on trouve la molasse à plus de 20 m voire 30 m de profondeur. Sous les anciens ateliers Sécheron, elle est atteinte entre 10 et 20 m de profondeur, alors qu'au sud de la zone sa profondeur est inférieure à 10 m.

Au niveau hydrogéologique, la zone ne possède pas de nappe souterraine, sauf dans son extrémité nord-est où une nappe d'épaisseur inférieure à 10 m et de transmissivité moyenne est observée (DIAE, 2002).

Ces données géologiques et hydrogéologiques montrent que sur la majeure partie du site il est peu probable qu'il soit nécessaire de réaliser des fondations profondes.

En effet, les terrains sont la plupart du temps de bonne portance et la molasse n'est pas très profonde dans la moitié sud du site. Malgré tout, il n'est pas exclu que dans la partie nord-est du site des géostructures doivent être réalisées et, dans ce cas, il faudrait se poser la question de l'éventualité d'équiper ces dernières en échangeurs de chaleur en appliquant les divers critères.

### **3.4 PAC de Bernex - Est**

Situé à l'est du village de Bernex, à proximité de la sortie d'autoroute, cette zone agricole pourrait constituer une extension urbaine par l'implantation d'activités. Malheureusement pour notre étude, le site se trouve sur un dôme de molasse et les sondages montrent que la première dizaine de mètres est constituée d'une moraine graveleuse et de graviers avant d'atteindre les grès molassiques. De plus, la carte hydrogéologique (DIAE, 2002) nous indique qu'aucune nappe souterraine n'est présente.

Ce site n'est donc pas une zone propice à la réalisation de géostructures énergétiques.

### **3.5 PAC de La Chapelle - Les Sciens**

Ce PAC se situe au sud de la gare marchandise de la Praille et est composé par une frange de zone agricole, par des jardins et par des bâtiments d'activités (Fig. 3.2). Un développement essentiellement par des logements est prévu au sud du dépôt des transports publics genevois, alors que de grands bâtiments pourraient être construits au sud-ouest de ce dépôt.

Les sondages d'une profondeur supérieure à 10 m sont assez rares dans cette zone. La partie sud du site, en zone agricole ne contient par exemple pas de forages. Malgré tout, les 8 sondages examinés, situés dans la partie nord du site, permettent les observations suivantes. Depuis la surface, on trouve d'abord une épaisse couche de limons argileux ou argiles non-consolidés des formations supraglaciaires du retrait würmien. Son assise est de consistance peu élevée. Cette couche semble plus importante dans la partie nord-ouest entre la route de Saint-Julien et les chemins de Trèfle et du Gui. Elle peut y atteindre des épaisseurs de 30 voire 40 m, alors que plus au sud-est, elle se réduit à environ 10 m d'épaisseur. Au-dessous, on observe en général quelques mètres de moraine würmienne limono-argileuse plus compacte avec une assise de consistance élevée. Enfin, quelques forages ont atteint les cailloutis morainiques profonds (alluvion ancienne) formés de graviers compacts.

La carte hydrogéologique du canton (DIAE, 2002) et les forages, montrent sur toute la zone une nappe principale à forte épaisseur et de transmissivité élevée ( $> 5 \cdot 10^{-2}$  [m<sup>2</sup>/s]). Il s'agit de la "nappe du genevois" qui est exploitée pour l'eau potable du canton de Genève. Celle-ci se trouve dans les graviers de l'alluvion ancienne. Au nord de la route de Saint-Julien, une nappe superficielle de faible épaisseur est présente à partir de quelques mètres de profondeur. Elle est séparée de la nappe du genevois par l'épaisse couche de limons argileux.



**Figure 3.2 :** Périmètre d'aménagement coordonné de La Chapelle - Les Sciens

Ces premières données nous indiquent que ce site pourrait être favorable à la réalisation de géostructures énergétiques. Il constitue donc une zone potentielle et il sera retenu comme un site pilote pour lequel les différents critères seront appliqués (Chapitre 4.1).

### **3.6 PAC de la Gare des Eaux - Vives**

Ce périmètre d'aménagement coordonné a été créé dans le cadre du réaménagement du secteur de la gare SNCF des Eaux-Vives (Fig. 3.3). Cette zone constitue un des derniers grands potentiels à bâtir au centre ville de Genève. La perspective d'y réaliser une station du raccordement ferroviaire Cornavin - Eaux-Vives - Annemasse (CEVA) implique le développement d'un pôle d'activités et d'équipements ainsi que d'une interface de transports publics.

Etant donné qu'aucun forage n'a été réalisé sur la parcelle de la gare des Eaux-Vives, nous nous sommes basés sur les sondages les plus proches et sur la carte géologique et géotechnique du canton de Genève (Ruchat, 1987). Depuis la surface, apparaît d'abord une couche limono-argileuse faisant partie des formations supraglaciaires du retrait würmien. Son assise de consistance élevée en général, devient peu élevée avec la profondeur aux extrémités sud-ouest, sud-est et nord-est du site. Dans la partie centrale du terrain, sous les limons argileux de consistance élevée, on a 3 à 5 m de moraine würmienne limono-argileuse de compacité moyenne à élevée. A partir d'une profondeur d'une dizaine de mètres, on trouve, sur toute la surface du terrain, les graviers compacts de l'alluvion ancienne.



**Figure 3.3 :** Périmètre d'aménagement coordonné de la Gare des Eaux - Vives

Aucun forage n'a atteint la nappe souterraine dans les graviers de l'alluvion ancienne, la profondeur des forages étant limitée à 15-20 m. Ainsi la nappe du genevois, qui a une grande épaisseur et une transmissivité élevée selon la carte hydrogéologique (DIAE, 2002), se situe à plus de 15 à 20 m de profondeur. Deux forages dans la partie est du site ont rencontré une nappe temporaire de surface entre 2 et 3.5 m de profondeur.

Ces différentes informations nous indiquent que le site pourrait éventuellement être une zone potentielle pour les géostructures énergétiques. On pourrait, en effet, imaginer qu'il serait nécessaire de faire des parois moulées pour une excavation profonde. Par contre, il est peu probable que des pieux doivent être réalisés, vu l'épaisseur restreinte des terrains de faible portance. Ainsi, dans le cas où des géostructures seraient construites sur le site, il faudrait réfléchir à l'éventualité de les équiper en échangeurs de chaleur. Les critères d'identification et de sélection serviront alors d'aide à la décision.

