

# Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain

THÈSE N° 4404 (2009)

PRÉSENTÉE LE 12 JUIN 2009

À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT  
LABORATOIRE DE GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR ET DE L'ENVIRONNEMENT  
PROGRAMME DOCTORAL EN ENVIRONNEMENT

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Pascal BLUNIER

acceptée sur proposition du jury:

Prof. J.-L. Scartezzini, président du jury

Prof. A. Parriaux, directeur de thèse

Prof. M. Arnould, rapporteur

Prof. F. Golay, rapporteur

Dr M. Meyer, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse  
2009



*À Isabelle pour sa patience et son soutien inébranlable  
À ma famille pour le goût de la liberté*



# Résumé

Le monde s'urbanise. Au cours des cinquante dernières années, les villes suisses ont par exemple vu leur population passer de 45 % à 70 % des habitants du pays. Cette croissance est caractérisée par un fort étalement spatial et une augmentation de la consommation des ressources ; ces dernières étant pour l'essentiel importées depuis des espaces ruraux. Une telle évolution n'est pas compatible avec les principes du développement durable.

Devant ce constat, un consensus se dessine pour élaborer des politiques territoriales qui mettent en œuvre un développement vers l'intérieur des espaces urbains et réduisent la dépendance vis-à-vis des ressources exogènes. Le sous-sol des villes comporte des ressources en espace, géomatériaux, eau et énergie qui peuvent appuyer de telles politiques. Ce projet analyse comment les ressources du sous-sol des villes ont été exploitées jusqu'à ce jour et comment elles pourraient être valorisées de manière durable.

Le développement des ressources du sous-sol a été analysé pour cinq villes : Mexico, Paris, Helsinki, Tokyo et Montréal. Il en ressort que si les ressources participent certes au métabolisme de la ville, leur utilisation manque néanmoins de coordination. Elle répond essentiellement à une logique sectorielle dans laquelle les ressources sont considérées indépendamment et à l'unique échelle de la construction. Cette démarche aboutit souvent à des conflits d'usage et à un gaspillage de ressources sur le long terme.

Il apparaît alors primordial de mieux comprendre comment les usages des ressources interagissent et comment l'ensemble de leur potentiel peut être considéré et coordonné dans le cadre des processus d'aménagement du territoire. Une compréhension du sous-sol comme un système complexe a été développée : elle met en évidence les conflits et synergies d'usage en formulant des conditions de compatibilité.

Une démarche d'évaluation du potentiel des ressources du sous-sol urbain a été conduite. Elle vise à réaliser une étude de base pour l'aménagement du territoire, permettant ainsi de mieux considérer les ressources du sous-sol et la manière dont elles interagissent dans les projets de développement territorial. Elle s'appuie sur les outils d'information géographique et sur la modélisation tridimensionnelle des conditions géologiques et hydrogéologiques du sous-sol. Cette démarche permet d'inverser le paradigme actuel qui procède des besoins aux ressources, au profit d'une approche qui parte des ressources pour satisfaire les besoins. Les informations spatiales ont été exploitées pour développer

des indicateurs et des cartes de potentialité et de restriction. Ces derniers permettent d'appuyer la prise de décision pour la valorisation des ressources du sous-sol urbain. La démarche a été appliquée à la ville de Genève.

Cette approche permet de mieux valoriser les ressources du sous-sol urbain, d'éviter les conflits d'usage et de bénéficier des synergies. Appliquée à l'aménagement du territoire, elle fait apparaître de nouvelles potentialités et permet de développer des projets cohérents avec les conditions physiques du sous-sol.

**MOTS CLÉS :** sous-sol, ressource, aménagement du territoire, ville, géologie, 3D, aide à la décision, transdisciplinarité

# *Abstract*

The world is becoming more and more urban. During the last fifty years, the population in Swiss cities has grown from 45% to 70% of the total population. This change is characterised by urban sprawl and by an increase in the consumption of resources, particularly those coming from rural areas. This evolution is not compatible with the principles of sustainable development.

To solve this problem, new urban policies are being developed. They favour development within the urbanised areas and reduced use of exogenous resources. The urban underground contains resources - space, geomaterials, groundwater and geothermal energy - which can efficiently support such policies. This project analyses how these resources have been exploited until now and how they could be used with sustainability in mind.

The use of underground resources was analysed in five cities : Mexico, Paris, Helsinki, Tokyo and Montreal. It appears that, although resources participate in the urban metabolism, there is an important lack of planning and coordination in their use. Developments follow a sectional approach where the resources are considered independently, and only at the scale of a given construction project. As a consequence, conflicts occur between uses and resources are wasted.

An understanding of the urban underground as a system was developed with the aim of preventing conflicts and promoting synergies. To this effect, the way in which resources interact was considered attentively. Situations in which interactions occur were described and analysed and compatibility conditions were suggested.

A methodology was elaborated to evaluate the resource potential of an urban underground. It aims at considering the resources and the interactions between their uses from the beginning of the process of urban planning. The methodology is based on the use of Geographical Information Systems and 3-D modelling of geological and hydrogeological conditions. It aims at reversing the current paradigm, that proceeds from the needs to the resources, into an approach based on resources to satisfy the needs. Spatial information was exploited to determine indicators and maps of potentiality and of restrictions. The derived results will help support decision making by planners and policy makers who seek to better exploit the resources from the urban underground. The methodology was tested and applied on a case study : Geneva.

The developed approach allows more efficiency in the use of urban underground resources, it can help prevent conflicts between uses and develop synergies. When integrated in the urban planning process, it highlights new opportunities and helps to develop projects that take into account the physical conditions of the underground.

**KEY WORDS :** underground, resources, land planning, city, geology, 3D, decision-making, transdisciplinarity



# *Remerciements*

J'ai bénéficié tout au long de ces quatre années de recherche du soutien, des compétences et de l'affection de nombreuses personnes, sans lesquelles ce travail n'aurait pu aboutir, je tiens ici à leur adresser ma plus grande reconnaissance.

Je tiens en premier lieu à remercier le professeur Aurèle Parriaux, directeur du laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (GEOLEP) pour m'avoir accueilli dans son unité et m'avoir offert la possibilité de relever le défi d'une recherche large et transdisciplinaire sur un sujet novateur.

Merci à l'ensemble des membres du projet Deep City, dans lequel s'inscrit ce travail de doctorat, pour avoir guidé, évalué et orienté mes recherches. Merci également aux membres de mon jury de thèse : le président, professeur Jean-Louis Scartezzini et les trois rapporteurs, professeur François Golay, professeur Marcel Arnould et Dr Michel Meyer, pour leurs évaluations et leurs remarques pertinentes.

Le projet Deep City est le fruit d'une collaboration précieuse avec de nombreux partenaires. Merci à l'ensemble de ces personnes et institutions d'avoir accepté de nous rencontrer et d'avoir richement alimenté nos réflexions. Je remercie en particulier l'État de Genève qui a accepté de fournir de précieuses données géographiques ainsi que le GESDEC et son directeur Dr. Michel Meyer pour un intérêt et un soutien sans bornes à nos recherches. Merci également au bureau BG ingénieurs Conseils, en particulier le Dr. Pascal Piguet, pour la confiance et la curiosité qu'ils ont exprimée envers notre travail, et pour nous avoir permis de confronter nos réflexions à la réalité du terrain.

J'exprime une immense gratitude envers mon compagnon de route dans cette aventure : Pierrick Maire, merci pour les riches échanges, pour avoir partagé les moments intenses comme les plus difficiles et surtout merci pour ton amitié. Merci également à Guillaume Dekkil qui a trouvé sa place sur notre tandem au cours de la dernière année du projet Deep City. Merci pour ta bonne humeur, pour tes précieux appuis dans les domaines de l'aménagement du territoire et pour ton enthousiasme à toute épreuve. Enfin, je souhaite citer au GEOLEP David Bréthaut pour nos riches échanges sur la géothermie et la cartographie 3D.

Merci à l'ensemble des collègues du GEOLEP pour votre bonne humeur ; Merci Diana, Cornelia, Séverine, Joëlle, Clémentine, Dani, Greg, Pierre, Marco, Julien, David, Pier-

rick, Guillaume et tous ceux qui nous ont rejoints plus ponctuellement au cours de ces années.

J'ai eu la grande chance de profiter du travail de plusieurs étudiants lors de projets de semestre ou de master. Merci beaucoup Adeline Poux, Roman Naegeli, Fabian Jabas et Jean-Baptiste Luyet, pour avoir jeté un regard neuf sur ma recherche et pour la grande qualité de vos travaux et votre contribution précieuse à ce travail de thèse.

Une équipe de relecteurs très attentifs a porté un regard critique et pertinent sur le fond comme sur la forme du présent document et a permis d'en améliorer grandement la qualité ; merci Ginette Dugand, Nicole Blunier, Adeline Poux, Valéry Beaud et Frédéric Davoli.

Je tiens également à remercier le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique qui a financé nos travaux dans le cadre du Programme National de Recherche 54, sans qui ce travail n'aurait pas pu être réalisé.

Merci à mes amis grâce auxquels j'ai pu me ressourcer dans nos aventures sportives, festives ou associatives.

Enfin, je veux remercier ceux dont l'affection, la confiance et le soutien ont été mon principal moteur tout au long de ces quatre années. Merci d'avoir cru en moi et d'avoir su me le dire, malgré mes doutes. Merci pour votre indulgence face à mes absences et mes préoccupations. Merci ma famille, Daniel, Nicole, Marc et Cécile Blunier, merci Isabelle.

# Table des matières

<b>Liste des sigles et des abréviations</b>	<b>xi</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
1.1. Constats et enjeux . . . . .	1
1.2. Hypothèses et objectifs . . . . .	3
1.3. Méthodologie de recherche . . . . .	4
1.3.1. Analyse contextuelle des expériences passées . . . . .	5
1.3.2. Appréhension systémique du sous-sol urbain . . . . .	6
1.3.3. Démarche pour la planification . . . . .	6
1.4. Contexte de la recherche . . . . .	7
<b>2. Ressources et usages du sous-sol urbain : définitions et typologies</b>	<b>9</b>
2.1. Notions utiles de géologie, d'hydrogéologie et de thermique du sous-sol . . . . .	9
2.1.1. Géologie . . . . .	9
2.1.2. Hydrogéologie . . . . .	12
2.1.3. Thermique du sous-sol . . . . .	16
2.2. Usages des ressources du sous-sol urbain . . . . .	16
2.2.1. Usage de l'espace . . . . .	16
2.2.2. Usage des géomatériaux . . . . .	19
2.2.3. Usage de l'eau souterraine . . . . .	20
2.2.4. Usage de l'énergie géothermique . . . . .	20
<b>3. Modes de gestion des ressources du sous-sol passés et actuels</b>	<b>23</b>
3.1. Cinq itinéraires de développement des ressources du sous-sol . . . . .	23
3.1.1. Mexico . . . . .	23
3.1.2. Paris . . . . .	26
3.1.3. Helsinki . . . . .	29
3.1.4. Tokyo . . . . .	32
3.1.5. Montréal . . . . .	35
3.2. Analyse comparée des expériences . . . . .	39
3.2.1. Contextes . . . . .	39
3.2.2. Usages des ressources du sous-sol . . . . .	39
3.2.3. Moteurs du développement et planification . . . . .	40
3.2.4. L'approche sectorielle et ses conséquences . . . . .	42

3.3. Synthèse . . . . .	44
<b>4. Usages multiples des ressources du sous-sol urbain</b>	<b>45</b>
4.1. Appréhension systémique du sous-sol urbain . . . . .	45
4.1.1. Concept Deep City de gestion des ressources du sous-sol . . . . .	45
4.1.2. Approche systémique et sous-sol urbain . . . . .	46
4.2. Interactions entre les usages du sous-sol urbain . . . . .	52
4.2.1. Interactions espace-eau souterraine . . . . .	53
4.2.2. Interactions espace-géothermie . . . . .	78
4.2.3. Interactions espace-géomatériaux . . . . .	81
4.2.4. Interactions eau souterraine-géothermie . . . . .	82
4.2.5. Interactions eau souterraine-géomatériaux . . . . .	85
4.2.6. Interactions entre les usages de l'espace . . . . .	85
4.2.7. Interactions entre les usages de l'eau souterraine . . . . .	86
4.2.8. Interactions entre les usages de la géothermie . . . . .	86
4.3. Perspectives offertes par les outils de l'analyse systémique . . . . .	87
4.3.1. Description du cas . . . . .	87
4.3.2. Modèle causal . . . . .	88
4.3.3. Modèle stocks et flux . . . . .	90
4.3.4. Simulation et discussion . . . . .	90
4.4. Synthèse du chapitre . . . . .	92
<b>5. Intégration du sous-sol dans l'aménagement du territoire</b>	<b>95</b>
5.1. Stratégies et outils d'aménagement du territoire . . . . .	95
5.2. Enjeux pour les ressources du sous-sol . . . . .	97
5.2.1. Plans et outils de portée générale . . . . .	97
5.2.2. Interactions : contexte légal en Suisse . . . . .	99
5.3. Synthèse du chapitre . . . . .	104
<b>6. Intégrer et valoriser la connaissance du sous-sol</b>	<b>107</b>
6.1. Problématique . . . . .	107
6.2. Environnement naturel . . . . .	109
6.2.1. Information géologique . . . . .	109
6.2.2. Information hydrogéologique . . . . .	113
6.3. Milieu bâti . . . . .	117
6.3.1. Infrastructures du sous-sol et géodonnées . . . . .	117
6.3.2. Étude de cas : Genève . . . . .	117
6.4. Contexte de surface et contraintes . . . . .	119
6.4.1. Usages de la surface, cadre administratif et légal . . . . .	119
6.4.2. Risques naturels et anthropiques . . . . .	120
6.5. Vers un SIG pour le sous-sol urbain . . . . .	121
6.5.1. SIG et troisième dimension . . . . .	121
6.5.2. SIG par étage : une approche transitoire pragmatique . . . . .	123
6.6. Synthèse du chapitre . . . . .	128
<b>7. Évaluer en pratique le potentiel d'un sous-sol urbain</b>	<b>129</b>
7.1. Potentiel brut d'usage des ressources . . . . .	129
7.1.1. Ressource en espace . . . . .	129

7.1.2. Ressource en géomatériaux . . . . .	133
7.1.3. Ressource en eau souterraine . . . . .	137
7.1.4. Ressource en géothermie . . . . .	139
7.2. Usages multiples des ressources du sous-sol urbain . . . . .	143
7.2.1. Analyse du contexte . . . . .	143
7.2.2. Compatibilité des usages . . . . .	147
7.3. Aide à la décision pour la planification . . . . .	152
7.4. Du potentiel au projet urbain . . . . .	154
7.5. Synthèse du chapitre . . . . .	156
<b>8. Conclusion et perspectives</b>	<b>159</b>
8.1. Synthèse générale . . . . .	159
8.2. Discussion et conclusion . . . . .	160
8.3. Perspectives et recommandations . . . . .	163
8.3.1. Pour la pratique . . . . .	163
8.3.2. Pour la recherche . . . . .	163
<b>Bibliographie</b>	<b>165</b>
<b>Annexes</b>	<b>179</b>
<b>A. Physique des écoulements souterrains et thermique du sous-sol</b>	<b>181</b>
A.1. Eau souterraine . . . . .	181
A.2. Chaleur . . . . .	182
<b>B. Techniques de construction d'ouvrages souterrains</b>	<b>183</b>
B.1. Construction depuis la surface . . . . .	183
B.1.1. Construction en fouille . . . . .	183
B.1.2. Construction en taupe . . . . .	189
B.1.3. Construction en caisson . . . . .	189
B.1.4. Construction en sous-oeuvre . . . . .	191
B.1.5. Techniques de construction en nappe . . . . .	191
B.2. Construction souterraine . . . . .	193
B.2.1. Méthode conventionnelle . . . . .	193
B.2.2. Tunneliers . . . . .	195
B.2.3. Tubes forcés . . . . .	196
B.3. Pieux . . . . .	196
B.3.1. Avec refoulement du sol en place . . . . .	196
B.3.2. Sans refoulement du sol en place . . . . .	199
B.4. Modification des propriétés du terrain . . . . .	200
B.4.1. Injections . . . . .	200
B.4.2. Jet grouting . . . . .	200
B.4.3. Congélation . . . . .	200
<b>C. Interactions : contexte légal et normatif</b>	<b>203</b>
C.1. Droit fédéral : règles générales . . . . .	203
C.2. Protection des eaux souterraines . . . . .	209
C.3. Normes SIA . . . . .	217

<b>D. Définition des différents géotypes</b>	<b>221</b>
<b>E. Traduction de la géologie genevoise en géotypes</b>	<b>227</b>
<b>F. Paramètres géotechniques des géotypes de la géologie genevoise</b>	<b>235</b>
<b>G. Méthode des comparaisons par paires</b>	<b>245</b>
G.1. Construction de la matrice de comparaison . . . . .	245
G.2. Consistance de la matrice . . . . .	246
<b>H. Exemples de cartes de restriction</b>	<b>249</b>
<b>I. Exemple d'évaluation multicritère</b>	<b>251</b>
<b>Table des figures</b>	<b>255</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>259</b>
<b>Curriculum vitae</b>	<b>261</b>

## *Liste des sigles et des abréviations*

<b>ACUUS</b>	Associated Research Centers for the Underground Urban Space
<b>AFTES</b>	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain
<b>AHP</b>	Analytic Hierarchy Process
<b>ARE</b>	office fédéral du développement territorial
<b>CAO</b>	Conception Assistée par Ordinateur
<b>CEVA</b>	liaison ferroviaire Cornavin - Eaux-Vives - Annemasse
<b>DCMO</b>	Direction Cantonale de la Mensuration Officielle (Genève)
<b>EIE</b>	Étude d'Impact sur l'Environnement
<b>EPFL</b>	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
<b>FNS</b>	Fonds National Suisse de la recherche scientifique
<b>GECUS</b>	Groupe d'Étude et de Coordination de l'Urbanisme Souterrain
<b>GEOLEP</b>	laboratoire de GÉOLOGIE de l'ingénieur et de l'environnement de l'École Polytechnique fédérale de Lausanne
<b>GESDEC</b>	service de GÉologie, Sols et DÉChets du canton de Genève
<b>Habitat 2</b>	conférence des Nations-Unies sur les établissements humains
<b>LAT</b>	Loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'Aménagement du Territoire (loi fédérale en vigueur, la LDTer en consultation est appelée à la remplacer)
<b>LDTer</b>	Loi fédérale sur le Développement Territorial (en consultation)
<b>LEaux</b>	Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des Eaux
<b>LEne</b>	Loi du 26 juin 1998 sur l'Énergie
<b>LPE</b>	Loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la Protection de l'Environnement
<b>MNA</b>	Modèle Numérique d'Altitude
<b>OEaux</b>	Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des Eaux
<b>OEIE</b>	Ordonnance du 19 octobre 1988 relative à l'Étude de l'Impact sur l'Environnement
<b>OEné</b>	Ordonnance du 7 décembre 1998 sur l'Énergie
<b>OFEFP</b>	Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (jusqu'en 2005)

<b>OFEV</b>	Office Fédéral de l'EnVironnement (depuis 2005)
<b>OHyg</b>	Ordonnance du DFI du 23 novembre 2005 sur l'Hygiène
<b>OPEL</b>	Ordonnance du 1 <sup>er</sup> juillet 1998 sur la Protection des Eaux contre les Liquides pouvant les polluer
<b>OSEC</b>	Ordonnance du DFI du 26 juin 1995 sur les Substances Étrangères et les Composants dans les denrées alimentaires
<b>OTD</b>	Ordonnance du 10 décembre 1990 sur le Traitement des Déchets
<b>OWA</b>	Order Weighted Average
<b>PAC</b>	Pompe À Chaleur
<b>PACA</b>	Périmètre d'Aménagement Coordonné d'Agglomération
<b>PAV</b>	Praille-Acacias-Vernets
<b>PNR 54</b>	Programme National de Recherche 54
<b>RER</b>	Réseau Express Régional
<b>SIA</b>	Société suisse des Ingénieurs et des Architectes
<b>SIG</b>	Système d'Information Géographique
<b>SITG</b>	Système d'Information du Territoire à Genève



*« Je tiens pour impossible de connaître les parties sans connaître le tout non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties. »  
(Blaise Pascal, Les pensées)*



# Chapitre 1

## *Introduction*

### 1.1. Constats et enjeux

Pour la première fois de l'Histoire, depuis 2008 plus de la moitié de l'humanité vit en ville. L'urbanisation continue de croître, si bien que dans 20 ans environ 60 % des hommes vivront dans des villes (UN Habitat, 2008). La Suisse a connu une forte augmentation de sa population urbaine au cours de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle. En 2000, ses citoyens étaient 5,3 millions, soit 73 % de la population contre 2,1 millions, soit 45 % de la population, en 1950 (Kuster et Hans-Rudolf, 2003). Pendant la même période, la superficie urbaine totale a plus que quadruplé et d'autres indicateurs (par exemple : augmentation du nombre de villes et d'agglomérations, diminution du nombre de villes isolées) renforcent l'image d'une Suisse urbaine. Les dynamiques territoriales de la ville ne sont toutefois pas homogènes. Les données de recensement mettent en évidence, dans les dernières décennies, un plus fort développement de l'espace périurbain. Le territoire suisse est ainsi marqué à la fois par la croissance et l'étalement des villes. Ailleurs dans le monde, si les rapports de développement entre centre et périphérie varient, les deux dynamiques de croissance et d'étalement urbain sont largement observées (Kasanko *et al.*, 2006; UN Habitat, 2008).