### **3.7 PAC de Frontenex - Gradelle**

Ce site s'étend du stade de Frontenex aux grands immeubles de la Gradelle, à l'est de la gare des Eaux-Vives. Il se trouve actuellement en 5<sup>e</sup> zone (villas), mais n'est que partiellement construit. En effet, des terrains de sport et des prés recouvrent la majeure partie de sa surface (Fig. 3.4). Sa densification permettra de créer un nouveau quartier urbain d'affectation mixte. Un établissement scolaire, des bâtiments locatifs de 5 à 6 étages et des bâtiments d'activités (secteur tertiaire) devraient y être construits.



**Figure 3.4 :** Périmètre d'aménagement coordonné de Frontenex - Gradelle

Comme peu de sondages se trouvent sur le site de Frontenex - Gradelle, nous avons complété les informations des logs de forages par celles de la carte géologique et géotechnique (Ruchat, 1987). Le site peut être divisé en deux parties en fonction de la géologie du sous-sol.

La partie sud-ouest (localisation sur la figure 4.6 du chapitre 4) du site est formée par une alternance de sables, limons et limons argileux sur une épaisseur de 20 m et plus. Ces dépôts des formations supraglaciaires du retrait würmien ont une compacité moyenne à faible et une consistance tendre à molle. Des essais au pénétromètre de poche sur des échantillons ont montré des valeurs de résistance à la compression simple de 50 à 75 [kPa]. De plus des sondages SPT en fond de trou donnent des valeurs de 3 à 12 coups pour 20 cm d'enfoncement. Les forages n'ont pas atteint une profondeur suffisante pour déterminer la formation sous-jacente.

La partie nord-est est composée d'un dépôt morainique würmien sur une épaisseur d'une vingtaine de mètres au moins (ici aussi les forages n'ont pas atteint la formation sous-jacente). Il s'agit de limons argileux avec cailloux et blocs dont la consistance est la plupart du temps dure, mais aussi par endroits tendre à ferme. La résistance à la compression simple au pénétromètre de poche est de 250 à 350 [kPa].

Les sondages et la carte hydrogéologique (DIAE, 2002) montrent qu'une nappe temporaire est présente dans la partie sud-ouest du site à une profondeur variant entre 3 et 6 m. La moraine würmienne de la partie nord-est ne contient aucune nappe souterraine.

Ces éléments permettent de considérer ce site, ou du moins sa partie sud-ouest, comme une zone potentielle à la réalisation de géostructures énergétiques. On le

retiendra donc comme un site pilote et on y appliquera les différents critères (Chapitre 4.2).

### 3.8 PAC de Mon Idée - Communaux d'Ambilly

Ce dernier périmètre d'aménagement coordonné couvre une surface importante entre Chêne-Bourg et Puplinge, au sud de la clinique de Bel Air. La partie à l'ouest de la route de Mon-Idee, actuellement en 5<sup>e</sup> zone (villas), mais sans constructions, constituera la première phase de développement (Fig. 3.5). Suivra ensuite la partie à l'est de la route de Mon-Idee qui est pour l'instant en zone agricole (Fig. 3.6). Ainsi deux quartiers d'affectation mixte (logements, bureaux, commerces) pourront être progressivement constitués.



**Figure 3.5 :** *Partie ouest du périmètre d'aménagement coordonné de Mon Idée - Communaux d'Ambilly*

Ce site étant entièrement recouvert d'exploitations agricoles, le nombre de forage y est restreint et leur profondeur est limitée à une dizaine de mètres. Malgré tout, nous avons pu tirer les informations suivantes. Toute la zone se trouve sur une moraine würmienne très épaisse (70 m selon le forage géothermique au sud de Bel Air). Cette moraine est formée de limons argileux ou d'argiles suivant les endroits. Parfois, et notamment au sud de la route de Puplinge, on observe des dépôts graveleux ou limono-argileux du retrait würmien au-dessus de la moraine. La consistance des dépôts morainiques varie fortement de tendre jusqu'à dure à très dure suivant les forages et la profondeur.

Dans la partie est du site, on observe une nappe superficielle peu épaisse à une profondeur de 3 à 4 m. Le reste de la zone n'accueille aucune nappe souterraine.



**Figure 3.6 :** Partie est du périmètre d'aménagement coordonné de Mon Idée - Communaux d'Ambilly

On constate que les données géologiques ne sont pas très denses et surtout que la profondeur d'investigation est très faible. Il est donc difficile de se prononcer sur la nécessité de géostructures si l'on ne connaît pas les caractéristiques mécaniques du sol à plus de 10 m de profondeur. Comme certains forages ont traversé des dépôts tendres de compacité peu élevée, on peut imaginer qu'il sera nécessaire dans ces endroits d'effectuer des géostructures. Dans ce cas, il faudra appliquer les critères pour déterminer si la zone est favorable aux géostructures énergétiques. Il semblerait que la partie nord-est du site soit la plus propice, au vu des sondages (argile limoneuse assez molle) et de la présence d'une nappe superficielle.

### 3.9 Synthèse des sites étudiés

Le tableau 3.7 résume pour chaque site les informations géologiques et hydrogéologiques qui ont permis la détermination des zones potentielles.

Site étudié	Informations géologiques et hydrogéologiques	Zone potentielle pour des géostructures énergétiques ?
PAC de Sécheron	Limons argileux de consistance élevée sur molasse sauf dans la partie nord-est où les limons argileux sont de consistance peu élevée. Nappe souterraine dans la partie nord-est	La partie nord-est pourrait éventuellement être une zone potentielle, vu la faible consistance des dépôts

PAC de Bernex - Est	Moraine graveleuse et graviers sur molasse. Pas de nappe souterraine	Le site ne constitue pas une zone potentielle
PAC de La Chapelle - Les Sciens	Epaisse couche de limons argileux de consistance peu élevée sur graviers. Nappe profonde dans les graviers sur tout le site. Dans la partie nord, nappe superficielle	Au vu de la géologie, ce site est une zone potentielle et est retenu comme <b>site pilote</b>
PAC de la Gare des Eaux - Vives	Limons argileux de consistance élevée sur graviers. Aux extrémités sud-ouest, sud-est et nord-est, la consistance des limons argileux devient peu élevée avec la profondeur. En profondeur (plus de 15-20m) nappe souterraine importante. Nappe temporaire peu profonde dans la partie est du site	Les extrémités sud-ouest, sud-est et nord-est du site pourraient être une zone potentielle
PAC de Frontenex - Gradelle	Partie sud-ouest constituée d'une alternance de sables, limons et limons argileux de consistance peu élevée. Partie nord-est composée d'un dépôt morainique limono-argileux à cailloux, dure parfois tendre à ferme. Nappe temporaire dans la partie sud-ouest	Ce site ou du moins sa partie sud-ouest est une zone potentielle et est choisi comme <b>site pilote</b>
PAC de Mon Idée - Communaux d'Ambilly	Moraine limono-argileuse ou argileuse de consistance peu élevée au nord-est du site et plus élevée dans le reste du site. Nappe superficielle dans la partie est du site	Peu de données, mais la partie nord-est du site pourrait constituer une zone potentielle

**Tableau 3.7 :** Résumé des informations géologiques et hydrogéologiques pour la détermination des zones potentielles

Ainsi, sur les six sites étudiés, cinq pourraient constituer, du moins en partie, une zone potentielle pour la réalisation de géostructures énergétiques. Deux sites nous ont paru plus favorables et ont été retenus comme sites pilotes. De plus, ces deux sites sont assez différents du point de vue hydrogéologique et permettront ainsi de discuter deux cas bien différents. Ces deux sites pilotes sont les PAC de La Chapelle - Les Sciens et de Frontenex - Gradelle.

## 4. Application des critères aux deux sites pilotes

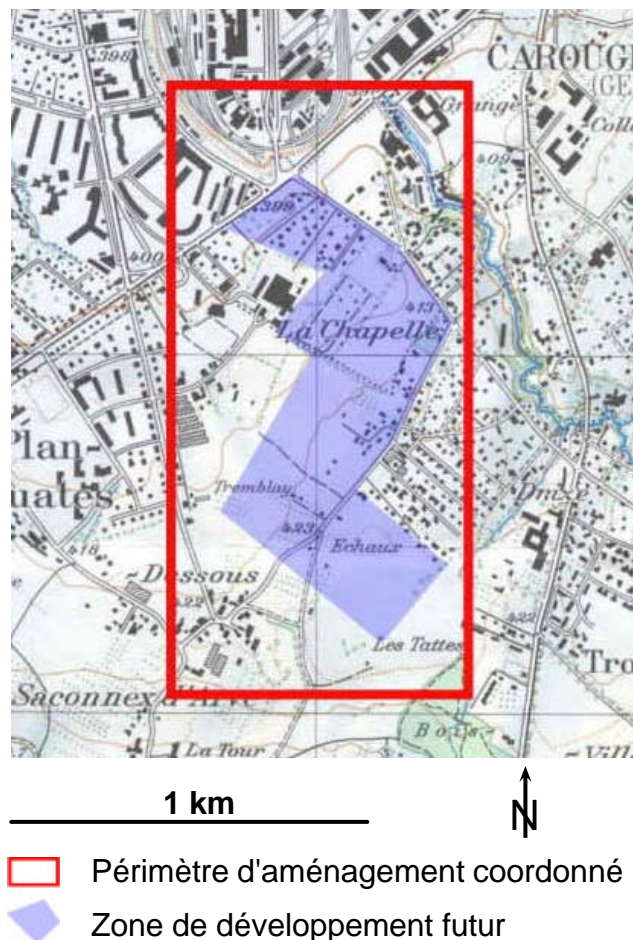
Les deux sites pilotes sélectionnés parmi les six sites étudiés sont décrits en détail dans ce chapitre et les différents critères, définis au chapitre 2, y sont appliqués. Ce chapitre se structure donc comme suit :

- 4.1 Site pilote du PAC de La Chapelle - Les Sciens
- 4.2 Site pilote du PAC de Frontenex - Grabelle
- 4.3 Synthèse

### 4.1 Site pilote du PAC de La Chapelle - Les Sciens

#### 4.1.1 Généralités

Rappelons que ce périmètre d'aménagement coordonné se situe au sud de la gare marchandise de la Praille sur les communes de Lancy et de Plan-les-Ouates (Carte 4.1). Une vue aérienne du site montre que ce dernier est actuellement composé principalement par des zones agricoles et des jardins et également par des bâtiments d'activités et des villas (Fig. 4.2).



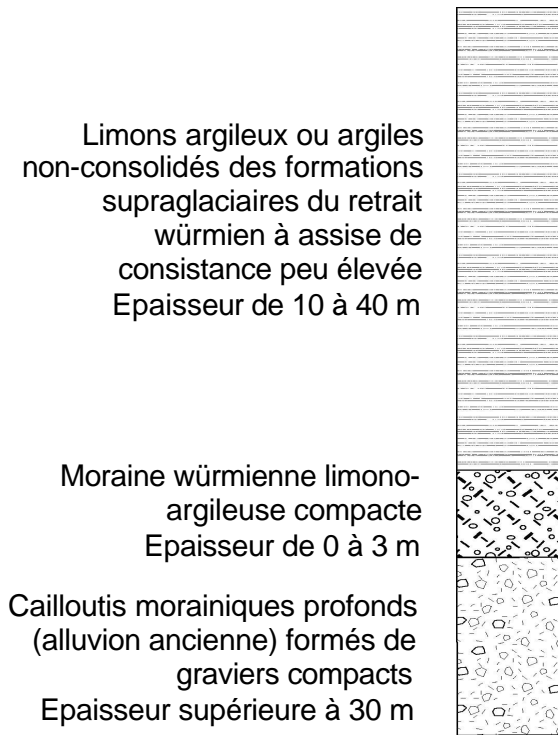
**Carte 4.1 :** Localisation du périmètre d'aménagement coordonné de La Chapelle - Les Sciens (Reproduit avec l'autorisation de l'office fédéral de topographie BA 024619)



**Figure 4.2 :** Partie nord de la zone de développement futur du périmètre d'aménagement coordonné de La Chapelle - Les Sciers, délimitée en rouge sur cette vue aérienne. Les sondages ayant atteint les graviers de l'alluvion ancienne sont représentés par des croix bleues avec indication de la profondeur de l'interface.