Ce mode de développement n'est pas sans conséquence pour l'environnement, l'économie et la société. L'étalement spatial a ainsi augmenté les besoins de mobilité, entraînant congestion des voies routières, pollution de l'air et croissance de la production de gaz à effet de serre. Par ailleurs, les villes génèrent et utilisent peu de ressources locales pour leur développement. Ceci a été montré par les écologues, qui au cours de la dernière décennie ont investi le champ de l'étude de la ville en proposant un parallèle entre systèmes urbains et systèmes écologiques (Botkin et Beveridge, 1997; Decker *et al.*, 2000; Moffatt et Kohler, 2008; Newman, 1999). Ces études du métabolisme urbain mettent en évidence la forte dépendance vis-à-vis de flux de matériaux, d'eau et d'énergie exogènes à la ville. Elles traduisent aussi la forte pression qu'elle porte sur son environnement pour absorber ses déchets.

La figure 1.1 présente plusieurs modèles de flux d'énergie et de matière pour des écosystèmes plus ou moins évolués. Les écosystèmes primitifs ont un fonctionnement linéaire

(type a), alors que les plus évolués permettent de refermer totalement les flux de matière dans le système (type c) et ne sont plus que des consommateurs d'énergie. De nombreux processus du métabolisme urbain suivent un modèle de type (a), les flux d'entrée et de sortie du système sont conséquents, car matériaux et énergie sont dissipés au cours d'un seul usage. Newman (1999) a illustré ce phénomène pour la ville de Sydney et Jelinski *et al.* (1992) ont montré comment le paradigme des ressources illimitées a été central dans le développement industriel du 20<sup>e</sup> siècle.

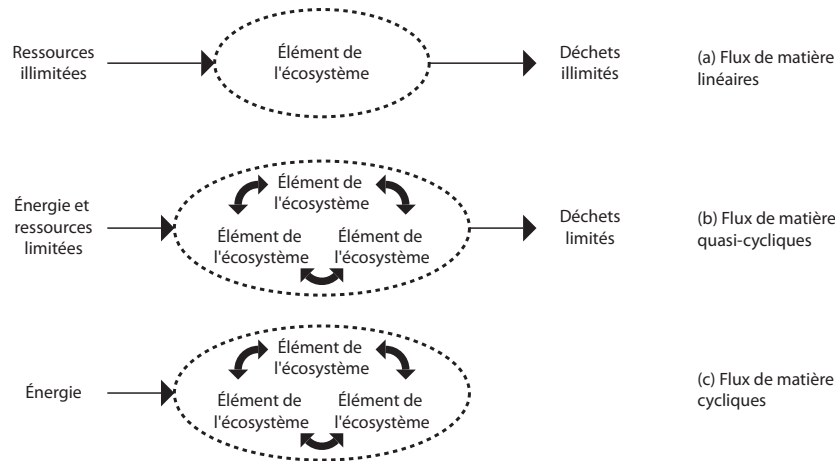


FIGURE 1.1.: Modèles de métabolisme des écosystèmes. D'après Jelinski *et al.* (1992)

Ainsi, si la ville est de plus en plus attractive - elle est en effet génératrice d'opportunités économiques et de liens sociaux et culturels - elle impose une forte pression sur l'environnement naturel.

Le concept de *développement durable* a offert un nouveau paradigme pour analyser le développement humain. Il définit un objectif d'équilibre entre intégrité environnementale, dynamisme économique et cohésion sociale. Son but étant de mettre en œuvre : « un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (UN World Commission on Environment and Development, 1987).

En 1996, la conférence Habitat 2<sup>1</sup> à Istanbul a consacré l'idée d'un *développement durable des établissements humains dans un monde de plus en plus urbanisé* (UN Centre for Humans Settlements, 1996). Elle officialise la *ville durable* comme nouveau référentiel pour le développement urbain. Le manifeste d'Istanbul fixe entre autres priorités, le besoin de : *respecter la capacité limite des écosystèmes et préserver les chances des générations futures*. Dans les pays industrialisés, ce paradigme s'est manifesté par la volonté de développer des formes urbaines moins étalées, reliées par des réseaux de services et de transports efficaces. Les concepts de *ville compacte*, *ville multipolaire*, *réseaux de villes* ont ainsi vu le jour (Breheny, 1997; Burton *et al.*, 1996; Gordon et Richardson, 1997). Ils traduisent le besoin d'un développement à l'intérieur du tissu urbain existant. La nouvelle

1. conférence des Nations-Unies sur les établissements humains

LDTer<sup>2</sup>, actuellement en consultation propose ainsi en son art. 6 al. a « de créer des aires urbanisées compactes et prévoir leur développement dans les parties du territoire qui sont déjà largement bâties et bien reliées aux transports publics ».

Les défis contemporains du développement territorial sont donc variés : Ils concernent le développement intérieur du tissu urbain, sa densification, l'amélioration du cadre de vie, la fermeture des cycles métaboliques dans le système urbain, la diminution de leur volume et de leur vitesse.

## 1.2. Hypothèses et objectifs

L'espace souterrain offre un degré de liberté peu exploité par la ville. Son utilisation peut être déterminante pour la densification qualifiée ou la mise en place du concept de mixité fonctionnelle verticale<sup>3</sup>. Au-delà de la ressource en espace, le sous-sol est également riche en géomatériaux, eau souterraine et énergie géothermique (figure 1.2). Ces ressources du sous-sol sont endogènes à la ville. Elles sont particulièrement intéressantes pour assurer une transition vers des modèles de métabolisme plus efficaces et pour réduire la pression de la ville sur l'environnement naturel. Le sous-sol peut ainsi aider à répondre aux défis du développement territorial présentés au chapitre 1.1, tant pour freiner l'étalement spatial que pour développer des modes de consommation des ressources plus durables.

Toutefois, si le sous-sol urbain est riche en ressources, il est également vulnérable. L'exploitation de ces ressources diverses crée des interactions souvent conflictuelles, l'utilisation d'un volume géologique pour un besoin donné portant préjudice à l'usage d'autres ressources. Par exemple, un tunnel construit dans un aquifère peut le polluer et empêcher l'usage futur de l'eau souterraine comme eau de boisson. Sous certaines conditions en revanche, l'usage d'une ressource peut offrir des possibilités pour en exploiter une autre. Les constructions souterraines peuvent par exemple être équipées d'échangeurs de chaleur pour exploiter l'énergie géothermique.

Il semble donc qu'une utilisation plus intense, mais surtout mieux coordonnée des ressources du sous-sol urbain offre des opportunités réelles pour le développement durable. Cette idée est centrale à cette recherche et permet de formuler l'hypothèse suivante :

Les ressources du sous-sol urbain sont nécessaires au développement de la ville. Une utilisation coordonnée de ces ressources, qui tienne compte de l'ensemble de leur potentiel, ainsi que des conflits et synergies qui résultent de leur usage, est une clé pour la ville durable. Une telle démarche est appelée *approche par les usages multiples*.

---

2. Loi fédérale sur le Développement Territorial

3. Le courant progressiste de l'urbanisme qui a eu un fort impact sur les développements urbains de l'après-guerre prônait la séparation spatiale des différentes fonctions habiter, travailler, circuler et se récréer. Ce courant a notamment donné lieu à la Charte d'Athènes en 1933 (publiée par Le Corbusier en 1943) et a été prépondérant dans la pratique du zonage. Aujourd'hui, la ségrégation fonctionnelle de l'espace est remise en question (en particulier car elle génère d'importants besoins de mobilité). Le concept de mixité fonctionnelle s'y oppose et propose de mélanger plusieurs fonctions au sein d'un même quartier, lotissement ou immeuble. La mixité fonctionnelle verticale traduit la possibilité d'avoir des fonctions différenciées sur différents étages du quartier, des bâtiments.

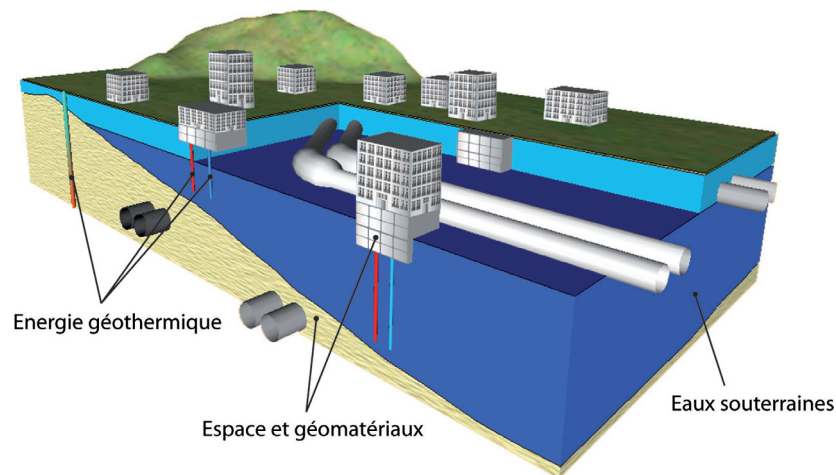


FIGURE 1.2.: Les ressources du sous-sol urbain

Pour vérifier la pertinence de cette hypothèse, en préciser les fondements et développer un cadre méthodologique qui permette sa mise en pratique, les objectifs suivants ont été identifiés :

- Évaluer et comprendre comment les ressources du sous-sol ont servi le développement urbain jusqu'à aujourd'hui. Dédire les forces et faiblesses de ces expériences.
- Développer une compréhension globale et systémique du sous-sol urbain : des potentialités offertes par l'usage de ses ressources, mais aussi des enjeux de coordination entre ces usages.
- Proposer un cadre méthodologique pour la prise en compte des ressources du sous-sol urbain dans les processus de planification et d'aménagement du territoire.

### 1.3. Méthodologie de recherche

Les ressources du sous-sol ont été utilisées en milieu urbain de longue date et il est pertinent de prendre en compte cette « histoire » comme base d'analyse et de réflexion. Aussi, ce projet de recherche revêt-il une forte dimension de synthèse, le concept des *usages multiples* offrant un nouvel angle d'analyse. Cette recherche est également marquée par la volonté de produire une démarche pratique et applicable, aussitôt que possible, pour l'aménagement du territoire. Il a en conséquence été choisi de porter attention aux outils et aux données existants, plutôt que d'en acquérir et développer de nouveaux. Des recommandations et des perspectives sont toutefois formulées au cours du travail.

Les principales étapes de la recherche sont les suivantes :

- Une analyse contextuelle des expériences passées de l'utilisation des ressources du sous-sol dans différentes villes.

- Une analyse thématique des usages des ressources du sous-sol urbain, focalisée sur les interactions entre les ressources du sous-sol. Cette analyse permet de développer une compréhension systémique du sous-sol.
- Le développement d’une démarche pratique pour la planification des ressources du sous-sol dans les villes et son application à la ville de Genève.

Ces étapes traduisent le cadre fortement empirique de la recherche : une compréhension théorique du sous-sol comme un système est dressée à partir de l’analyse des expériences passées et actuelles, puis à l’aide de ce cadre théorique, une démarche pratique est conçue et appliquée sur un cas d’étude. L’articulation entre la conception et l’application n’est pas linéaire, la démarche étant adaptée en fonction de l’expérience acquise lors de l’étude genevoise. La *méthodologie de gestion durable* développée est dérivée de cette méthodologie de recherche : le terme méthodologie est entendu dans un sens large, qui intègre la compréhension détaillée de l’objet d’étude comme préalable à la démarche pratique d’analyse pour aboutir à des résultats appliqués de gestion.

### 1.3.1. Analyse contextuelle des expériences passées

Une analyse transversale de la problématique de gestion des ressources du sous-sol urbain est développée autour de l’étude de cinq villes. Les villes d’étude ont été sélectionnées sur la base de plusieurs critères. Le premier étant que l’utilisation d’une ou plusieurs ressources du sous-sol urbain ait joué un rôle déterminant pour le développement de la ville (qu’il ait influencé la forme urbaine, les possibilités de développements socio-économiques ou ait donné lieu à des démarches stratégiques ou réglementaires originales). Sur la base de ce critère principal, dix-sept villes ont été sélectionnées. Une évaluation préliminaire a permis de réduire le nombre à cinq :

- Mexico au Mexique,
- Paris en France,
- Helsinki en Finlande,
- Tokyo au Japon,
- et Montréal au Canada.

Cette évaluation préliminaire a tenu compte de critères tels que le contexte géologique, les conditions climatiques et environnementales, le type principal d’utilisation des ressources du sous-sol, le contexte socio-économique et les solutions spécifiques mises en place pour la gestion d’une ou de plusieurs ressources du sous-sol. Des critères plus pratiques ont également été pris en compte comme la qualité et la quantité des données accessibles et les contacts possibles avec des personnes-ressources. Le but de cette évaluation préliminaire était de garantir une pluralité des contextes et des expériences pour pouvoir mener une analyse comparative.

Les données de base de cette analyse sont bibliographiques (articles scientifiques, rapports techniques, cartes) et ont été complétées par des contacts avec des personnes-ressources : pour l’essentiel des chercheurs ou des professionnels dans les administrations, liés à la gestion et à la planification de l’usage de ces ressources.

Une synthèse des expériences sous forme d’analyse comparée a finalement été développée. Elle permet de comprendre les différences et similitudes entre les itinéraires et de les confronter au contexte suisse.

Les résultats de cette étape de la recherche sont présentés au chapitre 3.

### 1.3.2. Appréhension systémique du sous-sol urbain

La compréhension des usages et des interactions entre les usages du sous-sol urbain est essentielle au concept d'usages multiples développé. Elle est menée avec une approche du sous-sol comme un système.

L'ensemble des interactions entre les usages du sous-sol urbain, conflictuelles et synergiques, a été étudié de manière systématique par couple de ressources et prend appui sur une description exhaustive des usages. L'attention a été portée sur la compréhension conceptuelle des interactions, l'analyse des causalités et la détermination des conditions gouvernant la compatibilité entre les ressources. Cette analyse est argumentée par des cas d'étude décrits dans la littérature scientifique.

Pour la Suisse, les conditions légales et normatives régissant les interactions entre les usages du sous-sol urbain ont été analysées et critiquées.

Enfin, il a été mené une analyse des possibilités ouvertes par le champ méthodologique de la systémique et de ses outils (plus particulièrement les modèles causaux et les modèles stock et flux), cette analyse ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

Les résultats de cette étape de la recherche sont présentés au chapitre 4.

### 1.3.3. Démarche pour la planification

Les pratiques de la gestion des ressources du sous-sol et leurs liens avec l'aménagement du territoire en Suisse ont été analysés et confrontés à des avis d'experts, lors d'entretiens avec des praticiens. Ceci a permis d'identifier comment les ressources du sous-sol peuvent être intégrées aux processus d'aménagement et de planification selon le concept d'*usages multiples*. Une démarche conceptuelle a été développée à partir de cette analyse. Cette démarche est construite comme un outil de diagnostic des ressources du sous-sol urbain, ce diagnostic étant un préalable jugé nécessaire pour une valorisation durable de ces ressources.

La ville de Genève a permis de développer en pratique la démarche et de valider et modifier les étapes. L'approche revêt donc un fort caractère exploratoire, avec de nombreuses itérations entre la démarche conceptuelle et sa mise en application. La ville de Genève a été choisie pour les raisons suivantes :

- Elle présente un contexte géologique intéressant pour développer des usages des quatre ressources du sous-sol urbain.
- La pression démographique et foncière actuelle incite à une densification forte et à un renouveau du tissu urbain qui pourrait tirer parti du sous-sol. Des démarches pratiques sont en cours dans la ville de Genève pour assurer un tel renouveau<sup>4</sup>.
- Un projet de nouvelle ligne de transport régional RER<sup>5</sup>, le CEVA<sup>6</sup> est en cours. Le tracé

---

4. Par exemple le projet d'agglomération franco-valdo-genevois qui vise l'accueil de 200'000 nouveaux habitants et 100'000 nouveaux emplois à l'horizon 2030

5. Réseau Express Régional

6. liaison ferroviaire Cornavin - Eaux-Vives - Annemasse



de cette ligne est en grande partie souterrain. Elle est appelée à devenir un élément structurant du système urbain genevois.

- Le canton de Genève porte un intérêt fort à une meilleure connaissance de son sous-sol, intérêt manifesté par la quantité et la qualité des données spatiales disponibles.

Les outils spatiaux de type SIG<sup>7</sup> ont été largement utilisés, les données de base étant les données spatiales et les données statistiques du canton. Comme indiqué précédemment, ce projet n'a pas fait l'objet d'acquisition de nouvelles données. Ce choix assure l'applicabilité et la reproductibilité de la démarche hors du cadre académique.

Les grandes étapes de la démarche portent sur :

- Une meilleure connaissance du sous-sol parmi les acteurs de l'aménagement
- Une démarche d'évaluation des potentialités des ressources du sous-sol urbain sous le paradigme des usages multiples
- Le lien entre les potentialités du sous-sol urbain et le projet d'aménagement. Cette étape a fait l'objet d'une étude de cas portant sur le projet de transformation du quartier PAV<sup>8</sup>.

Les résultats de cette étape de la recherche sont présentés aux chapitres 5, 6 et 7.

## 1.4. Contexte de la recherche

Cette recherche doctorale a été menée dans le cadre d'un projet du PNR 54<sup>9</sup> *Développement durable de l'environnement construit* intitulé *underground resources and sustainable development in urban areas - Deep City* (plus loin : Deep City). Le PNR 54 a été initié par le Conseil Fédéral (gouvernement Suisse) et mené par le FNS<sup>10</sup>. « Il vise à élaborer les bases scientifiques qui contribueront à un développement plus durable de l'environnement construit en Suisse ». Le développement durable étant entendu comme le « maintien d'un équilibre entre la préservation des ressources naturelles, de conditions économiques favorables et d'une qualité de vie élevée » (portrait du PNR 54 sur le site internet du programme).

Le projet Deep City vise quant à lui à créer une méthodologie qui aide les acteurs de l'aménagement et de la gestion du territoire à considérer et intégrer le potentiel complet du sous-sol urbain selon le concept développé des usages multiples. Il comporte un volet sur les ressources physiques et leurs interactions, c'est l'objet de ce travail de doctorat. Un deuxième volet porte sur l'acceptabilité<sup>11</sup> de l'usage des ressources du sous-sol urbain, particulièrement la ressource espace. Il fait l'objet d'une autre recherche doctorale menée par Pierrick Maire<sup>12</sup>. Le projet a été dirigé par un comité transdisciplinaire composé de géologues, ingénieurs, économistes, sociologues et urbanistes et suivi par un comité international d'experts.

---

7. Système d'Information Géographique

8. Praille-Acacias-Vernets

9. Programme National de Recherche 54

10. Fonds National Suisse de la recherche scientifique

11. Acceptabilité est entendue dans un sens large qui tient compte d'éléments sociologiques, économiques, légaux et politiques.

12. Projet non terminé au moment de la rédaction.

Cette recherche a bénéficié d'un riche partenariat avec les services du canton de Genève, en particulier le GESDEC<sup>13</sup>, qui ont mis à disposition leurs données et ont accepté de participer au comité de suivi du projet. Cette collaboration a également donné lieu à des études et des réflexions communes sur des projets en cours dans le canton. En particulier, la formulation de propositions pour le cahier des charges d'urbanisme du projet PACA<sup>14</sup> Bernex et la réalisation d'une étude sur les potentialités des ressources du sous-sol dans le secteur PAV. Cette dernière étude a été réalisée sous mandat du bureau BG Ingénieurs Conseils. La collaboration avec ce bureau a permis d'enrichir les concepts et méthodes développés avec des acteurs pratiques de l'aménagement et de mettre en évidence sa faisabilité.

Enfin, des propositions ont été formulées à l'ARE<sup>15</sup> dans le cadre du processus de révision de la LAT<sup>16</sup>. Des propositions pour intégrer les ressources du sous-sol dans cette loi-cadre sur l'aménagement du territoire ont été discutées. Ainsi la nouvelle LDTer (en cours de consultation au moment de la rédaction), qui remplacera la LAT intègre la notion de hauteur et de profondeur à la notion de territoire.