(Reproduit avec l'autorisation de la division de l'aménagement cantonal et régional de Genève)

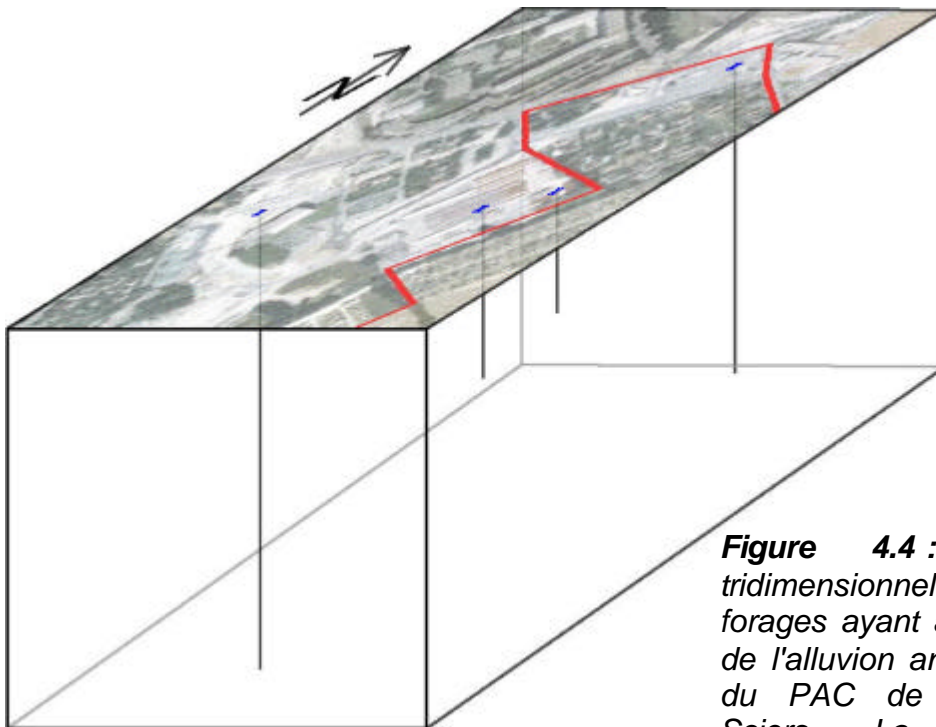
Les quelques sondages situés dans la partie nord du périmètre d'aménagement coordonné ne permettent pas d'obtenir une interprétation géologique tridimensionnelle rigoureuse du sous-sol. Ils permettent malgré tout de connaître la succession verticale des différentes couches présentes (Fig. 4.3). Comme déjà vu au paragraphe 3.5, on observe, à partir de la surface, une épaisse couche de limons argileux ou argiles non-consolidés des formations supraglaciaires du retrait würmien à assise de consistance peu élevée. Sous cette couche on trouve en général un niveau peu épais de moraine würmienne limono-argileuse plus compacte avant d'atteindre les graviers de l'alluvion ancienne. Seuls quatre forages ont atteint ces graviers et ceci à des profondeurs très variables comme le montre les figures 4.2 et 4.4. Il est ainsi difficile d'imaginer la forme de l'interface entre les graviers et la couche sus-jacente, mais il semblerait que cette interface soit plus profonde dans la partie nord-ouest, où elle atteint une profondeur de 40 m, que plus au sud-est, où on



trouve les graviers à une profondeur d'une dizaine de mètres seulement. On peut donc considérer comme raisonnable de supposer un pendage de cette interface vers le nord-ouest.

Selon la carte hydrogéologique du canton (DIAE, 2002), la nappe du genevois se trouverait en moyenne à une profondeur de 25 à 35 m dans la partie nord du PAC, soit à 373.5 m d'altitude. Ainsi cette dernière serait une nappe captive dans l'extrémité nord-ouest et une nappe libre avec une forte épaisseur sus-jacente de graviers non-saturés dans la partie située plus au sud-est.

**Figure 4.3 :** Représentation schématique de la succession verticale des différentes formations présentes sur le site du PAC de La Chapelle-Les Sciens



**Figure 4.4 :** Représentation tridimensionnelle des quatre forages ayant atteint les graviers de l'alluvion ancienne sur le site du PAC de La Chapelle-Les Sciens. La profondeur de l'interface correspond à la longueur des traits représentant les forages. Echelle verticale exagérée.

## 4.1.2 Application des critères

Tous les critères appliqués à ce site pilote sont développés séparément ci-dessous.

### 4.1.2.1 Aménagement du territoire

Etant donné que le site pilote a été choisi dans une zone de développement futur, il est implicite que des bâtiments de taille importante seront construits sur ce site.

Pour cette étude, on admet qu'un bâtiment de 8 étages avec un seul sous-sol et des dimensions de 50 m de longueur par 15 m de largeur sera construit. En prenant une moyenne de 1 tonne par mètre carré et par étage pour la charge du bâtiment sur le sol, on a, dans notre cas, une charge sur le sol de 9 [t/m<sup>2</sup>], soit 0.09 [MN/m<sup>2</sup>].

### 4.1.2.2 Caractéristiques mécaniques du sol

Comme vu précédemment, le site pilote présente un terrain limono-argileux peu compact sur une épaisseur assez importante. Des sondages SPT ont été effectués sur certains forages et nous donnent en moyenne des valeurs de 10 coups pour 20 cm d'enfoncement. Le taux de travail admissible par le sol peut être évalué à partir de ces données. Il vaut un centième du nombre de coups soit ici  $10/100 = 0.1$  [MN/m<sup>2</sup>].

En comparant le taux de travail admissible par le sol (limons argileux) et la charge transmise par le bâtiment sur le sol, on constate que cette dernière est de peu inférieure à la première. Ceci nous indique qu'il est nécessaire de répartir la charge du bâtiment sur la quasi totalité de la surface du sol. Donc une solution par fondation sur semelle est exclue et il est nécessaire de recourir à un radier général ou à des pieux.

La surface du bâtiment étant de 750 m<sup>2</sup>, la solution avec pieux pourrait nécessiter, par exemple, la réalisation de 30 pieux espacés d'environ 5 m. La surface reprise par pieu est donc de 25 m<sup>2</sup> et la charge de 225 tonnes ou 2.25 [MN]. Cette charge sur les pieux est tout à fait dans les normes vu que, par exemple, les pieux préfabriqués GRAM peuvent reprendre entre 20 et 1000 tonnes.

Pour l'option avec radier général, l'épaisseur de la dalle de béton armé peut être estimée entre 60 et 80 cm, en considérant le report des charges du bâtiment par des piliers répartis sur un maillage de 5 m d'espacement.

### 4.1.2.3 Caractéristiques thermiques du sol et présence d'eau souterraine

Ces deux critères étant liés entre eux, ils seront traités ensemble dans ce paragraphe.

On peut admettre de manière réaliste une présence d'eau dans le sol de telle manière que ce dernier puisse être considéré comme dans un état proche de la saturation. Le tableau 2.1 du chapitre 2, nous donne ainsi une conductibilité thermique pour les limons argileux de l'ordre de 1.7 [W/mK] et une capacité thermique volumique de 2.3 [MJ/m<sup>3</sup>K].

En fonction de ces valeurs, on peut admettre une puissance d'extraction de la chaleur du sol d'environ 35 [W] par mètre de pieu (Fromentin *et al.*, 1997). La puissance totale extractible pour les 30 pieux serait donc de 26'250 [W], si l'on considère une longueur active moyenne des pieux de 25 m. L'énergie extractible correspondante est estimée à 70 [kWh] par mètre de pieu et par année ou 252 [MJ]

par mètre de pieu et par année. Pour les 30 pieux, ceci correspond à une énergie de 189'000 [MJ] par année. Pour notre bâtiment, on estime, selon la norme SIA 380/1, un besoin énergétique pour le chauffage de 200 [MJ] par mètre carré de plancher et par année. Ainsi, dans cet exemple, on constate que l'énergie disponible par les pieux énergétiques participe pour environ un sixième aux besoins énergétiques du bâtiment. En d'autres termes, un mètre de pieu permet de chauffer environ 1.25 m<sup>2</sup> de plancher. L'apport énergétique par les pieux est donc significatif et pourrait prendre une plus grande importance si les besoins en énergie du bâtiment étaient réduits de manière à respecter des normes plus exigeantes, comme la norme Minergie.

Pour l'option avec radier général, des valeurs types de puissance d'extraction ne sont pas disponibles, mais celles-ci sont inférieures au cas des pieux énergétiques. Deux raisons principales sont à l'origine de ces performances plus faibles. Premièrement, la surface en contact avec le sol est bien plus faible dans le cas d'une dalle que pour des pieux. De plus, le volume de terrain permettant l'échange de chaleur est fortement réduit dans le cas avec radier général puisqu'il se limite aux quelques mètres au-dessous de la dalle. Deuxièmement, la profondeur d'une dalle étant généralement inférieure à celle de pieux, la température du sol sera plus faible en hiver et les variations saisonnières de cette température seront plus marquées. Ainsi l'option avec dalle énergétique est moins performante que celle avec pieux énergétiques, mais sa faisabilité devrait malgré tout être évaluée.

#### 4.1.2.4 Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine

Aucune mesure de la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine dans les limons argileux du retrait würmien n'est disponible, mais au vu de la nature du sol, on imagine que sa conductivité hydraulique est faible tout comme sa vitesse d'écoulement. Ainsi, on tombe dans le cas où une recharge thermique du sol serait nécessaire pour maintenir à long terme une température constante dans le sol.

#### 4.1.2.5 Protection des nappes souterraines

Comme vu précédemment, la nappe souterraine du genevois est présente dans les graviers de l'alluvion ancienne sous les couches imperméables du retrait würmien. Cette nappe constitue la ressource principale en eau potable pour le canton de Genève. Elle doit donc impérativement être protégée.

Selon la carte hydrogéologique du canton (DIAE, 2002), un puits de captage est présent dans la partie sud du périmètre d'aménagement coordonné. Les zones S1 et S2 de ce puits ont une surface très réduite du fait de la protection naturelle de la nappe par l'épaisse couche imperméable de limons argileux. La zone sur laquelle on ne peut pas réaliser des géostructures énergétiques est donc peu importante.

Le problème le plus important quant à la protection de la nappe du genevois réside dans une contamination depuis la surface. En effet, dans l'option de fondation sur pieux, on imagine, en première analyse, que ces pieux prennent appuis dans les graviers compacts de l'alluvion ancienne et non dans la moraine würmienne limono-argileuse à cause de sa faible épaisseur. La réalisation de ces pieux percerait ainsi la couche de protection de l'aquifère et permettrait à des substances polluantes d'atteindre la nappe. Dans la partie nord du PAC, il pourrait même y avoir

court-circuit avec l'aquifère superficiel. Par le passé, de telles réalisations ont été autorisées, mais actuellement elles ne le seraient plus. L'option de fonder un bâtiment sur de tels pieux est donc exclue.

Il ne reste ainsi que deux solutions pour fonder notre bâtiment qui sont le radier général et les pieux flottants. Il est en effet possible, dans ces deux cas, de fonder notre bâtiment sans percer la couche imperméable de limons argileux du retrait würmien. La solution par radier général ne pose à priori aucun problème technique. Pour l'option par pieux flottants, des solutions techniques existent pour reporter la charge du bâtiment par frottement latéral du pieu sur le sol. Par exemple, dans le cas de pieux préfabriqués battus, l'utilisation de pieux coniques permet de transmettre 80 % de la charge par frottement, contre 20 % seulement dans le cas d'un pieu cylindrique. Grâce à cette technique et, si nécessaire, au groupement de pieux, il est possible de fonder notre bâtiment avec des pieux ne dépassant pas les 20 m de profondeur et ne transperçant ainsi pas la couche limono-argileuse. L'option avec pieux forés est également envisageable.

#### 4.1.2.6 Effets thermiques, barrages hydrauliques et exécution des travaux

Les effets thermiques ne peuvent à ce stade pas être évalués, mais devraient rester limités à une zone restreinte sous le bâtiment vu la faible vitesse d'écoulement de l'eau souterraine.

Il n'y a en l'occurrence pas de risque de barrage hydraulique, ni de limitations d'exécution des travaux.

### 4.1.3 Conclusions

Les différents critères appliqués à ce site ont montré que la présence de la nappe du genevois avait une importance capitale dans la réalisation de géostructures énergétiques. En effet, sa protection implique le recours aux pieux flottants ou au radier général et exclu les pieux reportant la charge en pointe. Le cas des parois énergétiques n'a pas été analysé ci-dessus, mais il découle des remarques précédentes que ce type de géostructure énergétique pourrait être réalisé pour autant que la nappe du genevois ne soit aucunement touchée.

## 4.2 Site pilote du PAC de Frontenex - Gradelle

### 4.2.1 Généralités

Situé sur les communes de Cologny et de Chêne-Bougeries, ce site s'étend du stade de Frontenex aux grands immeubles de la Gradelle, à l'est de la gare des Eaux-Vives (Carte 4.5). La vue aérienne du site (Fig. 4.6) montre que celui-ci est principalement recouvert de prés, forêts et terrains de sport.