---

13. service de GÉologie, Sols et DÉChets du canton de Genève

14. Périmètre d'Aménagement Coordonné d'Agglomération

15. office fédéral du développement territorial

16. Loi fédérale du 22 juin 1979 sur l'Aménagement du Territoire

## Chapitre 2

# *Ressources et usages du sous-sol urbain : définitions et typologies*

### **2.1. Notions utiles de géologie, d'hydrogéologie et de thermique du sous-sol**

Ce projet de recherche présente une approche destinée à des milieux disciplinaires variés. Les géologues et autres ingénieurs utilisent des concepts et un vocabulaire propres à leur discipline. L'objectif de ce chapitre est de présenter les clés de lecture nécessaires au non-spécialiste et d'une manière plus générale d'exposer les connaissances de base utiles pour intégrer les ressources du sous-sol à la planification territoriale. Aussi, les concepts présentés sont-ils simplifiés. Le lecteur qui souhaite aller plus loin peut consulter la littérature dans les différents domaines (par exemple en langue française Burger *et al.*, 1985; Castagny, 1982; Dercourt et Paquet, 2002; Gilli *et al.*, 2004; Parriaux, 2006).

#### **2.1.1. Géologie**

La géologie traite de la composition, de la structure, de l'histoire et de l'évolution des couches internes et externes de la Terre, et des processus qui la façonnent. La Terre est une planète tellurique, c'est-à-dire qu'elle est composée d'éléments principalement non volatils, a une surface solide et une densité<sup>1</sup> élevée (par rapport aux planètes gazeuses) de 5.5. Elle est formée de trois enveloppes concentriques, noyau, manteau et croûte. Sa densité croît vers son centre.

Elle s'est formée par accréation gravifique, pour cette raison, elle possède un niveau d'énergie élevé (énergie des collisions). La dissipation de cette énergie est à l'origine de la formation des quatre grandes sphères : hydrosphère, atmosphère, biosphère et géosphère. Les caractéristiques des couches géologiques de la Terre sont ainsi liées à cette dissipation

---

1. Rapport entre la masse volumique du corps étudié et la masse volumique de l'eau pure à 4°C qui sert de corps de référence

énergétique, par des phénomènes mécaniques (par exemple tectonique des plaques) et thermiques (par exemple magmatisme) ainsi qu'aux mouvements de l'hydrosphère et de l'atmosphère.

#### 2.1.1.1. Géologie en milieu urbain

De nombreuses villes se sont développées dans des environnements permettant d'assurer leurs besoins en ressources, principalement en eau potable. Elles se trouvent donc souvent dans des contextes de fond de vallées ou de plaines alluviales. Les villes sont ainsi typiquement construites sur des terrains meubles sédimentaires, avec une forte teneur en eau. Ces terrains sont peu stables pour les travaux souterrains. Les fonds de vallée sont souvent localisés sur des failles tectoniques anciennes ou actives et peuvent être vulnérables aux séismes (figure 2.1). En effet, l'altération et la fissuration du matériel géologique rendent plus facile la formation d'une dépression (Parriaux, 2004).

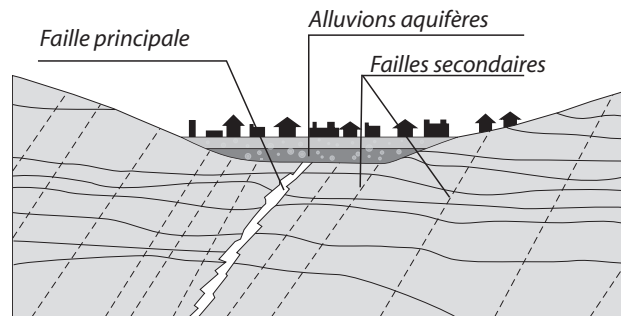


FIGURE 2.1.: Implantation de sites urbains et géologie (source: Parriaux, 2004)

#### 2.1.1.2. Villes suisses

La Suisse est habituellement divisée en trois régions principales : le Jura, les Alpes et le Plateau. Le Plateau suisse qui couvre environ 30 % du pays regroupe l'essentiel des zones d'habitations et des villes. Son altitude varie entre 400 et 600 m. Géologiquement le Plateau est sur un socle cristallin, à une profondeur d'environ 2500 à 3000 m à l'ouest et d'environ 800 m à l'est. Ce socle remonte graduellement vers les Alpes. Il est recouvert de strates de roches carbonatées et marno-calcaires du secondaire, les *nappes helvétiques*. Au-dessus de ces strates se trouve la molasse, roche détritique composée essentiellement de grès et de marnes issus de l'érosion alpine. La couche supérieure est formée par les dépôts quaternaires issus des périodes sédimentaires glaciaires et alluviales (Lemoine, 1978). Le Plateau n'ayant pas été sujet à d'importants mouvements tectoniques, il présente une situation stratigraphique simple où les couches les plus récentes sont superposées aux plus anciennes. La figure 2.2 présente une coupe géologique typique du Plateau suisse au droit de Lausanne jusqu'aux roches carbonatées (crétacé).

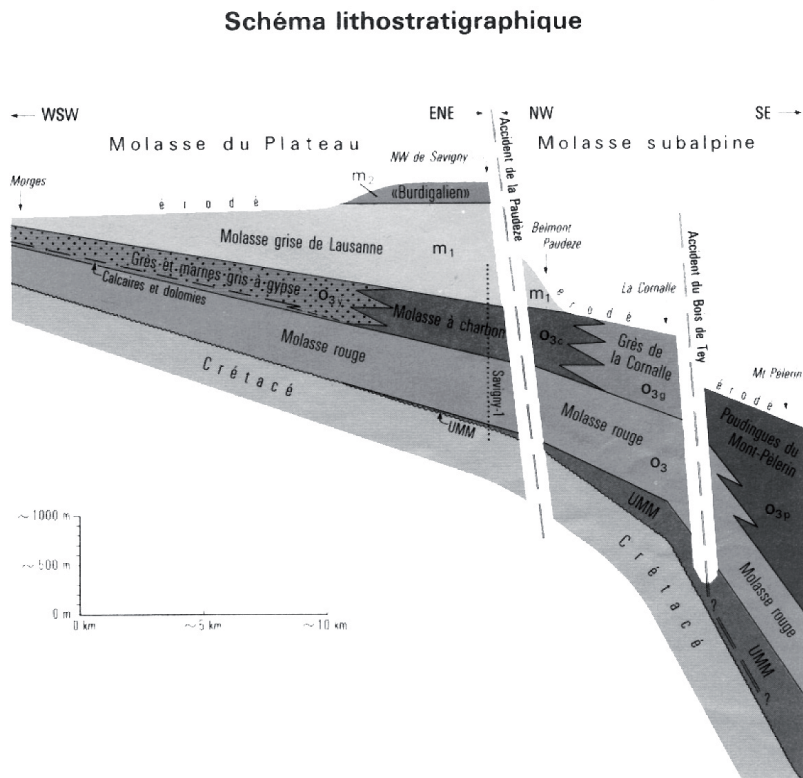


FIGURE 2.2.: Coupe géologique de la ville de Lausanne. (Tirée de la carte géologique suisse 1243 Lausanne)

La densité de l'utilisation du sous-sol diminue fortement avec la profondeur<sup>2</sup>. Aussi, les usages du sous-sol se concentrent principalement dans les premières dizaines de mètres. À ces profondeurs, la géologie rencontrée sur le Plateau suisse est essentiellement composée des dépôts quaternaires et de la molasse peu profonde ou affleurante (figure 2.3).

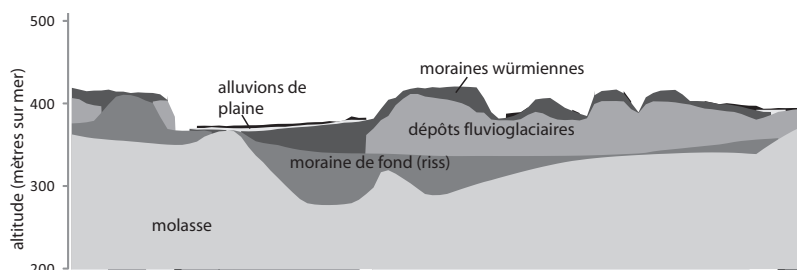


FIGURE 2.3.: Coupe géologique peu profonde au droit de la ville de Genève

Si les villes du Plateau sont prédominantes, cette situation n'est pas unique. On trouve également des villes dans les contextes géologiques du Jura (en particulier Bâle, troisième ville la plus peuplée de Suisse) et des Alpes (par exemple dans les cantons du Tessin et du Valais).

### 2.1.2. Hydrogéologie

L'hydrogéologie est la science qui étudie les eaux souterraines. Ses principaux concepts et définitions sont présentés dans ce chapitre et une typologie simplifiée des contextes hydrogéologiques est développée. L'annexe A décrit des éléments de base de la physique des écoulements souterrains.

Les eaux souterraines jouent un rôle important dans le cycle de l'eau. Les aquifères sont les volumes géologiques qui peuvent contenir des nappes d'eau souterraines susceptibles d'être exploitées. Ils doivent donc avoir deux caractéristiques principales (voir également annexe A) :

- une capacité à stocker de l'eau, définie par la porosité,
- une capacité à laisser circuler librement l'eau, définie par la conductivité hydraulique ou perméabilité.

Le caractère aquifère d'une formation géologique est indépendant de la présence d'eau. La faible capacité, voir l'absence de capacité à laisser circuler librement l'eau définit le caractère aquitard ou aquiclude d'un volume géologique. Un aquiclude est considéré imperméable et forme une barrière à l'écoulement, alors qu'un aquitard est semi-perméable et peut assurer un transfert d'eau entre deux formations plus perméables. Toutefois, aquitard et aquiclude peuvent contenir des quantités importantes d'eau, la porosité et la perméabilité étant des paramètres indépendants.

<sup>2</sup> Duffaut (1980) a par exemple évalué qu'à Paris, 14 % du volume du sous-sol est construit entre 0 et 4 m, 4 % entre 4 et 10 m, et seulement 0.4 % entre 10 et 50 m

En fonction du type de porosité (figure 2.4), on distingue trois grands types d'aquifères (Gilli *et al.*, 2004; OFEFP, 2004) :

- Aquifères des terrains meubles : l'eau circule dans les porosités d'interstice entre les grains du terrain. Les vitesses d'écoulement sont de quelques mètres par jour. Lorsque les couches de couverture de l'aquifère sont d'épaisseurs suffisantes et sont formées de sols fins, les eaux sont bien protégées contre la pollution. Les aquifères des terrains meubles bénéficient généralement d'une bonne épuration naturelle des eaux.
- Aquifères des roches fissurées : l'eau circule dans les discontinuités des massifs rocheux. Les capacités d'épuration et les débits des aquifères en roches fissurées dépendent largement du degré de fracturation. S'il est élevé, l'épuration est faible et le débit élevé, et réciproquement.
- Aquifères karstiques : l'eau circule dans les conduites de dissolution des roches karstiques (calcaire, dolomie et gypse principalement). Ces vides de dissolution ont des dimensions macroscopiques, les plus grands formant les réseaux de grottes explorés par les spéléologues. La vitesse de circulation des eaux y est très rapide et le régime d'écoulement irrégulier. Les eaux karstiques ne sont pas filtrées naturellement et doivent généralement être traitées avant leur utilisation comme eau potable.

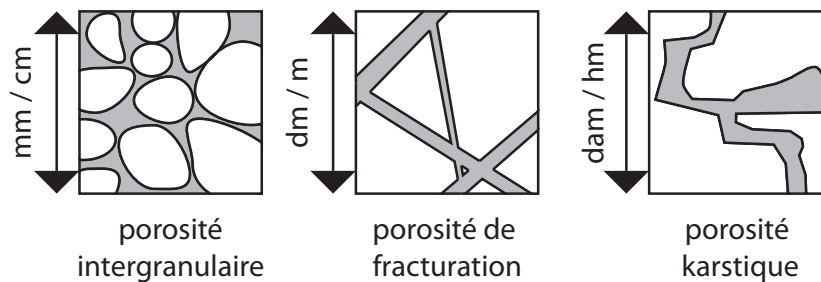


FIGURE 2.4.: Types de porosités des aquifères  
Les échelles de grandeurs sont indicatives

Les principaux aquifères que l'on trouve sous les villes du Plateau suisse sont les aquifères des terrains meubles. En fonction de la genèse des formations aquifères, il est intéressant de distinguer (Dematteis *et al.*, 1997) :

- Les aquifères des alluvions fluviales récentes. Ce sont les formations de remplissage des vallées fluviales actuelles. Leur perméabilité est généralement élevée. De faible profondeur et en communication avec le lit du cours d'eau, leurs eaux se renouvellent rapidement. En revanche, ils ne disposent généralement pas de couches de couverture suffisamment épaisses et sont vulnérables aux pollutions.
- Les aquifères des dépôts fluvio-glaciaires. Ils ont été formés lors des périodes glaciaires. Les terrains sont similaires aux alluvions fluviales récentes, mais ils se trouvent dans des dépressions qui ont été comblées. Ils bénéficient généralement donc de la protection d'importantes couches de couverture (généralement morainiques). Sur le plan qualitatif, ils sont particulièrement intéressants pour l'eau de boisson. Toutefois, leur recharge est souvent faible et ils sont particulièrement vulnérables à la surexploitation.
- Les aquifères des roches molassiques (principalement les grès et les conglomérats). Ces aquifères peuvent présenter les deux types de porosités : porosité intergranulaire dans

les couches superficielles si l'altération a provoqué la dissolution du ciment calcaire ; porosité de fracturation dans les fissures et joints de stratification. Leur conductivité hydraulique est relativement faible, mais ils présentent des réserves en eau très importantes sur le Plateau suisse. Les sources de la molasse sont régulièrement exploitées.

Les nappes souterraines sont les eaux capables de circuler librement dans un aquifère. Ainsi, la nappe est présente dans la zone saturée de l'aquifère. En milieu naturel, on peut distinguer la zone saturée de manière permanente, sous le niveau minimal des eaux, la zone de battement et la zone non saturée ou zone vadose (figure 2.5).

Dans un aquifère saturé protégé par une couche de couverture peu perméable, la nappe peut se mettre en pression sous cette couche. Son potentiel hydraulique<sup>3</sup> est alors supérieur à la côte altimétrique du toit de l'aquifère. Elle est dite captive. Si, lorsqu'un puits est creusé, la nappe jaillit au dessus du niveau du terrain, elle est dite artésienne. Son potentiel hydraulique est supérieur à la côte altimétrique du terrain<sup>4</sup>. Au contraire, une nappe dont le potentiel est inférieur à la côte altimétrique du toit de l'aquifère est dite libre. Par extension, on associe souvent l'aquifère et sa nappe. On parle ainsi d'aquifères libres, captifs ou artésiens, bien que cette terminologie soit abusive.

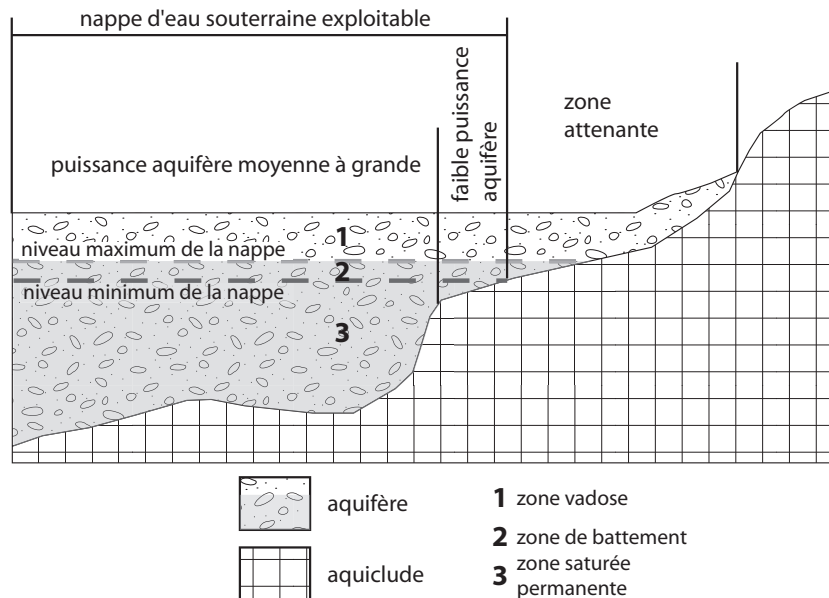


FIGURE 2.5.: Coupe d'un système aquifère : principales définitions. Exemple d'un aquifère des alluvions fluviales récentes à nappe libre.

Les eaux souterraines jouent un rôle important dans les problématiques urbaines. Afin de pouvoir décrire de manière simplifiée les contextes hydrogéologiques dans la suite de l'étude, une typologie est développée. Cette typologie reflète le type de porosité, la perméabilité des terrains et l'utilisation ou non des ressources en eau pour l'eau potable. Elle est présentée à la table 2.1

3. Le potentiel hydraulique est défini en annexe A

4. Une nappe artésienne est donc aussi captive.



TABLE 2.1.: Typologie hydrogéologique.

Explication des codes : Q signifie quaternaire (pour les terrains meubles) R signifie rocher, 1, 2 et 3 sont relatifs à la perméabilité, le suffixe u est accolé si la formation aquifère est exploitée (ou pourrait l'être) pour l'eau potable

Code	Q1/Q1u, R1/R1u	Q2/Q2u, R2/R2u	Q3/Q3u, R3/R3u
Conductivité hydraulique	Faible	Moyenne	Élevée
Hydrogéologie	Aquitard	Aquifère peu important	Aquifère important
Utilisation pour l'eau potable	Exploitation de petites sources	Petites collectivités ou captages privés	Eau de boisson pour les grandes collectivités
Non-utilisation pour l'eau potable (causes)	Rendements insuffisants	Absence de demande ou déficit de protection	Eau souterraine polluée ou déficit de protection
Exemple (terrains meubles)	Moraines de fond, Limons lacustres	Moraines graveleuses, sables	Alluvions fluviales récentes, alluvions fluvioglaciales
Exemple (rocher)	Marnes, Roches cristallines non décomprimées	Molasse marine supérieure	Karst, roches cristallines fortement fissurées
Rendement d'un captage	<50 [l/min]	50-500 [l/min]	>500 [l/min]

### 2.1.3. Thermique du sous-sol

Selon les connaissances actuelles, 99 % de la masse de la Terre est soumise à des températures dépassant 1000°C. Ce phénomène est lié à l'énergie initiale de formation de la Terre, à la dégradation d'éléments radioactifs dans le manteau et aux frottements entre les couches intérieures de la Terre. Cette énergie est dissipée vers la croûte terrestre sous forme de flux géothermique. En moyenne, il est de 0.05 [ $W/m^2$ ], soit 7000 fois moins que le flux solaire moyen, mais 100 fois plus que l'énergie mécanique dissipée par la Terre. Le gradient géothermique est la variation de la température en fonction de la profondeur dans le sol. Près de la surface, il est de 3 degrés par 100 mètres. Gradient et flux géothermique ne sont toutefois pas homogènes sur toute la surface terrestre ; il existe des anomalies thermiques (par exemple, les zones volcaniques) sur la surface de la croûte terrestre où le gradient géothermique peut être beaucoup plus élevé.

Le sous-sol est ainsi le lieu d'échanges thermiques. Le transport de chaleur est un phénomène de diffusion (l'annexe A présente des éléments de base de physique du transport de chaleur). Le sous-sol comporte plusieurs phases : solide, liquide et gaz. La chaleur est diffusée dans chacune des phases. On peut ainsi définir deux formes principales de transport de chaleur dans le sous-sol :

- Le transport par conduction. C'est le transport de chaleur qui se produit par simple contact entre un corps chaud et un corps froid, sans transfert de matière. Dans le sous-sol, c'est le type de transfert qui existerait par exemple au sein d'une roche massive sans discontinuités.
- Le transport par advection (ou convection). C'est le transport de chaleur produit par le déplacement de matière. Par exemple, de l'eau chaude qui se déplace d'un point A à un point B transporte des calories du point A au point B.

Dans le sous-sol, les deux phénomènes sont couplés. En dehors des régions volcaniques, le transport advectif est essentiellement lié aux flux d'eau souterraine. L'importance relative des deux phénomènes, conduction et advection, dépend donc fortement des conditions hydrogéologiques.

## 2.2. Usages des ressources du sous-sol urbain

Les quatre familles de ressources du sous-sol urbain ont été présentées en introduction (chapitre 1) et sont rappelées par la figure 2.6. Ce chapitre vise à décrire les principales utilisations de ces ressources dans le contexte urbain.

### 2.2.1. Usage de l'espace

L'espace souterrain peut accueillir de nombreuses infrastructures. Elles répondent directement ou indirectement aux quatre grandes fonctions habiter, travailler, se divertir, se déplacer. Le sous-sol est souvent utilisé pour le transport et le stockage. À Genève, par exemple, les données géographiques disponibles montrent que plus de 55 % des bâtiments

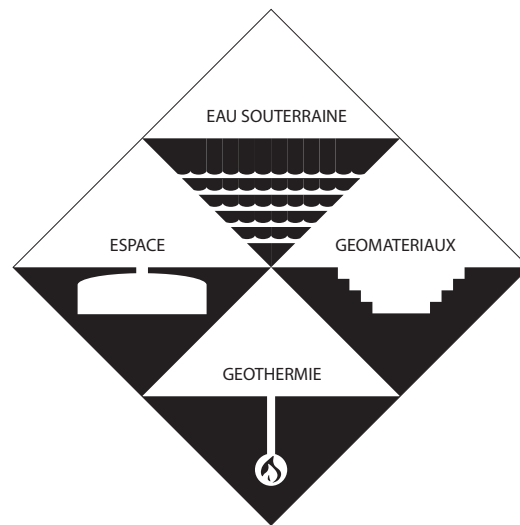


FIGURE 2.6.: Les ressources du sous-sol urbain

construits en sous-sol sont des parkings ou des garages privés. Toutefois, il peut également accueillir des ouvrages destinés à une fréquentation plus large, tels que commerces ou bâtiments récréatifs (théâtres, cinémas, salles de sports, etc.).

Les ouvrages construits en souterrains bénéficient de caractéristiques avantageuses sur le plan de l'isolation thermique, de la protection climatique ou encore de l'isolation visuelle et sonore. En revanche, ils ne peuvent bénéficier de la lumière naturelle que par des ouvertures de type puits de lumière (Godard et Sterling, 1995). Or on constate qu'en surface de nombreux bâtiments, en particulier commerciaux, sont construits sans éclairage naturel. La construction de ces bâtiments en sous-sol pourrait libérer de l'espace en surface, pour des usages récréatifs ou pour construire des ouvrages pour lesquels la lumière naturelle est un critère important (logements, bureaux). Sur le plan énergétique, une étude comparative a été menée dans le cadre du projet Deep City. Elle met en évidence qu'un bâtiment commercial souterrain a, sur l'ensemble de son cycle de vie, une performance comparable à un bâtiment de surface très efficient (standards Minergie) (Poux, 2008).

Dans le cadre de cette recherche on pose deux limites quand il s'agit de considérer les usages de l'espace souterrain :

- Limite spatiale : les réseaux de fluides et de communication (égouts, distribution en eau, électricité, téléphonie, etc.) localisés dans les chaussées ne sont pas pris en compte. En effet, ils sont directement liés aux usages de surfaces (les routes) et sont généralement à faible profondeur. Ainsi, les conditions naturelles du sous-sol influent-elles peu sur la construction de ces infrastructures. Il en va de même pour les fondations superficielles des bâtiments de surface.
- Limite fonctionnelle : le logement en sous-sol n'a pas été étudié. Des expériences d'habitat en sous-sol ou troglodyte existent ou ont fait l'objet de projets artistiques et

architecturaux plus ou moins utopistes (par exemple les « maisons-collines » d’Hundertwasser). La littérature révèle toutefois que dans la ville contemporaine, l’habitat souterrain est socialement mal accepté (voir par exemple: Rönka *et al.*, 1998). Les enquêtes menées par Pierrick Maire dans le cadre du projet Deep City confirment cette hypothèse. Par ailleurs, habiter en souterrain est souvent légalement restreint, voire interdit. Par exemple, dans le canton de Genève, les locaux dont le plancher est situé sous le niveau général du sol adjacent ne peuvent servir à l’habitation (art. 76 et art.127 de la Loi sur les constructions et installations diverses).

Dans la littérature, les usages du sous-sol urbain sont décrits selon différentes approches typologiques (Carmody et Sterling, 1993; Duffaut, 1980; Monnikhof *et al.*, 1998; Utudjian et de France, 1952). Elles sont fondées sur de nombreuses caractéristiques : fonction de l’ouvrage, profondeur, mode de construction, géométrie, âge, coût de construction, caractéristiques du site, etc. La description développée ici sert en premier lieu à lier les usages du sous-sol aux conditions géologiques, hydrogéologiques et au contexte urbain dans lequel les infrastructures s’insèrent. Deux paramètres principaux sont ainsi retenus pour développer une typologie (table 2.2) :

- Emprise géométrique des ouvrages : elle gouverne leur insertion dans le volume géologique. Par ailleurs, elle a une incidence importante dans les liaisons entre la surface et le souterrain et d’une manière plus générale entre les différentes fonctions urbaines.
- Fonction : elle informe sur les flux de personne, d’énergie et de matière dont il faudra tenir compte. Elle est aussi déterminante pour l’insertion urbaine des ouvrages et leur acceptabilité par les utilisateurs.

Les techniques employées pour la construction des ouvrages souterrains<sup>5</sup> sont également un élément important de description des infrastructures souterraines. L’annexe B présente une synthèse de ces techniques et méthodes.

TABLE 2.2.: Typologie des usages de la ressource espace

Emprise géométrique	Fonction	Ouvrages impliqués
Ponctuelle	Technique et industrie	Parking
		Stockage / technique / industrie
	Tertiaire	Gares, pôles d’échange
		Bâtiments commerciaux Bâtiments récréatifs
Linéaire horizontale	Transport	Rail
		Route
		Piéton
		Technique
Linéaire verticale	Technique	Fondations profondes
		Captage d’eau souterraine
		Exploitation géothermique

5. Dans ce travail, on parle de *construction d’ouvrages souterrains* pour l’ensemble des infrastructures dans le sous-sol, construites depuis la surface ou le souterrain. Le terme de *construction souterraine* est réservé, selon les usages des ingénieurs, à la construction depuis le sous-sol des tunnels et des cavernes.

### 2.2.2. Usage des géomatériaux

De nombreux types de matériaux de construction sont utilisés dans les villes. Parmi ces matériaux, les géomatériaux ont une place prépondérante dans le métabolisme urbain. En termes de masse, 75 % de l'ensemble des flux de matières<sup>6</sup> aux États-Unis sont des granulats minéraux (Decker *et al.*, 2000). À Genève, les matériaux de construction représentent le principal flux de ressources solides (Erkman, 2005). Par ailleurs, des études menées à Vienne, Hong-Kong et Hambourg montrent que le volume et la distance parcourue par ces matériaux ont continuellement augmenté depuis les années cinquante. Cette augmentation est plus rapide que l'augmentation de la population (Kennedy *et al.*, 2007). Les villes dépendent donc toujours plus de géomatériaux qui proviennent de plus en plus loin.

En parallèle, une quantité très importante de matériaux est excavée chaque année pour des travaux de construction. En 1998, elle a été évaluée entre 30 et 40 millions de  $m^3/an$  pour la Suisse (OFEFP, 1999). Une partie importante de ces matériaux est évacuée en dehors de la ville dans des sites de stockage.

Aujourd'hui, la Suisse et de nombreux autres pays industrialisés sont soumis à deux contraintes importantes : la raréfaction des géomatériaux primaires (par exemple, la grave naturelle) et la difficulté de trouver des sites de stockage définitifs. Cette contrainte est d'autant plus grande que les objectifs de protection de l'environnement ont fait diminuer tant la ressource exploitable que les possibilités de dépôt (Houmard, 2004). Par ailleurs, les transports de matériaux vers et depuis la ville ont un coût environnemental et économique élevé. L'exploitation spécifique de géomatériaux sous forme de gravières ou carrières n'est pas possible dans le tissu bâti, essentiellement pour des questions de nuisances et de sécurité. En revanche, il existe un réel intérêt à favoriser le recyclage des matériaux d'excavation, de préférence pour les utiliser dans la ville.

Les géomatériaux ont deux usages principaux en milieu urbain :

- Matériaux minéraux de construction, en grande partie des granulats de béton et d'enrobés, mais aussi des blocs pour la protection contre l'érosion, des matériaux entrant dans la fabrication du ciment et du plâtre et des pierres naturelles pour la construction.
- Matériaux de remblai pour les infrastructures routières et ferroviaires, les comblements de fouilles et les modifications de terrains.

La majorité des matériaux d'excavation sont des matériaux meubles ou des matériaux rocheux concassés. Aussi, dans la suite de l'étude, la problématique des géomatériaux est-elle essentiellement traitée pour ce type de matériaux. Toutefois, la valorisation de la pierre naturelle massive présente des potentialités qui méritent d'être soulignées (Zerbi, 2008). Une réelle demande existe pour ce type de matériaux, en particulier pour la rénovation de bâtiments historiques. Le nombre de carrières de pierres naturelles a sensiblement diminué au cours des dernières décennies en Suisse, si bien que l'approvisionnement des chantiers de restauration devient de plus en plus problématique. Les travaux d'excavation peuvent offrir l'occasion de « produire » des pierres naturelles. Par ailleurs, les bâtiments historiques sont souvent situés dans des contextes urbains ; les

---

6. L'eau, les hydrocarbures et la nourriture exclus.

chantiers réalisés en ville permettent d'exploiter des matériaux ayant les mêmes origines et donc les mêmes propriétés que les matériaux utilisés lors de la construction des bâtiments.

### 2.2.3. Usage de l'eau souterraine

Les eaux souterraines sont une composante importante du cycle de l'eau. Elles occupent le 2<sup>e</sup> rang des réserves mondiales d'eau douce après les eaux contenues dans les glaciers. En Suisse 82 % des besoins en eau potable et des usages industriels sont couverts par des eaux souterraines.

En milieu urbain, les aquifères souffrent souvent d'un déficit de protection. Cependant, en Europe occidentale et orientale, ils produiraient 40 % de l'eau distribuée dans les réseaux (Eiswirth *et al.*, 2004). Ailleurs, de très grandes métropoles (par exemple. Mexico, Calcutta, Téhéran, Shanghai) dépendent de ressources en eau provenant d'aquifères urbains ou périurbains (Wolf *et al.*, 2005). L'augmentation de la population, l'urbanisation ainsi que les changements climatiques prévisibles vont vraisemblablement augmenter la pression pour l'utilisation des ressources urbaines. Par ailleurs, les eaux souterraines étant une ressource indigène, leur exploitation est économique sur le plan énergétique. Aussi, leur mise en valeur avec des objectifs de protection qualitative et une gestion quantitative durable est-elle favorable au développement durable urbain. L'émergence récente de l'hydrogéologie urbaine dans les milieux de la recherche a mis l'accent sur cette problématique et des outils voient le jour pour adopter une gestion des eaux adaptée au contexte urbain (Chilton, 1997; Vázquez-Sune *et al.*, 2005; Vázquez-Sune et Sánchez-Villa, 2003; Wolf *et al.*, 2006).

Les eaux souterraines urbaines sont utilisées pour des usages variés (boisson, industrie, irrigation, etc.). Leur distribution est réalisée selon trois destinations principales :

- Le réseau de distribution urbain ; c'est le réseau principal mis en place dans la plupart des villes du monde. Dans les villes des pays industrialisés, il véhicule en général l'essentiel des ressources en eau potable.
- Des réseaux alternatifs ; ils se développent en particulier lorsque les ressources en eau potable sont limitées et qu'existent des ressources de grande quantité, mais de faible qualité. Ils ne sont pas forcément liés à des infrastructures fixes (tuyaux). Il peut s'agir de « réseaux de distribution mobile », par exemple distribution par camions-citernes. À Barcelone, l'eau usée polluée de la nappe phréatique est ainsi utilisée pour l'irrigation des parcs publics (Vázquez-Sune et Sánchez-Villa, 2003).
- Des captages ponctuels pour des utilisateurs individuels (industrie, ménages, etc.).

### 2.2.4. Usage de l'énergie géothermique

Le flux géothermique et la capacité de stockage de chaleur du sous-sol peuvent être exploités sous différentes conditions et par différents moyens dans le sous-sol. On distingue ainsi (figure 2.7) :

- La géothermie de faible profondeur (basse enthalpie). Le flux géothermique est exploité pour produire de la chaleur. Les ouvrages sont couplés à une pompe à chaleur. La capacité thermique du sous-sol peut également être utilisée comme source de froid pour la climatisation. Les profondeurs des installations sont typiquement entre 0 et 250 m, la température du sol entre 10 et 20°C. On distingue :
  - Les systèmes ouverts : l'énergie de l'eau souterraine est exploitée directement. L'eau souterraine est pompée et exploitée par la pompe à chaleur comme source de chaud ou de froid. L'eau est en général réinjectée dans le même aquifère en aval du point de prélèvement, à une distance suffisante pour éviter un refroidissement au point de captage.
  - Les systèmes fermés : la chaleur du sous-sol est exploitée par conduction : un fluide caloporteur circule dans un circuit fermé. Le fluide se réchauffe (ou se refroidit) au contact du terrain.
- La géothermie de moyenne profondeur (moyenne enthalpie). Le flux géothermique est utilisé pour produire de la chaleur. L'exploitation se fait par des systèmes ouverts, les cibles hydrogéologiques étant les aquifères profonds. La chaleur de l'eau souterraine est utilisée directement sans pompe à chaleur. La gamme des températures exploitées est typiquement de 60 à 80°C. Les profondeurs sont de l'ordre de 2 à 2.5 km environ. Les essais d'exploitation de l'énergie géothermique de moyenne profondeur restent peu concluants. En Suisse, une dizaine de forages ont été réalisés, un seul a permis la construction d'un chauffage de quartier à Riehen près de Bâle (Parriaux *et al.*, 2006). En effet, la perméabilité est généralement insuffisante à ces profondeurs et les eaux sont fortement minéralisées et posent des problèmes de colmatage et de précipitation dans le réservoir géothermique et les infrastructures d'exploitation. En présence d'anomalie thermique, l'exploitations peut se faire à des profondeurs plus faibles (eaux thermales par exemple). Enfin, on peut exploiter l'énergie des eaux de drainage des tunnels.
- La géothermie de grande profondeur (haute enthalpie). Le flux géothermique est exploité par des systèmes ouverts pour produire de l'électricité et de la chaleur. Les températures sont supérieures à 100°C et la profondeur des ouvrages dépasse les 5 km. L'exploitation de l'énergie géothermique de haute enthalpie est aujourd'hui en plein développement. Plusieurs installations pilotes de systèmes géothermiques dits stimulés sont actuellement conçues. Un réservoir aquifère est créé artificiellement par mise en pression de forages pour créer une fracturation dans des roches massives. En suisse, le projet Deep Heat Mining à Bâle<sup>7</sup> reprend cette idée.

En milieu urbain, suivant les conditions géologiques et hydrogéologiques, tous les modes d'exploitation sont envisageables. Cependant, dans le cadre de la gestion des ressources du sous-sol urbain, seuls les ouvrages de faible profondeur entrent en réelle interaction avec les autres ressources du sous-sol urbain, c'est donc sur ces derniers que portera l'attention. Les usages de moyenne et grande profondeur sont beaucoup moins nombreux et leur interaction avec les autres ressources est principalement liée à leur emprise spatiale (des puits verticaux ou subverticaux qui traversent la « ville souterraine »).

---

7. Au moment de la rédaction de ce rapport, le projet est arrêté, car le processus de forage et de fracturation pose des problèmes sismiques importants qui peuvent être rédhibitoires en milieu urbain.

En Suisse, les sondes géothermiques sont l'objet d'un intérêt particulier. En 2007, 71 % de la production d'énergie géothermique renouvelable, soit 876 GWh provenait de ces systèmes. 48'460 sondes étaient installées, soit 6000 de plus qu'en 2006 ou encore 26'000 de plus qu'en 2000. Ceci fait de la Suisse le pays qui possède le plus grand nombre de sondes géothermiques installées par habitant. Ces installations sont essentiellement développées pour des villas et de petits bâtiments, donc plutôt en milieu périurbain (Lund et Freeston, 2001; Signorelli *et al.*, 2008).

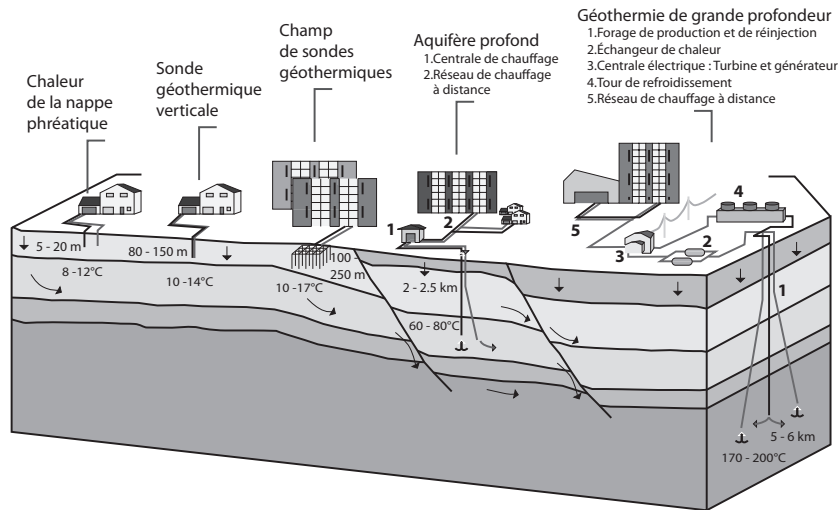


FIGURE 2.7.: Utilisation de l'énergie géothermique (source : centre de recherche en géothermie, Neuchâtel)



## Chapitre 3

# *Évaluation des modes de gestion des ressources du sous-sol passés et actuels*

Ce chapitre présente une synthèse de cinq études de villes ayant utilisé les ressources de leur sous-sol pour assurer le développement urbain. Dans un premier temps, les cinq études de cas sont présentées selon une structure commune :

- Contexte.
- Développement de chacune des ressources du sous-sol : l'ordre de présentation reflète l'historique des développements.
- Enjeux et défis rencontrés.

Dans un deuxième temps, est menée leur analyse comparative.

### **3.1. Cinq itinéraires de développement des ressources du sous-sol**

#### **3.1.1. Mexico**

##### **3.1.1.1. Contexte**

La ville de Mexico City est située dans un bassin versant d'origine volcanique. C'est un bassin versant endoréique : à l'état naturel il ne dispose pas d'exutoire, les apports étant compensés par l'évaporation (Bradbury, 1971). Le contexte géologique est présenté à la figure 3.1. L'activité volcanique a donné naissance aux formations 5 et 6 de la figure : rhyolites, andésites et rhydasites, tufs et dépôts pyroclastiques. Ces formations sont fortement aquifères et sont recouvertes d'épaisses couches de dépôts alluviaux et lacustres aquitards.

La pression démographique sur Mexico est très forte, bien qu'en relative baisse depuis les années quatre-vingt. Cette baisse est due à des politiques de désindustrialisation

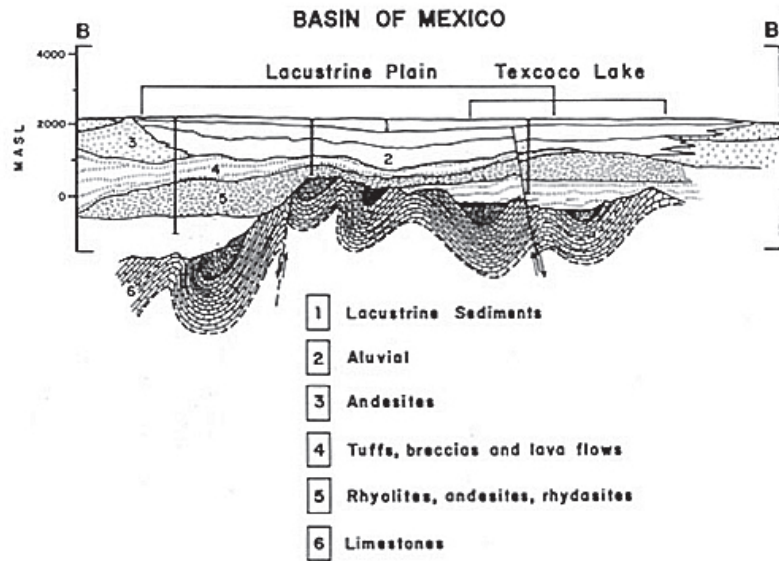


FIGURE 3.1.: Coupe géologique simplifiée du bassin de Mexico (source: González-Morán *et al.*, 1999)

et de décentralisation et à une diminution de la qualité de vie liée aux problèmes de surpopulation et de pollution (Connolly, 1999; Decker *et al.*, 2000).

### 3.1.1.2. Usages de l'eau souterraine

Le développement de la ville de Mexico apparaît comme une suite d'erreurs stratégiques du point de vue des ressources en eau (Cowen, 2008). Les nombreux lacs et marais du bassin ont imposé des mesures particulières de construction aux premiers habitants. Si les Aztèques, dès le 14<sup>e</sup> siècle, ont opté pour la construction sur pilotis et l'endiguement des lacs, les colons espagnols ont mis en oeuvre de très importants travaux de drainage entre le 16<sup>e</sup> et le 19<sup>e</sup> siècle. L'interception des eaux de surface en amont du bassin versant a imposé de se tourner vers d'autres ressources en eau que celle de la surface pour l'approvisionnement de la ville. Dès le 19<sup>e</sup> siècle, l'aquifère d'origine volcanique situé sous la ville est largement exploité. Les premiers puits sont artésiens, mais assez vite, la ressource est surexploitée et les niveaux piézométriques baissent, imposant la construction de puits de plus en plus profonds. En 1957, la ville comptait environ 3000 puits à des profondeurs de 20 à 30 m, en 1998, il y en avait plus de 10'000 dont les deux tiers construits sans autorisation, leurs profondeurs variaient entre 70 et 200 m. Actuellement, l'alimentation en eau potable de la ville provient à 71 % du sous-sol (Birkle *et al.*, 1998; Fox, 1965).