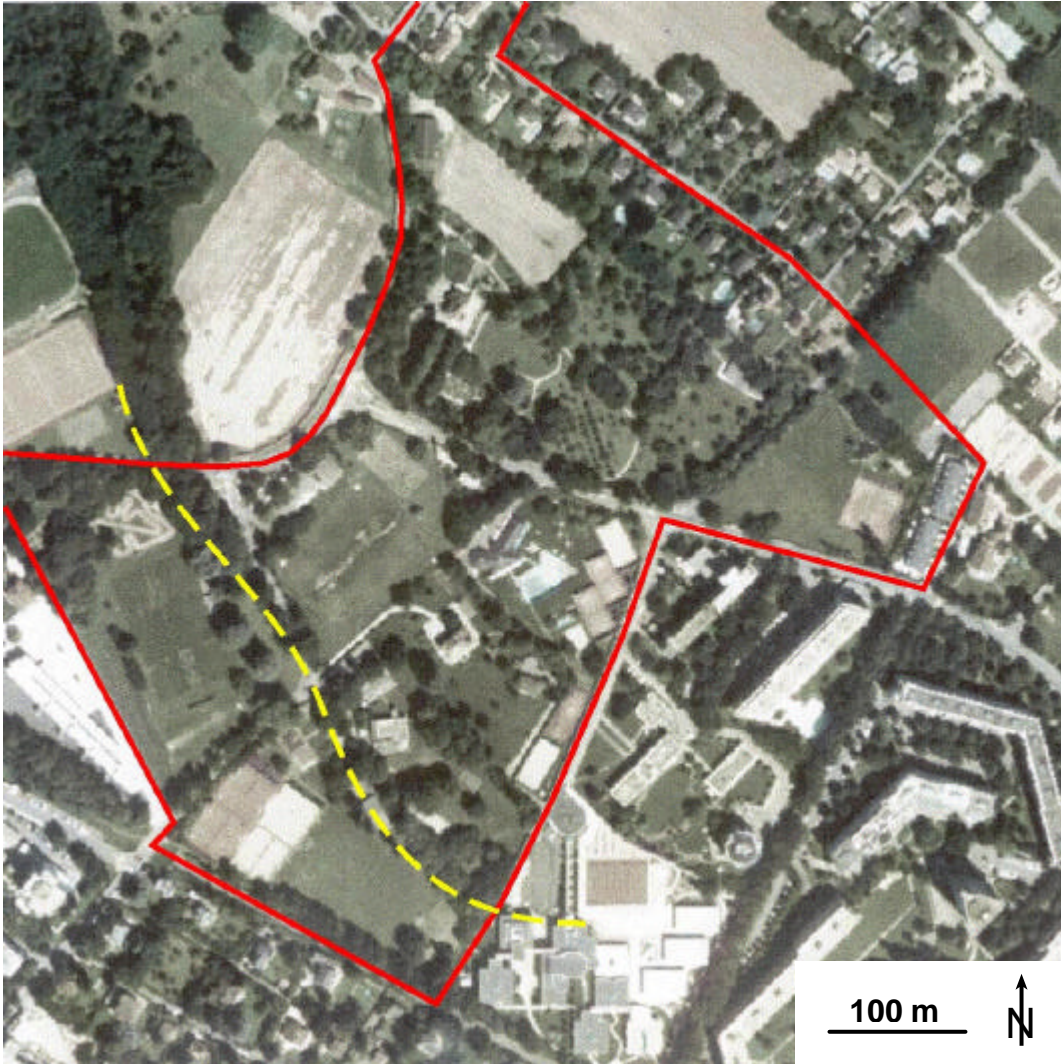


**Carte 4.5 :** Localisation du périmètre d'aménagement coordonné de Frontenex - Gradelle (Reproduit avec l'autorisation de l'office fédéral de topographie BA 024619)

Grâce à la carte géologique et géotechnique du canton de Genève (Ruchat, 1987) et aux quelques sondages se trouvant sur le site de Frontenex - Gradelle, la zone a pu être divisée en deux parties en fonction de la nature du sous-sol. La figure 4.6 sépare la partie sud-ouest de la partie nord-est du site par une ligne pointillée jaune. Comme déjà vu au chapitre 3.7, la partie sud-ouest est composée par une alternance de sables, limons et limons argileux des formations supraglaciaires du retrait würmien dont la consistance est tendre à molle. La partie nord-est est formée d'un dépôt morainique würmien limono-argileux à cailloux et blocs avec une consistance en général dure et que rarement tendre. Sur tout le site, aucun forage

n'ayant dépassé la vingtaine de mètres de profondeur, on ne connaît pas les formations sous-jacentes.

Selon les sondages et la carte hydrogéologique (DIAE, 2002), une nappe temporaire est présente dans la partie sud-ouest du site dès une profondeur de 3 à 6 m. La moraine würmienne de la partie nord-est ne contient aucune nappe souterraine.



**Figure 4.6** : Zone de développement futur du périmètre d'aménagement coordonné de Frontenex - Gradelle, délimitée en rouge sur cette vue aérienne. La ligne pointillée jaune sépare la zone en deux parties en fonction de la nature du sous-sol.

*(Reproduit avec l'autorisation de la division de l'aménagement cantonal et régional de Genève)*

## 4.2.2 Application des critères

Comme pour le site pilote précédent, les différents critères appliqués sont développés séparément ci-dessous.

### 4.2.2.1 Aménagement du territoire

Au même titre que le cas précédent, le site étant une zone de développement futur, on suppose qu'un bâtiment de 8 étages avec un seul sous-sol et des dimensions de 50 m de longueur par 15 m de largeur sera construit. La charge reportée par le bâtiment sur le sol est de 9 [t/m<sup>2</sup>], soit 0.09 [MN/m<sup>2</sup>].

### 4.2.2.2 Caractéristiques mécaniques du sol

Le site étant divisé en deux parties en fonction de la nature du sous-sol, les caractéristiques mécaniques du sol seront différentes dans chaque partie.

#### a) Partie sud-ouest

Des sondages SPT effectués dans certains forages de cette partie du site nous donnent une valeur moyenne de 6 coups pour 20 cm d'enfoncement, soit une résistance d'environ 0.06 [MN/m<sup>2</sup>]. Des essais au pénétromètre de poche sur des échantillons ont montré des valeurs de résistance à la compression simple de 50 à 75 [kPa], soit de 0.050 à 0.075 [MN/m<sup>2</sup>]. Par comparaison entre la résistance du sol et la charge du bâtiment, on remarque que cette dernière est bien supérieure à la charge admissible par le sol. Ainsi notre bâtiment doit être fondé sur pieux ou sur radier général.