### 3.1.1.3. Usages de l'espace souterrain

L'espace souterrain de Mexico a été utilisé pour construire :

- Des systèmes de fondation : souvent des pieux imposés par la forte compressibilité et la faible portance des argiles affleurant dans le bassin.
- L’approvisionnement et l’évacuation des eaux.
- Des lignes de métro.

Le drainage du bassin versant pour construire la ville a eu pour conséquence la construction de véritables tunnels d’exhaure. Un premier tunnel a été construit au début du 20<sup>e</sup> siècle. Il a été complété en 1972 par un nouvel ouvrage de 200 m<sup>3</sup>/s de capacité, construit à une profondeur de 200 m. C’est un captage unitaire pour les eaux pluviales et usées. En 2000, un troisième tunnel de 35 m<sup>3</sup>/s de capacité est construit à 20 m de profondeur (González-Morán *et al.*, 1999; Tortajada, 2006). Par ailleurs, des tunnels de distribution de l’eau potable permettant d’importer l’eau d’autres bassins versants sont construits dès les années soixante-dix (Haddad, 1991).

Le développement de réseaux de métros est relativement récent, la première ligne datant de 1968. Les conditions du sous-sol de Mexico sont relativement défavorables pour ce type d’ouvrage. En 1995, on comptait 10 lignes de métro : 116 km en souterrain (dont 90 construits depuis la surface en tranchées couvertes) et 66 en surface. Les ouvrages sont tous situés à des profondeurs faibles, souvent juste sous la surface. Les premières constructions de parkings souterrains ont débuté en 1995 (Vera *et al.*, 1995).

#### 3.1.1.4. Usages des géomatériaux

L’utilisation par les Aztèques du système agricole des Chinampa pour construire les digues peut être considérée comme une valorisation des géomatériaux locaux. Avec cette technique, les terrains argileux étaient dressés en digues séparées par des canaux dans lesquels les argiles avaient été prélevées. Les argiles ont également été utilisées dans la construction de briques. Pour les bâtiments importants cependant, il a été fait appel à des roches volcaniques, de préférence alvéolaires en raison de leur faible densité (compressibilité des argiles) (Cowen, 2008).

La littérature ne mentionne pas la réutilisation des géomatériaux urbains à l’époque moderne. Il est probable que l’utilisation de brique en argile soit toujours effective dans les zones urbaines autoconstruites, en association avec divers matériaux de récupération. Cependant pour la construction « en dur », le substrat argileux n’est pas favorable à une réutilisation peu coûteuse. Mexico City comme la plupart des mégapoles dépend de manière très importante des flux de matière extérieurs à la zone urbaine (Decker *et al.*, 2000).

#### 3.1.1.5. Usages de la géothermie

Au Mexique, la ressource géothermique a essentiellement été utilisée pour la production électrique. L’utilisation de l’énergie sous forme de chaleur est limitée à quelques projets pilotes dans les champs géothermiques de Los Azufres et Los Humeros et aux besoins de centres thermaux. La ressource géothermique (en particulier géothermie de basse enthalpie) n’est pas, à notre connaissance, exploitée dans la ville de Mexico (Lund et Freeston, 2001; Quijano-León et Gutiérrez-Negrín, 2000).

### 3.1.1.6. Enjeux et défis liés à l'utilisation des ressources du sous-sol

L'aquifère situé sous la ville de Mexico est massivement surexploité (Birkle *et al.*, 1998; González-Morán *et al.*, 1999; Hunt, 1990). Birkle *et al.* (1998) estime ainsi que les prélèvements sont de 2,7 à 4 fois supérieurs à la recharge. Cette surexploitation a pour conséquence la mise en péril de l'approvisionnement en eau potable de la ville à long terme. À court terme elle est responsable d'un important phénomène de subsidence<sup>1</sup>. Au centre de Mexico, l'altitude du terrain a baissé en moyenne de 7,5 m (Villa *et al.*, 2005). En raison de la nature hétérogène des substrats géologiques, la subsidence n'est pas homogène. Les tassements différentiels engendrent des dégâts majeurs sur les infrastructures en surface et dans le sous-sol (González-Morán *et al.*, 1999; Guerra, 1992; Tortajada, 2006; Vera *et al.*, 1995). Selon Gomez Galvarriato Freer (2005), la subsidence est responsable d'une importante dégradation des tunnels d'exhaure du bassin de Mexico, ils voient leur structure se détériorer et leur pente diminuer.

La subsidence a pour conséquence indirecte la dégradation de la qualité de la nappe phréatique sous Mexico. D'une part, les réseaux d'eaux usées subissent de nombreuses fuites et transfèrent leurs polluants vers l'aquifère. D'autre part, la subsidence a conduit à une fracturation de l'aquifère à l'échelle du bassin, et donc à la formation de chemins d'infiltration pour les eaux de surface polluées (Gomez Galvarriato Freer, 2005; González-Morán *et al.*, 1999; Hunt, 1990; Tortajada, 2006).

Si les ressources en eau souterraine ont permis le développement de Mexico, leur gestion est une question cruciale pour le futur de Mexico. Le bilan hydrologique met en évidence un paradoxe : des quantités importantes d'eau souterraine sont consommées, alors que des quantités comparables d'eau de surface sont évacuées. Une meilleure fermeture du cycle hydrologique est indispensable. Elle pourrait être appuyée par des mesures de gestion au niveau du bâtiment (Gomez Galvarriato Freer, 2005) ou une stratégie de réalimentation artificielle à l'échelle de l'aquifère (Birkle *et al.*, 1998; Gomez Galvarriato Freer, 2005). Par ailleurs, le lien est critique entre la ressource en eau et la ressource espace mise en péril par le phénomène de subsidence. La gestion des deux ressources devrait ainsi être coordonnée. Les entretiens avec des acteurs sur place ont mis en évidence le manque de communication entre les domaines techniques des services administratifs concernés par l'une ou l'autre des ressources.

## 3.1.2. Paris

### 3.1.2.1. Contexte

Paris est situé dans un grand bassin sédimentaire. Le substrat principal est composé de craie calcaire (tertiaire) recouverte de séries marno-calcaires et de remplissages quaternaires. Deux formations principales sont aquifères : les alluvions de la Seine à nappe libre et les sables yprésiens à nappe captive (figure 3.2). Les formations calcaires contiennent également localement des nappes.

---

1. La diminution de la pression hydrostatique dans l'aquifère entraîne la compression des argiles et de la matrice de l'aquifère.

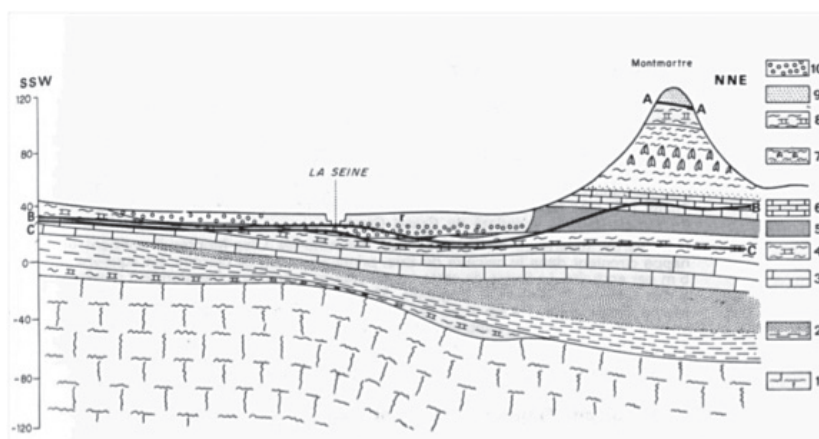


FIGURE 3.2.: Coupe Géologique au droit de Paris (source : Diffre et Pomerol (1979))

1. Craie et marnes de Meudon
2. Argile et sables yprésiens
3. Calcaire grossier
4. Marnes et caillasses
5. Sables de Beauchamp
6. Calcaire de St-Ouen
7. Sables de Monceau, marnes et masses du gypse
8. Argile verte et Marnes à huitres
9. Sables de Fontainebleau
10. Alluvions

### 3.1.2.2. Usages des géomatériaux

De l'époque Romaine jusqu'en 1813, l'essentiel des pierres de construction de Paris a été extrait de son sous-sol : pierre de taille dans les calcaires et les grès, briques en terre cuite à partir des séries de limons et argiles, exploitation des graviers et des sables, chaux vive par calcination de la craie puis plâtre à partir du gypse. L'absence de coordination des extractions souterraines a conduit à de nombreux problèmes d'effondrements. En 1813, un décret a interdit les carrières souterraines dans Paris et les a règlementées dans le département de la Seine. Selon l'ingénieur Lefebure de Fourcy, des vides existaient sous environ un dixième de la surface de la ville en 1854. Dès le 19<sup>e</sup> siècle, le service de l'inspection générale des carrières a assuré la réalisation d'un atlas des carrières et a coordonné la stabilisation des zones à risques (Diffre et Pomerol, 1979; Héricat de Thury, 1815; Keller, 1895; Lefebure de Fourcy, 1854).

### 3.1.2.3. Usages de l'espace

Le grand réseau d'égouts souterrains se développe sous Napoléon III. L'ingénieur Eugène Belgrand (1810-1878), sous la direction du baron Georges Haussmann (1809-1891), en a assuré la réalisation. Ce réseau unitaire entièrement visitable a été construit en maçonnerie et forme un véritable réseau de tunnels sous les rues de la ville. En 1989, il comptait 898 km (Daverton, 1922; Diffre et Pomerol, 1979; Gandy, 1999).

La première ligne de métro souterrain a été inaugurée en 1900 porte de Vincennes. Le choix du parcours essentiellement souterrain était déjà lié à l'encombrement de la surface, la solution en viaduc ayant été jugée trop coûteuse. Cette première ligne a été construite

en sous-oeuvre depuis des galeries d'accès. Entre 1898 et 1938, quinze lignes de métro ont été construites. Leur profondeur maximale est de 63 m. Ces galeries ne sont pas étanches et ont drainé la nappe alluvionnaire dès leur construction, imposant le recours à des pompages importants. Ainsi, en 1974, on devait pomper trois millions de  $m^3$  d'eau dans le réseau pour le maintenir fonctionnel. Depuis 1938, seule une nouvelle ligne a été construite en 1998 (Barles, 1995; Clément, 2001; Diffre et Pomerol, 1979; Duffaut et Mégnin, 1995; Tournier et Doublet, 1996).

Dès les années soixante, le réseau a été complété par les lignes RER pour la liaison avec la banlieue. En raison de l'encombrement du sous-sol, ces ouvrages ont été construits plus en profondeur que le métro. Par exemple, la ligne E construite entre 1993 et 1999 est située entre 25 et 45 m de profondeur. En 2008, ce réseau comptait 76,5 km en souterrain (pour 587 km au total). La construction des lignes RER a donné lieu à de nombreuses évolutions techniques, telles que l'utilisation de machines à pleine section (tunneliers) ou la réalisation de tunnels étanches supportant des pressions de 20 m et plus (voir annexe B) (Barles, 1995; Clément, 2001; Diffre et Pomerol, 1979; Duffaut et Marin, 1987; Duffaut et Mégnin, 1995).

De nombreux bâtiments et sous-sol de bâtiments ont également été construits dans le sous-sol de Paris. Ils ont bénéficié des développements technologiques des ouvrages de transports (par exemple pour la construction en nappe) et les ont accompagnés. Certains de ces bâtiments sont emblématiques de la ville de Paris : par exemple la salle souterraine de la banque de France (1927), le bâtiment souterrain de l'UNESCO (1965), le forum des Halles (1979) ou l'entrée du Grand Louvre (1988) (Barles et Jardel, 2005; Diffre et Pomerol, 1979; Duffaut et Mégnin, 1995).

#### 3.1.2.4. Usages de l'eau souterraine

Jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle, de nombreux puits domestiques et collectifs ont servi l'approvisionnement en eau potable de Paris. Au 19<sup>e</sup> siècle, les nappes des sables yprésiens ont été abondamment exploitées, avec le forage de nombreux puits artésiens. À partir du 20<sup>e</sup> siècle, la qualité des eaux de la capitale a sensiblement diminué en raison des pollutions diffuses et ponctuelles liées en particulier aux fuites d'eaux usées et aux pollutions dues aux travaux et aux ouvrages souterrains. Sur le plan quantitatif, les directions d'écoulement et les échanges avec la Seine ont été largement modifiés par les interactions avec les ouvrages souterrains. Suivant leur mode de construction, ces derniers jouent un rôle de drainage ou un rôle de barrage pour les écoulements souterrains. Aujourd'hui, les eaux de Paris sont puisées dans les champs aquifères des communes périphériques et dans l'eau traitée de la Seine (Barles, 2007; Deveughele *et al.*, 1983; Diffre et Pomerol, 1979; Koch, 1949; Monnier, 2001; Mourey et Vernoux, 2000; Sentenac, 1928).

#### 3.1.2.5. Usages de la géothermie

Depuis la crise pétrolière de la fin des années soixante-dix, l'utilisation de l'énergie géothermique s'est développée en France. Dans la zone urbaine de Paris, l'énergie de basse enthalpie est captée, essentiellement dans la nappe de l'Yprésien à l'aide de pompes à chaleur. En périphérie, plusieurs constructions de doublets géothermiques (énergie de

moyenne enthalpie) ont été réalisés, dans la nappe du Dogger, depuis le début des années quatre-vingts (Barbier, 2002; Laplaige *et al.*, 2000, 2005; Lund et Freeston, 2001).

### 3.1.2.6. Enjeux et défis liés à l'utilisation des ressources du sous-sol

Paris a expérimenté un important développement d'infrastructures dans son sous-sol. En l'absence de coordination, ce développement aboutit à un encombrement et compromet les développements futurs. Ce phénomène est dénoncé dès le début du 20<sup>e</sup> siècle, par l'architecte Eugène Hénard qui plaide pour une organisation des rues à étages multiples (Hénard, 1903). Le concept d'urbanisme souterrain naît à l'initiative d'Édouard Utudjian qui fonde en 1933 le GECUS<sup>2</sup>. Son message principal est l'utilisation coordonnée du sous-sol, et son intégration à la planification urbaine par la mise en œuvre d'un zonage vertical. Ces idées, en opposition avec le mouvement progressiste (voir note page 3) qui prône une ségrégation fonctionnelle de l'espace, n'ont jamais réellement été mises en pratique. L'association espace souterrain a succédé en 1988 au GECUS comme comité spécialisé de l'AFTES<sup>3</sup>. Elle a échoué en 2000 à faire accepter une proposition de loi intégrant le sous-sol dans le code de l'urbanisme<sup>4</sup>. Ainsi, le courant théorique de l'urbanisme souterrain n'a jamais eu de réelle conséquence dans l'urbanisme opérationnel et le sous-sol souffre de deux maux principaux : sa méconnaissance et sa désorganisation (Barles, 1995, 2006; Barles et Jardel, 2005; Besner, 2002; Duffaut et Labbé, 2002; Utudjian, 1952; Utudjian et de France, 1952).

Les problèmes liés aux eaux souterraines sont également de grande importance. Sous la ville de Paris, les ressources en eau ont été largement polluées et ne sont plus exploitées pour l'eau potable. Depuis les années soixante-dix, l'abandon des puits pollués et la désindustrialisation de Paris ont conduit à une remontée des niveaux phréatiques. Les ouvrages souterrains non étanches, en particulier les métros, exigent de mettre en œuvre d'importants pompages et engendrent des coûts importants sur le long terme (Monnier, 2001; Parriaux, 2004; Prunier-Leparmentier, 1991).

## 3.1.3. Helsinki

### 3.1.3.1. Contexte

Helsinki est située sur une péninsule d'environ 7 km de long dans le golfe de Finlande. Son climat est de type continental tempéré et en raison de sa latitude élevée, elle ne dispose que de 6 heures d'ensoleillement lors du solstice d'hiver. Géologiquement, la ville repose sur un soubassement rocheux cristallin (granites et gneiss) sur lequel se trouvent des formations de dépôts quaternaires issus des glaciations du Pléistocène. Ces formations morainiques, essentiellement des terrains fins, de faible épaisseur (0 à 10 m), sont peu perméables et fortement plastiques (figure 3.3). Les eaux souterraines circulent

---

2. Groupe d'Étude et de Coordination de l'Urbanisme Souterrain

3. Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain

4. Cette proposition qui aurait été intégrée sous forme de deux amendements au projet de loi sur la solidarité et le renouvellement urbain n'a pas été adoptée, par peur de retarder le processus de mise en œuvre de la loi.

dans les fractures et fissures du soubassement rocheux et dans les dépôts quaternaires les plus grossiers (Anttikoski *et al.*, 1994; Anttikoski et Raudasmaa, 1984; Vähäaho *et al.*, 2004).

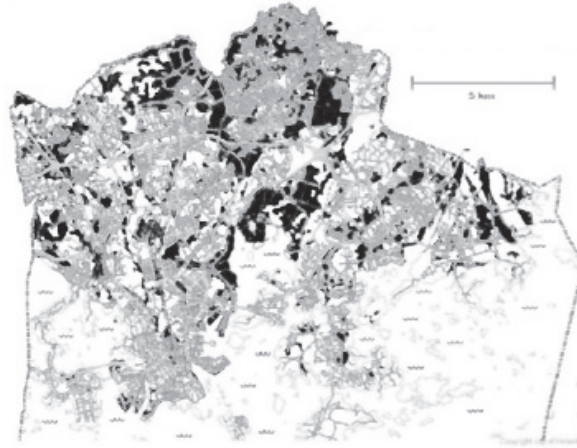


FIGURE 3.3.: Carte géotechnique d'Helsinki (source : Vähäaho *et al.*, 2004)  
Les aires noires indiquent les zones argileuses.

### 3.1.3.2. Usages de l'espace

Par sa situation enclavée et la faible qualité des terrains quaternaires comme sol de fondation, Helsinki a très tôt été obligée d'exploiter au mieux l'espace. Les possibilités de développement par étalement urbain étant réduites sur une presqu'île, la maîtrise de la densification a été une clé pour le développement des activités économiques et la qualité de vie de la capitale.

Les premiers usages de l'espace souterrain datent des années 1920 avec les premiers tunnels dévolus à l'exploitation et la distribution de l'énergie hydroélectrique. Entre les années soixante et quatre-vingt, de nombreux tunnels ont été percés pour les réseaux de transport et les espaces techniques et de stockage, de nombreux abris de protection civile ont également été percés en souterrain. Plus récemment, de grandes cavernes ont été réalisées ; elles accueillent des ouvrages aussi variés qu'une station d'épuration, une piscine ou des commerces. En 1993, le volume des constructions souterraines était estimé à 6 millions de  $m^3$ , soit  $12 m^3/pers.$  Parmi les ouvrages souterrains d'Helsinki, on peut citer : un tunnel de 120 km pour l'adduction en eau potable, le réseau de chaleur qui couvre 90 % des besoins de la ville, un métro, la zone d'activité du centre-ville Kluuvi Area, la station d'épuration des eaux, la piscine Itäkeskus, les centres sportifs de Kontula et Merihaka (Anttikoski *et al.*, 1994; Rönka *et al.*, 1998).

Ces développements importants de l'espace souterrain ont été rendus possibles par la situation géologique d'Helsinki. Le soubassement rocheux cristallin se prête en effet très bien à l'excavation à l'explosif. Les développements technologiques ont permis de réduire les nuisances en surface. La bonne qualité du rocher ne demande pas des techniques



poussées de soutènement ; dans les zones les plus fracturées, les voûtes sont renforcées au béton projeté ou par boulonnage. Ainsi, à Helsinki, la construction souterraine est relativement bon marché. Selon Anttikoski *et al.* (1994), elle est compétitive avec la construction de surface (d'autant plus que de nombreux sols sont de mauvais sols de fondation). Lorsque le foncier ne doit pas être acquis, la construction souterraine est même moins chère. Par ailleurs, la consommation énergétique des bâtiments en sous-sol serait inférieure de 30 % à celle des bâtiments de surface. Enfin, la qualité du soubassement rocheux permet le développement de cavernes de grande taille, des portées de plus de 50 m ont été atteintes et il serait théoriquement possible de doubler ce chiffre (Anttikoski *et al.*, 1994; Hokkanen *et al.*, 1994; Rönkä *et al.*, 1995).

### 3.1.3.3. Usages des géomatériaux

En moyenne, 200'000 m<sup>3</sup> de matériaux rocheux sont extraits chaque année des constructions souterraines. Ces matériaux sont valorisés dans trois filières principales (Geotechnical office Helsinki, 1978; Holopainen, 2008) :

- La plus grande partie est utilisée comme remblai. Entre 2005 et 2008, la majorité des matériaux a été utilisée en remblai dans la construction du nouveau port. Ces matériaux sont aussi largement employés dans les travaux de « préconstruction » c'est-à-dire l'ensemble des travaux servant à transformer des terrains inaptes à la construction (terrains trop argileux, teneur en eau très élevée, etc.) en terrains aptes et des travaux de remblaiement sur la mer.
- Une part importante est broyée en granulats et utilisée en remplacement des graviers et du sable dans les infrastructures routières.
- Une faible part est utilisée comme granulats pour le béton et l'asphalte.

### 3.1.3.4. Usages de l'eau souterraine

Bien que la plupart des terrains d'Helsinki soient saturés, les conductivités hydrauliques sont trop faibles pour rendre l'exploitation des eaux souterraines intéressante. L'eau potable d'Helsinki est importée depuis le lac Paijanne par un tunnel de 120 km de long.

### 3.1.3.5. Usages de la géothermie

En Finlande, les principaux usages de la géothermie sont des exploitations locales de petite taille par pompe à chaleur. 70 % des systèmes sont des systèmes horizontaux, 10 % des sondes géothermiques verticales et 20 % des exploitations de la chaleur des lacs. Ces systèmes sont surtout développés pour de petits bâtiments. À Helsinki même, l'exploitation de la géothermie reste donc marginale (Lund et Freeston, 2001).

### 3.1.3.6. Enjeux et défis liés à l'utilisation des ressources du sous-sol

Vu l'importance des infrastructures souterraines pour la ville d'Helsinki, la municipalité s'est dotée d'un service géotechnique qui a coordonné l'acquisition et le maintien de l'information géologique et des constructions souterraines depuis 1955. En 1992, une carte synthétique du potentiel du soubassement rocheux pour la construction souterraine a été dressée sur la base de critères géologiques. Ce travail distingue trois classes dans le sous-sol (Rönkä *et al.*, 1998; Vähäaho *et al.*, 2004) :

- Ia Volume rocheux exploitable pour la construction souterraine
- Ib Volume rocheux exploitable sous réserves
- II Volume rocheux inadapté à la construction souterraine

Anttikoski *et al.* (1994) ont estimé en 1993 que seulement 5 % des ressources exploitables les moins profondes et 1 % des plus profondes étaient utilisées.

Parallèlement à l'acquisition et à la gestion de ces données, la ville d'Helsinki a développé une réflexion sur la planification de son espace souterrain. En 1981, un comité pluridisciplinaire a été formé, pour définir des critères de développement des galeries techniques. Il comportait des urbanistes, des géotechniciens et des spécialistes des transports. Il a permis d'adopter en 1986 un premier plan d'allocation de l'espace souterrain, dont le but était de permettre de réserver des volumes de sous-sol, en particulier pour les ouvrages publics.

Dès 1996, le projet *Rock Engineering 2000* a été lancé pour développer une réflexion à l'échelle nationale. Il a mis en évidence le besoin de continuer à développer des cartes de potentiel du sous-sol, de mettre en œuvre des études d'impact sur l'environnement pour les grands projets souterrains, et d'inclure le développement souterrain à la planification territoriale en précisant les usages actuels et projetés, au niveau de la planification stratégique aussi bien que légale. Il a également fixé deux principes restrictifs à l'usage du sous-sol : limiter les places de travail en sous-sol au minimum et donner la priorité aux usages de surface sur ceux du sous-sol (Hokkanen *et al.*, 1994; ITA Working group 4, 2000; Narvi et Barles, 1995; Narvi *et al.*, 1994; Rönkä *et al.*, 1995; Rönkä *et al.*, 1998).

Vu l'usage presque exclusif de l'espace et des géomatériaux, Helsinki a peu expérimenté de conflits entre les ressources de son sous-sol. Certains projets de métro ont réduit les niveaux phréatiques en surface et fait porter un risque pour les pieux en bois des anciennes constructions. Ce risque a pu être réduit par des mesures techniques (Narvi et Barles, 1995; Vaittinen *et al.*).

## 3.1.4. Tokyo

### 3.1.4.1. Contexte

La plaine du Kanto, où se trouve Tokyo, est un bassin sédimentaire. Les formations quaternaires d'une épaisseur atteignant 3000 m au maximum sont déposées sur des terrains pyroclastiques. Les sédiments quaternaires profonds présentent une alternance de sables, limons et graviers. En superficie se trouvent des sables et graviers déposés en cônes de déjections qui sont aquifères et des horizons argileux d'épaisseur hétérogène (figure 3.4).

Géotechniquement, les terrains sont de mauvaise qualité pour la construction. La situation tectonique du Japon le rend particulièrement vulnérable aux séismes (Endo, 1992; Hosono, 1993; Ishii *et al.*, 1992; Nakayama *et al.*, 2007).

Le tissu urbain de Tokyo s'étend largement au-delà des limites administratives de la ville et forme la conurbation la plus peuplée du monde (plus de 33 millions d'habitants en 2000). C'est également l'une des plus densément peuplées (Barles, 1995; Kondoh et Nishiyama, 2000; Statistics Bureau - Ministry of Internal Affairs and Communications, 2005).

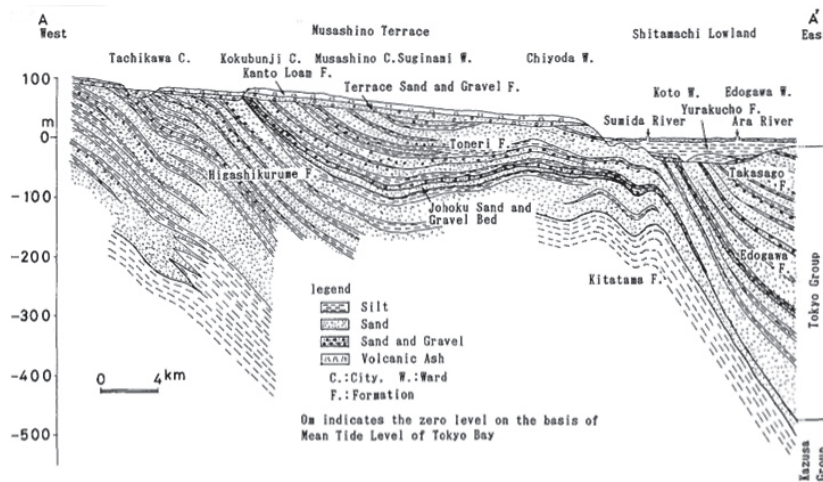


FIGURE 3.4.: Coupe géologique de la région de Tokyo (source: Endo, 1992)

### 3.1.4.2. Usages de l'espace

L'usage de l'espace souterrain de Tokyo s'est intensifié à la suite du tremblement de terre de 1923. La première ligne de métro a été construite en 1927 et le réseau s'est développé pour atteindre 267 km en 2000. De nombreuses galeries commerciales souterraines ont également été créées à partir de 1932. En 2000, on trouvait 78 galeries à Tokyo, pour une surface totale de 900'000 m<sup>2</sup>, 36 de ces galeries ont été construites entre 1965 et 1975. Le transport individuel a également bénéficié du développement d'infrastructures souterraines, ainsi le périphérique express (11 km de voie souterraine à une profondeur de 50 à 60 m), l'autoroute de la baie de Tokyo (15 km de tunnel à une profondeur de 20 à 25 m) ou de nombreux parkings (la moitié des places de la ville se trouvaient en souterrain en 1994). Enfin, plusieurs tunnels de diamètre décamétriques ont été percés pour évacuer les eaux pluviales de la métropole. Dans un contexte géologique défavorable, ces constructions ont largement bénéficié de développements technologiques (par exemple les tunneliers à pression de boues, voir annexe B) (Barles et Jardel, 2005; Guillaume, 1992; Takasaki *et al.*, 2000).

### 3.1.4.3. Usages des géomatériaux

Les conditions géologiques du sous-sol de Tokyo sont telles que l'essentiel des matériaux excavés est de faible qualité technique. La proportion de fines et la teneur en eau sont élevées. Le secteur de la construction à Tokyo, en particulier la construction souterraine, est un producteur important de matériaux d'excavation. En 2000, 208 millions de  $m^3$  de matériaux ont été excavés dans l'ensemble du pays.

Le Japon, et encore plus la métropole de Tokyo, ont été confrontés à deux problèmes importants : la rareté des ressources minérales naturelles pour la construction (graviers et sables qui proviennent essentiellement des zones de montagne pour lesquelles des objectifs de protection environnementale sont élevés) et la rareté de l'espace de stockage pour les matériaux d'excavation. Ces deux contraintes ont conduit le Japon à recycler une fraction toujours plus importante des matériaux d'excavation. En 2000 environ 30 % des matériaux produits ont été réutilisés en construction. Pour augmenter la fraction de recyclage, le Japon a développé de nouvelles technologies de traitement, telles que la stabilisation des sols liquides à la chaux, au liant hydraulique ou à la mousse synthétique (Kamon *et al.*, 2000; Miki *et al.*, 2005).

### 3.1.4.4. Usages de l'eau souterraine

De la fin du 19<sup>e</sup> siècle aux années soixante, les ressources en eau souterraine ont été utilisées pour l'eau de boisson et pour les besoins industriels. À partir des années soixante, il a été observé sous Tokyo une surexploitation des réserves en eau souterraine, les niveaux phréatiques diminuant localement de 3 à 4  $m/an$ . Cette surexploitation a eu pour conséquence la subsidence des terrains. Celle-ci a amené les autorités à prendre des mesures de réduction des prélèvements. Ainsi, en 1965, l'usage de l'eau pour la climatisation des bâtiments a été interdit, et en 1966, celle pour les besoins industriels. À la suite de ces mesures, les niveaux phréatiques sont remontés (localement, un rebond de 30 à 40 m en 20 ans a été observé). Une dégradation de la qualité des eaux souterraines a également eu lieu, en raison de la pollution diffuse liée à l'urbanisation et de pollutions ponctuelles par les industries (on a pu, par exemple, observer la présence d'organochlorés). Les prélèvements d'eau souterraine ont ainsi diminué d'un facteur neuf entre la fin des années soixante et celle des années quatre-vingt, et la plupart des puits privés ont dû être abandonnés (Endo, 1992; Hosono, 1993; Otaki *et al.*, 2007; Yagi, 2004).

### 3.1.4.5. Usages de la géothermie

La région de Tokyo ne présente pas d'anomalie géothermique (contrairement à de nombreuses régions du pays). La seule utilisation notable de l'énergie géothermique est le chauffage de serres avec une puissance installée de 0.25 MWt (270 MWt pour l'ensemble des usages dans le pays). Dans le passé, les nappes ont également été utilisées comme source de froid pour l'air conditionné, mais on a mis fin à cette utilisation à la suite de problèmes de surexploitation. Certains auteurs préconisent d'utiliser la température constante des nappes pour contrer le phénomène d'îlot de chaleur particulièrement important en été dans la métropole (Lund et Freeston, 2001; Nakayama *et al.*, 2007; Sekioka et Yoshii, 1990).

### 3.1.4.6. Enjeux et défis liés à l'utilisation des ressources du sous-sol

L'espace souterrain a été développé de manière intense dans la région de Tokyo et a été sinon un impératif pour un territoire limité, un appui pour la densification. Au Japon, les autorités ont traditionnellement peu influencé le développement urbain et la forme urbaine a été pour l'essentiel façonnée par le secteur privé et la gestion citoyenne locale (Aveline, 2006). Il n'est ainsi pas étonnant que l'espace souterrain ait peu bénéficié d'approches de planification. Toutefois, la question de la sécurité et celle de l'encombrement du sous-sol ont amené les autorités à prendre des mesures tantôt restrictives, tantôt proactives vis-à-vis du sous-sol. On peut ainsi distinguer trois grandes périodes dans l'utilisation et la gestion du sous-sol tokyoïte (Barles, 1995; Guillaume, 1992; Miyake et Denda, 1993; Takasaki *et al.*, 2000; Yasufuku *et al.*, 1995) :

- Jusque dans les années soixante-dix : l'espace n'était pas régulé. Cette période correspond au « boom » des galeries commerciales.
- Des années soixante-dix aux années quatre-vingts, des accidents dans des galeries souterraines et des métros ont conduit les autorités à limiter voire geler les développements d'infrastructures en sous-sol.
- Dès la fin des années quatre-vingt, l'espace souterrain a été reconsidéré comme faisant partie du tissu urbain. Le degré de liberté qu'il offre a été perçu comme une solution face à l'explosion du prix du foncier. Des outils et méthodes de coordination de cet espace ont été développés. En 1995, un comité a été formé pour lever les blocages légaux et administratifs au développement « d'infrastructures sociales » (commerces et loisirs) dans le sous-sol et pour assurer la possibilité des projets d'infrastructure d'utilité publique. Ses réflexions ont conduit en 1998 à l'adoption d'une nouvelle loi sur la propriété foncière. Cette nouvelle loi distingue le sous-sol profond qui doit être dévolu aux usages d'intérêt public. Le sous-sol profond est situé à plus de 40 m de profondeur ou 10 m sous le toit de la couche usuelle de fondation.

Les conflits entre l'usage des eaux souterraines et les infrastructures du sous-sol sont également un défi important pour la ville de Tokyo. Les mesures de restriction des prélèvements des années soixante-dix ont conduit à un rebond de la nappe phréatique. L'augmentation des niveaux phréatiques entraîne des inondations dans les bâtiments qui ne sont pas construits étanches et demande de prendre des mesures particulières de dimensionnement pour les nouveaux bâtiments afin de contrer l'augmentation de la poussée d'Archimède (augmentation du poids propre de l'ouvrage, ancrage, etc.). Par ailleurs, les ouvrages souterrains réduisent les échanges entre les eaux souterraines et la mer par effet de barrage. Aussi, les polluants qui ne sont plus lixiviés vers la mer voient leur concentration augmenter et la baie de Tokyo est sujette à un important problème d'eutrophisation (Endo, 1992; Hosono, 1993; Miyake et Denda, 1993; Nakayama *et al.*, 2007).

### 3.1.5. Montréal

#### 3.1.5.1. Contexte

La ville de Montréal est située sur une île du fleuve Saint-Laurent. Géologiquement, elle se trouve sur un socle de calcaire du crétacé et de roches volcaniques intrusives, formant

par exemple la colline du Mont-Royal. Les formations quaternaires de remplissage sont des moraines issues des glaciations et des sédiments liés au remplissage de la vallée du Saint-Laurent par la mer de Champlain, puis au retrait de cette dernière (dépôts argileux sur lesquels sont superposées des séries de sables et de graviers) (Clark, 1972; Hosseini, 1997; Wise, 2003). Le climat de Montréal est de type continental et est caractérisé par d'importants écarts de température entre l'hiver et l'été.

### 3.1.5.2. Usages de l'espace

Les premiers travaux dans le sous-sol de Montréal étaient destinés à l'arrivée du train transcontinental entre 1912 et 1918. Cette réalisation a eu deux conséquences : l'acquisition des terrains par la compagnie ferroviaire d'État et la présence d'une importante tranchée qui a été laissée béante pendant des décennies. En parallèle, la saturation des rues étroites du Vieux-Montréal a été à l'origine du développement d'un nouveau centre-ville plus au nord à partir de la fin des années vingt. En raison du contexte historique, la construction de ce centre n'a réellement débuté qu'à la fin des années cinquante.

La première intervention majeure dans le sous-sol de Montréal est la construction de la Place Ville-Marie en 1962, au-dessus de la tranchée du transcontinental. La moitié des 285'000  $m^2$  de surface utile de cet édifice se trouve sous le niveau du sol et accueille des activités commerciales et des places de stationnement. Le bâtiment est relié à la gare Centrale par un tunnel piétonnier de 2,8 km de long. En 1966, est construite la première ligne de métro. Les stations sont en liaison directe avec les principaux immeubles de bureaux, équipements publics et centres commerciaux. Les travaux de construction de métros ont été pour l'essentiel réalisés dans le soubassement rocheux par minage, alors que les fondations et étages souterrains des grands bâtiments ont dû être réalisés dans les terrains meubles de couverture, principalement des formations d'argiles et de limons, et ont nécessité de prendre en compte de possibles tassements différentiels.

Les années soixante et soixante-dix ont vu l'extension du réseau. Ces développements ont donné naissance à la *ville intérieure de Montréal*. L'espace souterrain n'est qu'une partie de cette ville intérieure, qui comporte l'ensemble des bâtiments reliés par le réseau piétonnier souterrain. Actuellement, la ville intérieure se développe le long d'un réseau souterrain long de plus de 30 km (figure 3.5), connectant 80 % des bureaux du centre-ville et comptant près de 2'000 commerces (la moitié des commerces de détail du centre-ville). 500'000 visiteurs la fréquentent chaque jour. En 2004, elle était desservie par 28 stations de métro et 76 parcs de stationnement. Le réseau piétonnier souterrain desservait de nombreuses infrastructures et locaux construits entièrement ou partiellement en souterrain (Barles et Jardel, 2005; Besner, 1997; Boisvert, 2004; Hosseini, 1997; Molé, 1997; Sijpkens et Brown, 1997).

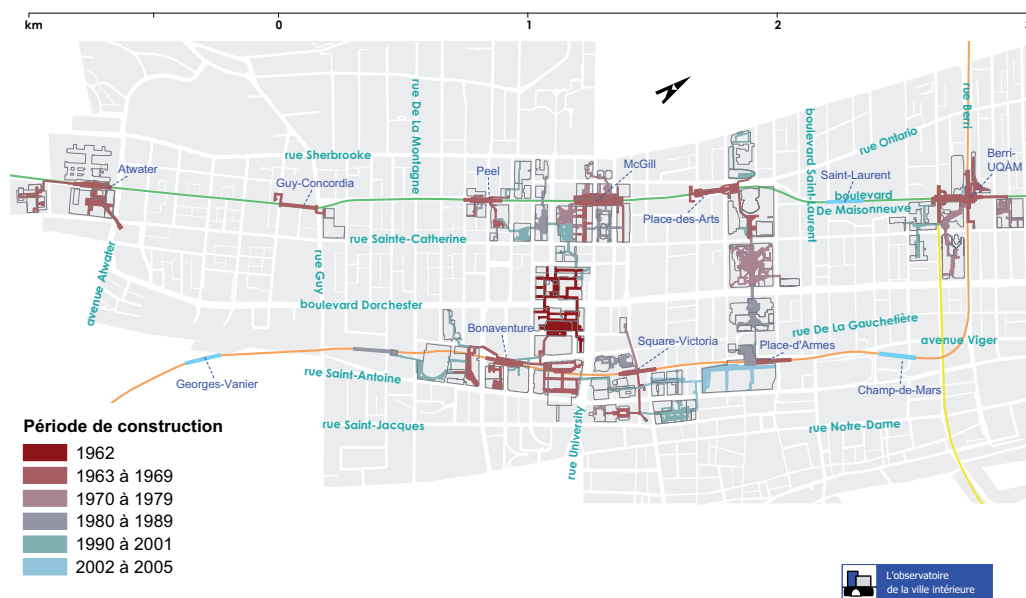


FIGURE 3.5.: Principales phases de développement de la ville intérieure de Montréal (source : Observatoire de la Ville Intérieure de Montréal)

### 3.1.5.3. Usages des géomatériaux

Il existe peu de données et d'études sur le devenir des géomatériaux excavés dans les réseaux souterrains de Montréal. Toutefois, il est possible d'extrapoler certaines informations des études sur les flux de matières en général. Comme d'autres villes d'Amérique du Nord, Montréal a vu sa consommation de matériaux multipliée par cinq au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Sa consommation de matériaux de construction s'est produite de manière essentiellement linéaire, des matériaux nobles étant importés vers la ville et les matériaux de mauvaise qualité mis en décharge ou éventuellement utilisés comme remblais (Olson, 2007).

### 3.1.5.4. Usages de l'eau souterraine

Malgré la présence de ressources en eau relativement importante dans les fractures du socle calcaire, l'eau souterraine est utilisée de manière négligeable à Montréal. Seuls quelques foyers sont reliés à un petit réseau d'aqueduc privé, et environ 600 résidences disposent de puits individuels. L'alimentation en eau potable de la ville est réalisée à 99 % par des eaux de surface (Ministère de l'Environnement, 1984, 2000).

### 3.1.5.5. Usages de la géothermie

En comparaison internationale, les coûts des énergies fossiles et de l'énergie hydroélectrique sont faibles au Canada, si bien qu'on a porté un faible intérêt aux ressources

géothermiques. De manière générale au Canada, des systèmes de sondes géothermiques ont été installés à petite échelle pour des maisons individuelles ou de petits bâtiments commerciaux. Le stockage géothermique en aquifère a gagné en intérêt depuis la fin des années quatre-vingt. Des projets ont été développés à Toronto et en Ottawa. Montréal n'a pour le moment pas fait l'objet de tels développements (Allen *et al.*, 2000; Lund et Freeston, 2001).