Dans le cas des pieux, on reportera la charge du bâtiment sur une couche sous-jacente avec de meilleures caractéristiques mécaniques. Comme précédemment, chacun des 30 pieux reportera une charge de 225 tonnes. Pour ce site, on peut imaginer que l'on s'appuie sur la moraine compacte qui pourrait se retrouver sous les formations de retrait à une profondeur de plus de 20 m. Malgré tout, si tel n'était pas le cas, on pourrait toujours recourir à des pieux flottants.

Dans l'option avec radier général, les dimensions de ce dernier devront être supérieures à la surface du bâtiment de manière à répartir la charge. D'après des calculs, ce radier devrait dépasser de plus de 2.5 m de chaque côté du bâtiment. Ces dimensions minimales devraient donc être de 20 x 55 m. Son épaisseur sera comme précédemment de l'ordre de 60 à 80 cm.

A ce stade, il n'est pas possible de privilégier l'une ou l'autre des solutions.

#### b) Partie nord-est

Dans cette partie du site, les sondages SPT donnent des valeurs d'environ 35 coups pour un enfoncement de 20 cm, soit une charge admissible par le sol de 0.35 [MN/m<sup>2</sup>]. Cette valeur est près de quatre fois supérieure à la charge du bâtiment. Des fondations sur semelles sont donc suffisantes. Cette partie du site

n'est donc en première analyse pas propice à la réalisation de géostructures et donc à l'exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques.

Dans ce qui suit, on ne considérera donc plus que la partie sud-ouest du site comme une zone potentielle à la réalisation de géostructures énergétiques.

#### 4.2.2.3 Caractéristiques thermiques du sol et présence d'eau souterraine

Le sol étant généralement saturé (nappe temporaire) et composé de sables, limons et limons argileux, sa conductibilité thermique sera de l'ordre de 2.2 [W/mK] et sa capacité thermique volumique de 2.3 [MJ/m<sup>3</sup>K] environ.

Avec une puissance d'extraction de la chaleur du sol estimée à 45 [W] par mètre de pieu (Fromentin *et al.*, 1997), la puissance totale extractible pour les 30 pieux serait de 33'750 [W], si l'on considère une longueur active moyenne des pieux de 25 m. En terme d'énergie, cette puissance correspond à environ à 85 [kWh] par mètre de pieu et par année ou 306 [MJ] par mètre de pieu et par année. La totalité des pieux permet donc d'extraire une énergie de 229'500 [MJ] par année. Avec un besoin énergétique pour le chauffage de notre bâtiment évalué à 200 [MJ] par mètre carré de plancher et par année, l'énergie thermique des pieux énergétiques couvre un cinquième de la demande. En comparaison, un mètre de pieu permet de chauffer 1.5 m<sup>2</sup> de plancher.

Pour le cas avec radier général, l'énergie thermique extractible sera bien inférieure au cas avec les pieux pour les différentes raisons évoquées au paragraphe 4.1.2.3.

#### 4.2.2.4 Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine

Aucune mesure de la vitesse d'écoulement n'est à notre disposition pour ce site. Etant donné la faible étendue de la nappe et son caractère temporaire, il est fort probable que l'écoulement de l'eau souterraine soit faible. Dans ce cas, il faudrait donc envisager une recharge thermique artificielle du sol.

#### 4.2.2.5 Protection des nappes souterraines, effets thermiques, barrages hydrauliques et exécution des travaux

Ces différents critères ont été regroupés étant donné que peu de limitations touchent ce site. En effet, la nappe souterraine concernée n'est pas utilisée comme ressource en eau de par son aspect temporaire et superficiel. Ainsi, une éventuelle contamination depuis la surface par l'intermédiaire des pieux, n'aura que de faibles conséquences. De plus, aucune zone S de protection des eaux souterraine n'est présente sur ce site.

La présence d'eau souterraine sous forme de nappe temporaire est un point favorable pour les géostructures énergétiques et en particulier pour les pieux. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, l'eau permet d'augmenter fortement la conductibilité thermique du sol et donc la quantité de chaleur extractible.

Les effets thermiques sont à nouveau difficiles à évaluer, mais devraient être restreints tout au plus à la superficie de la nappe temporaire. Les 30 pieux espacés de 5 m chacun ne constituent en aucun cas un barrage hydraulique. Aucune limitation dans l'exécution des travaux ne peut être donnée à ce stade.

### 4.2.3 Conclusions

L'application des critères concernant les caractéristiques mécaniques du sol nous a permis de délimiter le site en deux zones, l'une propice à la réalisation de géostructures énergétiques, l'autre pas. Dans la partie sud-ouest du site, il est donc possible d'équiper en échangeurs de chaleur les pieux, les dalles et également les parois le cas échéant. La nature du terrain et la présence d'eau souterraine font de ce site un cas très favorable au point de vue des caractéristiques thermiques du sol. De plus, aucune limitation d'exécution n'est à relever.

### 4.3 Synthèse

L'application des différents critères, définis au chapitre 2, sur les deux sites pilotes a permis de tester et valider ces critères dans deux cas pratiques qui pourraient un jour correspondre à des cas réels. Ce travail montre que cette méthodologie par critères est applicable et donne des résultats intéressants même avec des données de base très restreintes comme dans le cas de ces deux sites pilotes. Ces derniers montraient des caractéristiques lithologiques différentes et on constate que l'application des critères a abouti à des résultats également différents, principalement pour des raisons hydrogéologiques et de protection des eaux souterraines. Ainsi, un seul des critères peut parfois influencer fortement le résultat final et peut, comme dans le cas du PAC de La Chapelle - Les Sciens, empêcher la réalisation d'un certain type de géostructure. Ce cas nous mène à la constatation que la protection de la nappe du genevois pourrait éventuellement et suivant les cas limiter la réalisation de géostructures énergétiques.



## 5. Conclusions et perspectives

Les objectifs de cette étude étant notamment de promouvoir l'utilisation de géostructures énergétiques en Suisse, une méthodologie de détermination et de sélection des zones potentielles basée sur différents critères a été développée. Ces différents critères ont été décrits en détail puis la méthodologie a été testée par l'application de ces critères sur deux sites pilotes dans le canton de Genève.