### 3.1.5.6. Enjeux et défis liés à l'utilisation des ressources du sous-sol

Le développement de l'espace souterrain de Montréal a abouti à la formation d'un réseau bien structuré. Les premiers développements ont bénéficié d'une vision cohérente de la part de leurs initiateurs : les architectes Ming Pei et Henr Cobb et l'urbaniste Vincent Ponte. Le développement du nouveau centre-ville, compact et étiré en hauteur est le résultat d'une vision tridimensionnelle de la ville :

« Planners are beginning to go beyond the 2D of papers and plans (...) In (Montréal) we are concentrating the core functions into a tight, totally interrelated unit, doubling and tripling the use of the same parcels of precious downtown land by inserting several levels above and below ground » (Vincent Ponte cité dans Besner, 1997).

Paradoxalement, le développement de la ville intérieure n'a pas fait l'objet de planification d'ensemble officielle. Plusieurs tentatives ont été menées : en 1960, Vincent Ponte avait déjà dressé un premier masterplan, la ville en a dressé un second en 1984, mais ils n'ont jamais été adoptés. C'est seulement à partir de 1992 (masterplan de la ville de Montréal), puis 2002 (nouveau masterplan), qu'ont été formulées des recommandations pour le développement et la gestion des galeries souterraines, d'un réseau déjà largement existant.

En fait, les moteurs du développement de la ville de Montréal doivent être cherchés dans le partenariat entre propriétaires fonciers, promoteurs privés et autorités. Le succès des premières opérations de Ville-Marie et l'attractivité commerciale du réseau ont encouragé de nombreux acteurs privés à se connecter. Ainsi sur 41 corridors pédestres, seuls 4 ont été financés par les autorités publiques. Ces partenariats ont été facilités par plusieurs outils : l'adoption de baux emphytéotiques<sup>5</sup> pour les terrains publics, des dérogations au zonage pour les corridors souterrains et jusqu'en 1992, un « bonus de densité » : les étages en sous-sol n'étant pas inclus dans le calcul des indices d'usage du sol. Enfin, il est important de relever l'intégration entre le souterrain et la surface dans la ville intérieure. Les portails d'accès et les réseaux de transport se trouvent tantôt d'un côté tantôt de l'autre du sol, ce qui a favorisé une forte interconnexion entre les espaces et les fonctions auxquelles ils sont dévolus (Besner, 1997; Boisvert, 2001, 2004; Christozov, 1997).

Sur le plan des ressources du sous-sol urbain, Montréal a eu un développement centré uniquement sur l'espace. Les eaux souterraines sont perçues uniquement comme une contrainte technique, les autres ressources ne sont pas considérées (Hosseini, 1997).

5. En Suisse : droit de superficie. Ce sont des loyers à long terme pour l'usage du foncier.



## 3.2. Analyse comparée des expériences

### 3.2.1. Contextes

Les cinq villes étudiées sont des villes de grande importance. La plus petite, Helsinki est 1,5 fois plus peuplée que Zürich. Ce choix s'est imposé, car seules ces villes permettent de mener une analyse des développements des ressources du sous-sol à l'échelle urbaine et non à l'échelle d'un projet de construction. Toutefois, cette différence d'échelle engendre un biais pour établir des comparaisons avec des villes plus petites, en particulier les villes suisses. Économiquement, Paris, Helsinki, Tokyo et Montréal sont dans des contextes similaires et comparables à la Suisse, alors que les revenus par habitant sont sensiblement plus faibles à Mexico (figure 3.6).

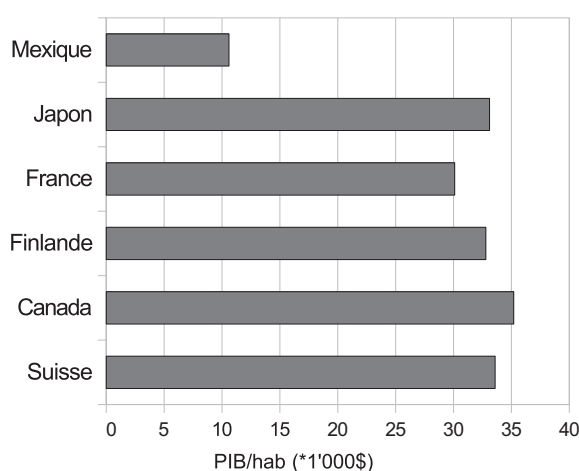


FIGURE 3.6.: PIB par habitant de la Suisse et des pays dans lesquels se trouvent les 5 villes étudiées, exprimé à parité de pouvoir d'achat (source: Central Intelligence Agency, 2005)

Sur le plan géologique, trois des villes : Paris, Tokyo et Mexico sont dans des contextes de grand bassin sédimentaire. À Helsinki, les terrains quaternaires sont de faible épaisseur et le soubassement rocheux cristallin est proche de la surface. À Montréal, le socle calcaire est atteint par certains projets, d'autres étant conçus dans les terrains quaternaires d'épaisseur moyenne.

### 3.2.2. Usages des ressources du sous-sol

Actuellement, l'espace est la ressource majoritairement utilisée dans toutes les villes sauf Mexico. Les développements des espaces souterrains à Paris, Tokyo, Helsinki et Montréal présentent un certain nombre de similitudes. Mis à part les fonctions d'évacuation des eaux, pour les quatre villes, ce sont les lignes de transports métropolitains qui marquent les premiers développements importants en sous-sol. Ces lignes de transport sont des

éléments structurants de l'espace souterrain. L'urbanisme de la ville souterraine est ainsi un urbanisme de réseau. L'organisation des espaces souterrains varie fortement d'une ville à l'autre. Montréal présente les développements les plus organisés. La fonction commerciale et son lien avec le réseau piétonnier jouent un rôle prépondérant dans la structuration de l'espace, de même que l'interconnexion entre surface et souterrain. La notion de ville intérieure permet en quelque sorte de gommer les différences entre les étages en sous-sol et ceux hors-sol. Les autres villes bénéficient de réseaux moins interconnectés et composés essentiellement de transports publics. Elles ont aussi vécu des développements de la fonction commerciale, mais celle-ci reste localisée dans des galeries connectées aux stations de métro, sans le maillage que forme le réseau piétonnier de Montréal.

Il est également intéressant de noter que pour la plupart des pays, les principaux développements de l'espace souterrain ont eu lieu sur des périodes temporelles restreintes. Le réseau de métros de Paris a été presque totalement construit entre 1898 et 1938, la moitié des galeries commerciales souterraines de Tokyo construites entre 1965 et 1975, et les années 1956 à 1966 sont appelés les « ten golden years of Montreal's downtown » par Vincent Ponte (Besner, 1997).

Toutes les villes étudiées ont utilisé la ressource espace pour leur développement. En corollaire, elles ont produit des quantités importantes de matériaux d'excavation. Toutefois, seules Tokyo et dans une moindre mesure Helsinki ont adopté une gestion de ces matériaux comme une ressource à valoriser, les autres villes les ayant plutôt traité comme des déchets. À Paris, les géomatériaux ont été utilisés en tant que tels (par des carrières) de manière antérieure à l'utilisation de l'espace.

L'eau souterraine a été utilisée de manière intensive à Paris, Tokyo et surtout Mexico. Les trois villes sont géologiquement dans des contextes de grands bassins sédimentaires. Dans chaque cas, on a observé une surexploitation des aquifères, qui a abouti (en association à la désindustrialisation) à une importante réduction des prélèvements à Paris et Tokyo et à d'importants problèmes de subsidence à Mexico. Des problèmes de pollution des nappes sont également observés dans les trois cas.

Les développements de l'énergie géothermique sont anecdotiques pour toutes les villes.

D'une manière plus générale, les villes observées ont un métabolisme essentiellement linéaire (chapitre 1.1) : les ressources sont importées pour être utilisées pour un seul usage dans la ville et sont rejetées vers l'environnement sous forme de déchets. Le paradigme des ressources illimitées semble avoir prévalu dans l'ensemble des développements, et les villes ont un impact sur leur environnement proche, mais aussi lointain. Les projets avortés d'adduction d'eau à Paris depuis la vallée de la Loire ou le Léman dans les années vingt et trente en sont une illustration évidente (Diffre et Pomerol, 1979).

### 3.2.3. Moteurs du développement et planification

La nécessité de densifier les aires urbaines apparaît comme un moteur fort du développement de l'espace souterrain de Paris, Helsinki, Tokyo et Montréal. Les trois dernières ont un territoire fortement contraint en surface. Helsinki se trouve sur une presqu'île, Montréal et Tokyo (en tenant compte de l'ensemble de la conurbation pour cette dernière) sur des îles. Contrairement aux trois autres ressources, l'espace ne peut pas être

importé vers la ville et l'utilisation de la dimension verticale a appuyé la densification.

Les conditions géologiques peuvent aussi être un facteur favorisant le développement de l'espace. À Helsinki, la présence du soubassement rocheux à faible profondeur a permis de construire de nombreux ouvrages avec des coûts compétitifs avec ceux des ouvrages construits en surface. Toutefois, ces conditions ne constituent pas seules un moteur au développement de l'espace, et des villes comme Tokyo ou Paris, où les conditions géologiques sont moins favorables à la construction d'ouvrages souterrains, ont vécu des développements importants. Pour la ressource en eau, c'est toutefois le contexte géologique qui définit la disponibilité, et les villes en milieu sédimentaire ont eu un développement beaucoup plus fort de l'exploitation des eaux du sous-sol.

Pour plusieurs villes, il est possible de lier le développement du sous-sol à un projet urbain spécifique : Paris a développé son réseau d'égouts puis de métro dans le cadre des « transformations » initiées par le baron Haussmann, à Tokyo les réalisations des premières lignes de métro se sont inscrites dans le processus de reconstruction consécutif au tremblement de terre de 1923 et à Montréal, le projet de Ville-Marie et les développements qui suivent ont fait partie de la création du nouveau centre-ville. Le développement de l'espace souterrain semble ainsi coïncider avec la modernisation des villes.

Toutefois, aucune des villes n'a bénéficié d'approche coordonnée de planification de ses espaces souterrains. La relation au sous-sol des gestionnaires et planificateurs semble pour le moins ambiguë. Elle se traduit par des périodes de laisser faire et de développement, des périodes d'interdiction, et des périodes de réflexion sur la désorganisation engendrée. Si la ville souterraine est contemporaine de la ville moderne, elle n'est pas assumée comme un de ses organes. Une réflexion théorique est née dès le début du 20<sup>e</sup> siècle, mais elle n'a été qu'en partie transposée dans des outils opérationnels à partir des années quatre-vingt, pour gérer des espaces déjà fortement construits. Les développements du sous-sol urbain sont ainsi plus liés à des initiatives localisées et individuelles, qu'à une volonté manifestée à l'échelle de la ville. Une conséquence en est la désorganisation et la congestion de l'espace souterrain (surtout à Paris et à Tokyo). Une autre est sa méconnaissance par les planificateurs et gestionnaires de la ville ; ceci même si dans plusieurs villes, des efforts ont été menés pour collecter l'information géologique et les données de l'usage du sous-sol.

Les approches de planification développées à partir des années quatre-vingt sont relativement différentes :

- Paris, bien qu'elle soit le berceau de l'urbanisme souterrain, n'a pris aucune mesure légale favorisant la planification ou la gestion de ces ressources du sous-sol. La proposition de texte de loi de l'AFTES en 2000 a avorté.
- Helsinki a développé une approche proactive d'évaluation du potentiel du sous-sol pour implanter des infrastructures, et a entrepris de communiquer sur les avantages et inconvénients de l'espace souterrain. Les solutions souterraines sont toutefois considérées comme secondaires par rapport aux usages de surface.
- La démarche tokyoïte est au contraire plutôt réactive, elle vise essentiellement à assurer certains usages d'intérêt public face à la congestion de l'espace souterrain, en séparant le sous-sol peu profond (intérêt privé) du sous-sol profond (intérêt public).

- À Montréal, le développement du sous-sol bénéficie plutôt de mesures d'encouragement, mais n'est pas porté directement par le secteur public, qui s'appuie sur le secteur privé par la pratique du partenariat.

Enfin, le développement de l'usage des eaux souterraines n'a bénéficié d'approche de planification dans aucune des villes étudiées. Paris et Tokyo ont peu à peu abandonné leurs ressources, pour des eaux de surface ou des eaux souterraines provenant de l'extérieur de la ville. À Tokyo, cela a été renforcé par des mesures d'interdiction. Dans les deux villes, le changement a été facilité par la baisse de la demande suite à la désindustrialisation. À Mexico, le contrôle de la ressource a toujours été très faible. De nombreux prélèvements sont illicites et la métropole est confrontée à l'absence de ressource alternative à l'aquifère.

### 3.2.4. L'approche sectorielle et ses conséquences

Les usages des ressources du sous-sol dans les différentes villes suivent tous une approche que l'on peut qualifier de sectorielle : les projets de mise en œuvre sont développés quand un besoin est ressenti, sans tenir compte ni des usages ni du potentiel des autres ressources (figure 3.7). Cette situation résulte en des conflits d'usage et en l'abandon de certaines ressources sur le long terme.

L'exemple de Paris est une illustration évidente de cette approche. La chronologie des utilisations montre que les priorités accordées au développement d'un usage se font en conflit avec les usages précédents :

- Jusqu'au début du 19<sup>e</sup> siècle, les géomatériaux sont exploités. Cette exploitation est interdite en 1813, car elle entre en conflit avec les développements d'infrastructures en surface (problèmes d'effondrement).
- Du milieu du 19<sup>e</sup> siècle au milieu du 20<sup>e</sup>, les eaux souterraines sont exploitées abondamment pour l'alimentation en eau potable.
- À partir du début du 20<sup>e</sup> siècle, les réseaux et ouvrages souterrains sont construits.
- Les usages de l'espace souterrain et l'urbanisation entraînent la pollution des eaux souterraines dans la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle et les utilisations de l'eau sont peu à peu réduites.
- La réduction des prélèvements dans les aquifères entraîne la remontée des nappes et entre en conflit avec les usages de l'espace souterrain (augmentation des sous-pressions hydrostatiques et nécessité de pomper l'eau dans les ouvrages non étanches).
- A la fin du 20<sup>e</sup> siècle, seul l'espace est utilisé de manière importante à Paris.

Tokyo et Mexico ont vécu des développements similaires : à Tokyo, les usages de l'eau souterraine ont dû être graduellement réduits. À Mexico, eau et espace souterrain sont encore utilisés conjointement, mais entrent en conflit de manière importante : les réseaux sont endommagés par le phénomène de subsidence et les eaux souterraines sont de plus en plus polluées.

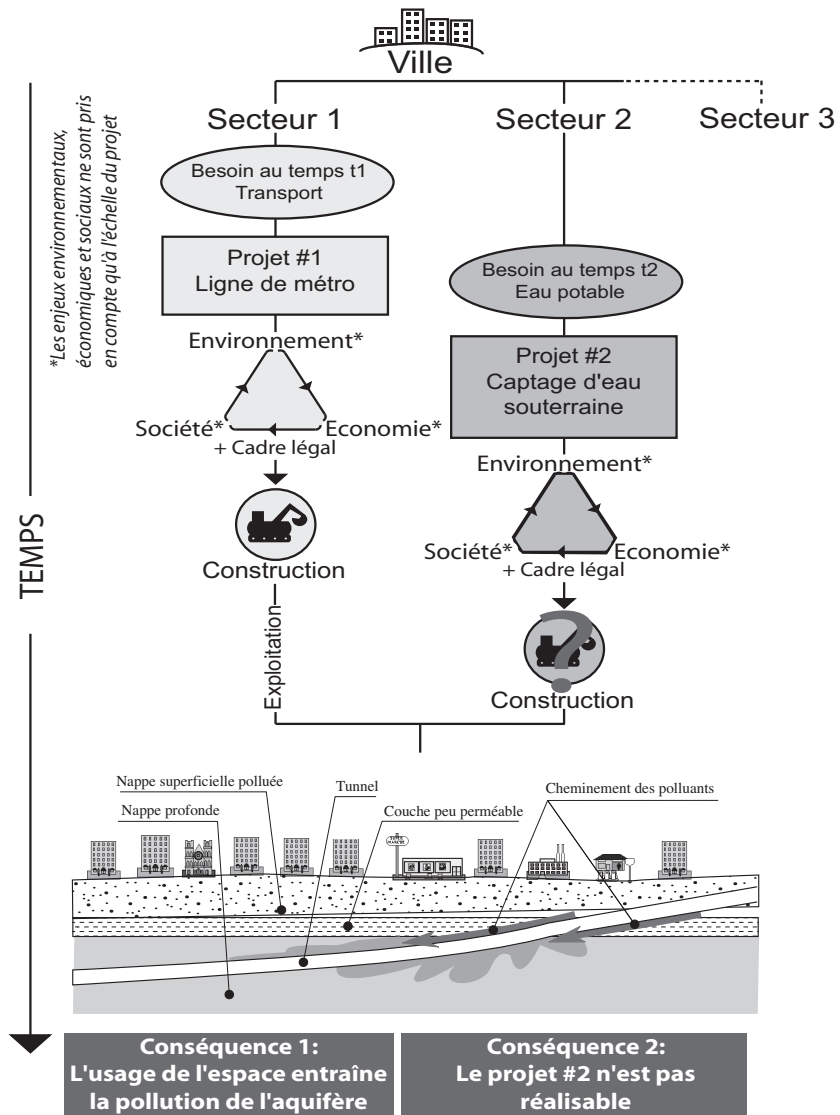


FIGURE 3.7.: Approche sectorielle des usages des ressources du sous-sol

Sans tenir compte de l'ensemble des ressources et de leurs interactions, les objectifs du développement durable ne sont pas réalisés

### 3.3. Synthèse

L'étude comparative des expériences de Mexico, Paris, Helsinki, Tokyo et Montréal montre l'importance qu'ont tenue les ressources du sous-sol pour le développement urbain. L'espace et l'eau souterraine sont les ressources les plus exploitées. L'usage de l'espace souterrain a permis de réaliser la densification des métropoles étudiées et la construction de la « ville souterraine » a souvent été réalisée dans des périodes de développement courtes, en parallèle à des processus de renouvellement du tissu urbain. Paradoxalement, ces développements ont peu bénéficié d'approches coordonnées de planification. Les acteurs de la gestion urbaine ont développé une attitude ambiguë vis-à-vis du sous-sol urbain : il paraît utile pour réaliser des projets devenus impossibles dans l'encombrement de l'espace de surface, mais n'est pas considéré comme une composante à part entière de la ville.

Finalement, l'ensemble des développements a été réalisé selon une approche sectorielle : ressource par ressource, sans tenir compte des interactions entre les usages. Ces développements ont pour conséquence des conflits entre les usages et l'abandon sur le long terme d'une partie du potentiel du sous-sol.

La vision qui a prédominé jusqu'à aujourd'hui dans la mise en valeur des ressources du sous-sol urbain est une vision qui procède *des besoins aux ressources*. Dans cette vision, la ville n'est pas perçue comme faisant partie d'un environnement dont les ressources sont limitées. Ceci se traduit par des processus de métabolisme essentiellement linéaires qui ne sont pas durables. En pratique, la ville se trouve confrontée aux limites de son environnement (conflits, abandon de ressources), mais elle manque également les possibilités que lui offre le sous-sol, en ne réalisant pas les synergies possibles entre ses usages, et en réduisant la capacité de renouvellement de ses ressources.

## *Usages multiples des ressources du sous-sol urbain*

### **4.1. Appréhension systémique du sous-sol urbain**

#### **4.1.1. Concept Deep City de gestion des ressources du sous-sol**

L'analyse d'expériences passées et actuelles (chapitre 3) a montré que l'exploitation des ressources du sous-sol a été, jusqu'à aujourd'hui, gouverné par une approche qui procède des besoins de la ville aux usages des ressources et par une mise en œuvre sectorielle. Ce mode de développement a abouti à des conflits d'usage et à un gaspillage de ressources non compatibles avec le développement durable.

La ville durable doit être réalisée en tenant compte des capacités limites et de la richesse de son environnement. Pour le sous-sol, il s'agit en particulier de considérer l'ensemble des contraintes et des potentialités qu'offrent ses ressources. La thèse des *usages multiples* développée dans le cadre du projet Deep City offre un changement de paradigme qui permettra d'assurer un développement qui procède *des ressources aux besoins*. Les principales différences avec l'approche sectorielle sont présentées à la table 4.1. Cette nouvelle approche tient compte de l'ensemble du potentiel du sous-sol, c'est à dire celui des quatre familles de ressources et des limites ou des possibilités nouvelles offertes par les interactions. Elle propose de compléter les développements locaux pensés à l'échelle du projet par une réflexion de planification plus générale du système sous-sol à l'échelle urbaine.