**Il en ressort que la démarche proposée est une méthodologie valide qui permet, avec une quantité de données limitée, d'avoir une première idée sur la faisabilité des géostructures énergétiques. Cette méthodologie facilite ainsi la prise de décision pour la réalisation de géostructures énergétiques et encourage donc le recours à de tels ouvrages.**

Les données nécessaires à cette méthodologie sont principalement des informations sur le sous-sol, soit la connaissance de la géologie, de l'hydrogéologie et des propriétés mécaniques et thermiques des sols, ainsi que des informations concernant l'aménagement du territoire et les zones constructibles. Pour le canton de Genève, sur lequel s'est focalisée cette étude, la plupart des données nécessaires étaient disponibles auprès des services cantonaux concernés. Malgré tout, pour certains sites nous avons vu que des informations supplémentaires auraient été souhaitées et ceci soulève le problème du manque de données pour la méthodologie qui risque d'intervenir principalement dans des zones peu urbanisées où la connaissance du sous-sol est très réduite.

**La démarche de recherche des zones potentielles en collaboration avec les services de l'aménagement du territoire, de la géologie et de l'énergie s'est avérée comme étant la voie à suivre. Cette démarche pourrait être transposée pour des études similaires dans d'autres cantons.**

Le premier pas dans la promotion des géostructures énergétiques ayant été franchi par la réalisation de cette méthodologie, cette étude ouvre la voie à de nombreuses perspectives dans le domaine.

**Une suite logique à cette étude serait, en effet, l'établissement de cartes de potentiel pour l'utilisation de la chaleur terrestre par les géostructures énergétiques.**

Ces cartes pourraient être établies par les cantons en appliquant les différents critères sur tout leur territoire. De telles études ont à ce jour déjà été réalisées dans plusieurs cantons suisses pour l'utilisation de la chaleur de l'eau et du sol par des sondes géothermiques, des nappes de tubes horizontaux ou par l'exploitation des eaux souterraines peu profondes et des eaux de surface (OEHE, OPED, 1998).

**Les cantons auraient également tout intérêt à prendre en compte la réalisation de géostructures énergétiques et, par généralisation, l'utilisation de la géothermie comme source d'énergie dans leur plan directeur et leurs plans d'affectation.**

Ce processus a, par exemple, déjà été effectué pour d'autres types d'énergies comme l'énergie éolienne (Robyr Soguel & Henz, 2001). Les plans localisés de quartier étant de plus en plus d'actualité et renfermant un volet sur le concept énergétique, il faudrait absolument que la possibilité d'extraction de chaleur par les géostructures énergétiques y soit évaluée, comme d'ailleurs les autres méthodes d'exploitation de la géothermie. Ces plans localisés de quartier ainsi que les périmètres d'aménagement coordonné utilisés dans cette étude ne devraient pas faire oublier que des constructions ponctuelles et particulières pourraient également avoir recours aux géostructures énergétiques. Dans le canton de Genève, de nombreuses constructions d'importance, comme le dépôt central des Transports Publics Genevois ou, plus récemment, le stade de la Praille et la Halle 6 de Palexpo sont construites sur pieux qui auraient pu être équipés en échangeurs de chaleur.

**Ainsi, les améliorations dans ce domaine sont encore énormes et la tâche de promotion et de développement de cette source d'énergie incombe maintenant au différents intervenants qui sont principalement les pouvoirs publics, les promoteurs, les architectes, les ingénieurs civils et énergéticiens ainsi que les entreprises de construction.**

## Bibliographie

- BAPST, A., ADATTE, P. & RIEBEN, C. (1994) : Prospection et catalogue des sites pour sondes géothermiques dans le canton du Jura, Résultats préliminaires ; MFR Géologie Géotechnique SA, Delémont / Bienne
- DAEL (2001) : Plan directeur cantonal Genève 2015, Une présentation résumée ; Département de l'aménagement, de l'équipement et du logement, République et canton de Genève, Genève
- DIAE (2002) : Carte hydrogéologique du canton, 1 : 25'000 ; Service cantonal de géologie, Département de l'intérieur, de l'agriculture et de l'environnement, Etat de Genève, Genève
- 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
- FROMENTIN, A., PAHUD, D., LALOU, L. & MORENI, M. (1999) : Pieux échangeurs : conception et règles de pré-dimensionnement ; Revue française de génie civil n°6/1999, vol. 3, pp. 387-421
- JOLIVIN, 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, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne
- LOMBARD, A. & PAREJAS, E. (1965) : Feuille 1301 Genève ; Atlas géologique de la Suisse 1 : 25'000, Commission Géologique Suisse, Berne
- OEHE, OPED (1998) : Utilisation de la chaleur de l'eau et du sol, Carte d'ensemble du canton de Berne ; Office de l'économie hydraulique et énergétique (OEHE), Office de la protection des eaux et de la gestion des déchets (OPED), Berne
- OFPE (1977) : Instructions pratiques pour la détermination des secteurs de protection des eaux, des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines ; révision partielle en 1982, Office fédéral de la protection de l'environnement (OFPE), Berne
- OFPE (1982) : Directives sur l'utilisation de la chaleur des eaux et du sol ; Office fédéral de la protection de l'environnement (OFPE), Berne
- ROBYR SOGUEL, D. & HENZ, H.R. (2001) : La prise en compte de l'énergie éolienne dans les plans directeurs et les plans d'affectation, Rapport final ; Programme Vent, Office fédéral de l'Energie (OFEN), Berne

## Bibliographie

- RUCHAT, C. (1985) : Carte géologique et géotechnique du canton de Genève, Feuille 50 Gare de Cornavin, 1 : 5000 ; République et canton de Genève, Département des travaux publics, Département de l'intérieur et de l'agriculture, Genève
- RUCHAT, C. (1987) : Carte géologique et géotechnique du canton de Genève, Feuille 59 Grange-Canal, 1 : 5000 ; République et canton de Genève, Département des travaux publics, Département de l'intérieur et de l'agriculture, Genève
- RUCHAT, C. (1989) : Carte géologique et géotechnique du canton de Genève, Feuille 58 Cologny, 1 : 5000 ; République et canton de Genève, Département des travaux publics, Département de l'intérieur et de l'agriculture, Genève
- 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
- VON DER HUDE, N. & KAPP, C. (1998) : The use of heat exchanger piles as exemplified in the Main Tower building in Frankfurt am Main ; 5<sup>th</sup> Darmstadt Geotechnical Conference, 19th March 1998, Darmstadt
- WILHELM, J. (2001) : 10 ans de géostructures énergétiques en Suisse ; Introduction à la 12<sup>ème</sup> journée technique de la Société Suisse pour la Géothermie, 20 avril 2001, Berne