TABLE 4.1.: Comparaison entre l'approche sectorielle et l'approche des usages multiples

Approche sectorielle	Approche des usages multiples
Les ressources sont considérées indépendamment	Les ressources sont considérées de manière holistique
Fondée sur des contraintes	Fondée sur des interactions
Développement selon opportunité	Développement planifié
Échelle du projet	Échelle fonctionnelle urbaine
Compétences disciplinaires	Compétences transdisciplinaires
Pensée analytique	Pensée systémique

#### 4.1.2. Approche systémique et sous-sol urbain

La perception du sous-sol comme un système est essentielle au concept d'*usages multiples*. Elle permet de penser le sous-sol et ses ressources comme un tout cohérent, dans lequel interagissent les ressources et les usages qui en sont faits.

##### 4.1.2.1. Pensée systémique

La pensée systémique (ou approche systémique) est une démarche scientifique relativement récente, ses principaux fondements théoriques et pratiques ayant été développés dans la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle, en particulier par les travaux de Von Bertalanffy (1974) et de Le Moigne (1977). Elle a trouvé ses applications dans des champs disciplinaires aussi variés que l'informatique, la psychologie, la science de la communication, l'écologie, l'économie ou l'aménagement du territoire. La pensée systémique s'est développée sur les avancées réalisées par la cybernétique<sup>1</sup>, le holisme<sup>2</sup> et le structuralisme<sup>3</sup> du début du 20<sup>e</sup> siècle.

La pensée systémique tend à s'opposer à la pensée analytique dans la formalisation de ses préceptes (voir table 4.2). En pratique, les deux modes de pensée sont complémentaires et

1. La cybernétique est la science des systèmes autorégulés. On lui doit le concept de rétroaction, central dans l'analyse systémique. Ce concept est décrit plus loin dans le texte

2. Le holisme est défini par son précurseur Smuts (1926) comme *la tendance dans la nature à constituer des ensembles qui sont supérieurs à la somme de leurs parties*.

3. Le structuralisme est à l'origine un modèle linguistique qui propose d'appréhender ses éléments par leurs relations d'équivalence ou d'opposition.



leur articulation permet l'analyse des problèmes complexes à plusieurs échelles. Alors que la pensée analytique tend à promouvoir une décomposition des problèmes en éléments aussi simplifiés que possible pour en comprendre le fonctionnement, la pensée systémique propose de focaliser l'attention sur l'entier du problème : le système. Ce dernier peut être défini comme :

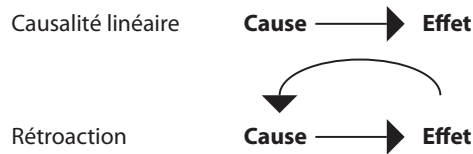
« (...) un ensemble d'éléments identifiables (disposant d'attributs) et de leurs interrelations, ensemble borné dont on définit par un choix discrétionnaire, politique, les frontières » (Le Moigne, 1977)

TABLE 4.2.: Comparaison entre les axiomes analystes et systémistes (adapté de Munari et Beetschen, 2002)

Approche analytique (Descartes, 1637)	Approche systémique (Le Moigne, 1977)
<p><b>Précepte de l'évidence</b> Seules les choses certaines sont reconnues comme vraies.</p>	<p><b>Précepte de la pertinence</b> Les objets que nous considérons sont définis par rapport aux intentions implicites et explicites du modélisateur.</p>
<p><b>Précepte réductionniste</b> Les difficultés sont divisées pour mieux comprendre le mécanisme.</p>	<p><b>Précepte du globalisme</b> L'objet d'étude est considéré comme immergé et actif dans un tout plus grand. L'attention doit être portée sur l'ensemble des éléments avec lesquels l'objet a des relations pour qu'on puisse en comprendre mieux le mécanisme général.</p>
<p><b>Précepte causaliste</b> La connaissance est reconstruite par ordre en analysant les choses les plus simples pour monter peu à peu jusqu'aux plus composées.</p>	<p><b>Précepte téléologique</b> L'objet est interprété par son comportement dans le système en fonction de la finalité de ce dernier</p>
<p><b>Précepte d'exhaustivité</b> Des dénombrements complets sont réalisés pour que le chercheur soit assuré de ne rien omettre.</p>	<p><b>Précepte de l'agrégativité</b> Il est impossible d'énumérer tous les facteurs à considérer dans la résolution de problèmes complexes, aussi toute représentation est acceptée comme simplificatrice. Il convient de trouver les méthodes pour guider le choix pertinent des agrégats.</p>

Les interrelations entre les éléments du système sont essentielles à sa compréhension.

Par la suite, nous appelons ces interrelations les *interactions*. Il convient de distinguer deux principaux types d'interactions :



La complexité est fondamentale dans la compréhension du système. Aussi, l'approche systémique a-t-elle été qualifiée de *macroscopie*<sup>4</sup>, soit d'outil pour observer l'infiniment complexe (De Rosnay, 1975). La complexité d'un système est définie par le type d'interactions entre ses éléments :

- Un système qui possède de nombreux éléments reliés par des relations de causalités linéaires est un système compliqué.
- Un système qui possède des éléments reliés par des relations de rétroaction est un système complexe.

En fonction des échanges qu'entretient le système avec son environnement, on distingue les systèmes fermés des systèmes ouverts. Ces définitions sont issues de la thermodynamique : les systèmes fermés n'échangent que de l'énergie avec leur environnement, alors que les systèmes ouverts échangent également de la matière et de l'information. Alors que la cybernétique s'est essentiellement intéressée aux systèmes fermés, la systémique se concentre sur l'étude des systèmes ouverts. Selon Yatchinovsky (2000), l'ouverture est un critère pour définir les systèmes complexes. Elle en distingue trois autres qu'elle présente par analogie avec le corps humain :

- Les systèmes complexes sont relationnels : les divers organes ont des relations, ils interagissent, sont liés et ont une influence les uns sur les autres.
- Les systèmes complexes sont englobants : chaque organe est un sous-système d'un système qui l'englobe. (...) Aussi, il est impossible d'énumérer de façon exhaustive tous les éléments constitutifs d'un système.
- Les systèmes sont finalisés. L'ensemble des organes contribue à la vie, chacun des organes gardant ses propres spécificités et ses propres objectifs.

Les systèmes sont caractérisés par leur structure, mais également par leur dynamique, la façon dont ils changent. Bateson (1981) a ainsi formulé deux caractéristiques fondamentales des systèmes complexes :

- L'homéostasie
- L'évolution

Alors que l'homéostasie traduit l'aptitude qu'ont les systèmes à se maintenir stables face aux variations de leur environnement (par exemple le corps humain qui maintient sa température à 37°C), l'évolution est liée à leur capacité à opérer des changements structuraux dans le système, lorsque les pressions environnementales ne peuvent

4. Par comparaison avec le microscope qui permet d'analyser l'infiniment petit et le télescope l'infiniment grand.

plus être soutenues. Une dernière caractéristique importante des systèmes complexes est leur irréversibilité. N'obéissant pas à des logiques mécanistes (action-réaction linéaire), les systèmes évoluent de manière dynamique en fonction de leurs états précédents.

#### 4.1.2.2. Les outils de l'analyse systémique

En tant qu'approche récente et fortement transdisciplinaire, la systémique s'est vue doter de nombreux outils pour sa mise en œuvre. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous en présentons trois, utiles pour la suite de l'analyse : la matrice structurale, les modèles causaux et les modèles de stocks et de flux. Les deux derniers sont issus de la dynamique des systèmes initiée par Forrester (1961) et qui a trouvé de nombreuses applications dans les domaines de modélisation qualitative et quantitative des systèmes naturels et environnementaux (voir par exemple: Ford, 1999).

##### Matrice structurale

La matrice structurale (Le Moigne, 1977) propose un cadre pour analyser les interactions entre les éléments du système, mais aussi entre les sous-systèmes. Les relations entre les éléments ou entre les sous-systèmes (ce que Le Moigne appelle les processeurs, les éléments les plus simples étant les processeurs élémentaires) sont représentées dans un cadre matriciel (figure 4.1). Le chiffre 1 indique l'existence d'une incidence d'un processeur sur un autre, alors que le chiffre 0 indique l'absence de relation. Si les éléments de la matrice ne sont pas des processeurs élémentaires, chaque case peut être décomposée en une sous-matrice structurale. Cette représentation matricielle permet ainsi de représenter les dimensions relationnelles et agrégatives du système. C'est également un bon indicateur de la complexité d'un système. Un système complexe sera représenté par des chiffres 1 de part et d'autre de la diagonale de la matrice (ils définissent les relations rétroactives) alors qu'un système compliqué n'en aura qu'au-dessus.

influence sur de	X	Y	Z
X		1	0
Y	1		1
Z	1	0	

FIGURE 4.1.: Matrice structurale (adapté de Le Moigne, 1977)

### Modèle causal

Le modèle causal est une représentation de la structure du système qui met en évidence les relations entre ses éléments (appelés ici variables). En cela, il est proche de la matrice structurale de Le Moigne. C'est l'outil conceptuel de la modélisation en dynamique des systèmes.

Le modèle causal est formé de flèches et de mots. Les mots représentent les variables du système, les flèches les relations causales entre les variables. Les flèches sont positives si la variation d'une variable induit une variation dans la même direction de la variable à laquelle elle est reliée. Elles sont négatives, si la variation est inversée.

Dans un système complexe, le modèle causal fait apparaître des boucles. Ces boucles sont les rétroactions du système. On distingue deux types de rétroactions :

- Les rétroactions négatives ont lieu lorsque l'effet diminue la cause ; la rétroaction négative stabilise le système (Ford, 1999). Elle est particulièrement importante pour le phénomène d'homéostasie. Elle contribue à amortir l'effet des variations environnementales. Dans le diagramme causal, une rétroaction négative est une boucle qui comporte un nombre impair de signes moins.
- Les rétroactions positives ont lieu lorsque l'effet renforce la cause ; la rétroaction positive réinvestit dans le système (Ford, 1999). La rétroaction positive est particulièrement importante dans le phénomène d'évolution. En amplifiant l'effet des modifications de l'environnement du système, elle induit des changements d'état qui font évoluer le système hors de son état d'équilibre et impose des modifications structurales pour en établir un nouveau. Dans le diagramme causal, une rétroaction positive est une boucle qui comporte un nombre pair de signes moins. Dans le langage courant, les rétroactions positives peuvent être associées aux *cercles vicieux* et *cercles vertueux*.

La figure 4.2 présente un exemple de modèle causal.

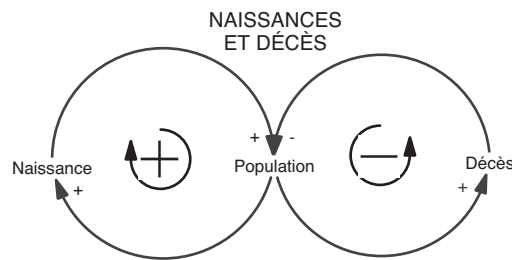


FIGURE 4.2.: Exemple de modèle causal

Le modèle représente l'évolution d'une population dont les taux de natalité et de mortalité sont constants. La boucle « naissance-population » est une rétroaction positive : plus la population est importante, plus le nombre de naissances est grand et plus la population augmente. Au contraire, la boucle « population-décès » est une rétroaction négative : plus la population est importante, plus le nombre de décès est grand, plus la population diminue.

### Modèle de stocks et de flux

Les modèles de stocks et de flux sont les modèles quantitatifs de la dynamique des systèmes<sup>5</sup>. Ils permettent de simuler le comportement d'un système complexe. Le système est décrit par des stocks, dont le niveau varie en fonction de flux (de matière, d'énergie, d'information) entrant ou sortant. Stocks et flux sont reliés entre eux par des convertisseurs. Ce sont ces relations (rapport entre l'état du stock et les intrants/extrants) qui représentent les notions de rétroaction (voir figure 4.3).

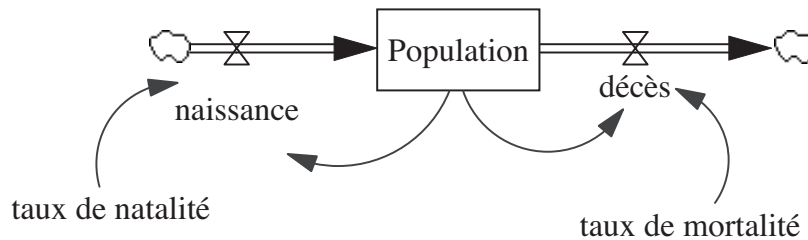


FIGURE 4.3.: Exemple de modèles de stocks et de flux

Le modèle est une représentation quantitative du modèle causal de la figure 4.2. La population est un stock, les naissances et les décès sont des flux qui proviennent ou vont vers les limites du système (représentées par les « nuages »). Les taux de natalité et de mortalité sont des convertisseurs. Il est possible de lier stocks, flux et convertisseurs par des équations mathématiques et de réaliser des simulations d'évolution temporelle du système.

#### 4.1.2.3. Le sous-sol urbain comme système

L'importance des interactions entre les usages du sous-sol urbain a déjà été largement discutée. Elle montre bien que le sous-sol peut être vu comme un ensemble d'éléments et de leurs interrelations, à savoir un système selon la définition proposée par Le Moigne (page 47).

**Le sous-sol urbain système ouvert.** Les limites du système sous-sol urbain sont définies par un choix discrétionnaire de l'observateur ou du modélisateur. Ces limites peuvent correspondre à un critère administratif (les limites de la ville), une entité géologique (une formation aquifère), utilitariste (la profondeur maximale à laquelle le sous-sol est exploité), etc. Suivant les critères choisis, elles ne sont pas concomitantes. Par ailleurs, le système est en interaction avec son environnement ; il échange de l'énergie, mais aussi de la matière : par exemple de l'eau (infiltration d'eau depuis la surface, écoulements souterrains aux épontes des aquifères, eaux usées, etc.) et des géomatériaux (matériaux d'excavation exportés hors de la ville, matériaux de construction importés, etc.). Le sous-sol ne peut donc se définir que comme un système ouvert.

5. C'est notamment sur la base d'un modèle de stocks et de flux qu'ont été fondées les réflexions du club de Rome sur les limites de la croissance (Meadows *et al.*, 1972)

**Le sous-sol urbain système dynamique.** Le sous-sol est sujet à des flux d'eau et d'énergie qui ont été décrits au chapitre 2. Ces flux sont gouvernés par des caractéristiques du milieu et des conditions aux limites du système. En milieu urbain, il est également sujet à des flux de géomatériaux et l'utilisation de son espace évolue.

**Le sous-sol système complexe.** Il existe des boucles de rétroactions dans le fonctionnement du système sous-sol. On peut l'exprimer par exemple pour l'eau souterraine. Si la quantité d'eau dans un aquifère est un stock, les flux entrants et sortants sont gouvernés par les potentiels hydrauliques selon l'équation de Darcy ; or ces flux entrants et sortants modifient l'état du stock, donc les potentiels hydrauliques, cette relation est une rétroaction. Par ailleurs, le système sous-sol urbain est caractérisé par les quatre critères identifiés par Yatchinovsky (page 48) : il est ouvert, il est relationnel, il est englobant et il est finalisé (par exemple, par son rôle dans le cycle de l'eau).

En raison de l'ensemble de ces caractéristiques, il est important d'appréhender le sous-sol comme un système. Cela permet de mieux comprendre les phénomènes d'homéostasie et d'évolution qui le gouvernent, mais surtout d'anticiper des changements irréversibles qui pourraient résulter de son exploitation. Par la suite, une telle approche est promue par l'analyse des interactions entre les ressources du sous-sol. Puis, d'une manière plus formelle, du point de vue de la systémique, par un exemple d'utilisation des outils de modélisation causal et de modélisation stocks et flux.

## 4.2. Interactions entre les usages du sous-sol urbain

Ce chapitre présente une synthèse de l'ensemble des interactions entre les usages du sous-sol urbain. Elles sont analysées selon une systématique dérivée de la matrice structurale (voir page 49) et représentée sur la table 4.3. Les familles de ressources pouvant regrouper plusieurs usages (autrement dit, plusieurs processeurs dans la terminologie de Le Moigne), les interactions sont également analysées sur la diagonale de la matrice.

TABLE 4.3.: Systématique pour l'évaluation des interactions entre les ressources

Impact de sur	Espace	Eau souterraine	Énergie géothermique	Géomatériaux
Espace				
Eau souterraine				
Énergie géothermique				
Géomatériaux				

On distingue deux types d'interactions :

- Les conflits, lorsque l'usage d'une ressource porte préjudice à l'usage (actuel ou futur) d'une autre.
- Les synergies, lorsque l'usage d'une ressource génère des opportunités pour en exploiter une autre de manière plus efficiente que si elle était exploitée seule.

#### 4.2.1. Interactions espace-eau souterraine

Avant d'évaluer spécifiquement les interactions entre les deux usages, il semble important de décrire certaines spécificités du cycle de l'eau souterraine en milieu urbain. La figure 4.4 présente les principaux facteurs liés à l'urbanisation. L'ensemble de ces facteurs joue un rôle sur la qualité et la quantité des eaux souterraines des villes.

Sur le plan qualitatif, en milieu urbain, les eaux souterraines sont soumises à de nombreuses sources de pollution, diffuses ou ponctuelles. Les principaux polluants urbains sont liés à l'infiltration des eaux usées, des eaux de ruissellement et à la lixiviation des déchets. D'autres contaminations peuvent provenir des industries, par déversements accidentels ou chroniques de produits et d'effluents (Wolf *et al.*, 2006).

Sur le plan quantitatif, l'infiltration d'eau de pluie et la recharge sont fortement modifiées par les facteurs suivants (Wolf *et al.*, 2006) :

- Imperméabilisation de la surface (diminution de la recharge)
- Infiltration des eaux de pluie dans des puits perdus ou des tranchées d'infiltration (augmentation de la recharge). En Suisse, la politique récente de gestion des eaux météoriques favorise l'infiltration sur l'évacuation, pour autant que le système le permette.
- Fuites des réseaux d'adduction et d'évacuation des eaux (augmentation de la recharge)
- Collecte et drainage des eaux de surface (diminution de la recharge)

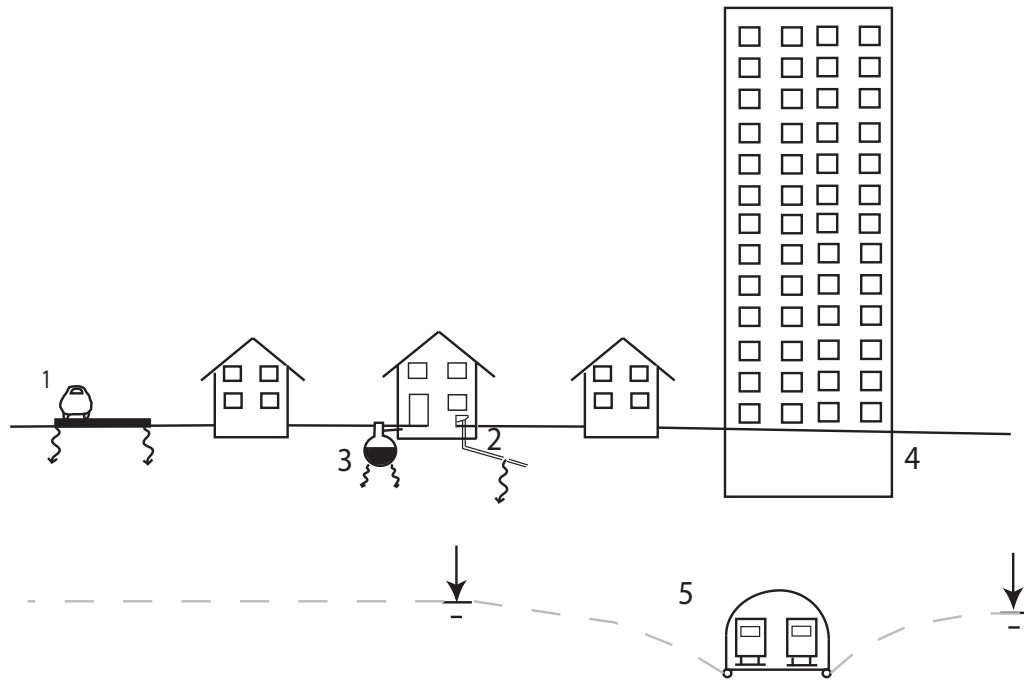


FIGURE 4.4.: Éléments spécifiques du cycle de l'eau en milieu urbain

- (1) suppression du sol naturel et de sa fonction épuratrice des eaux de surface et modification des conditions d'infiltration par imperméabilisation
- (2) fuites des réseaux d'évacuation des eaux usées créant une pollution diffuse des aquifères superficiels
- (3) pollutions accidentelles (hydrocarbures, effluents industriels, etc.)
- (4) excavations superficielles donnant lieu à une réduction de la protection géologique des aquifères
- (5) ouvrage souterrain dans la zone saturée, il entraîne une modification des niveaux piézométriques par effet de drainage, des courts-circuits entre aquifères superficiels et profonds, des effets de barrière hydraulique.



- Irrigation des jardins et espaces publics (augmentation de la recharge)

Les effets de ces différents facteurs ne sont pas homogènes dans l'espace : certains facteurs affectent l'entier de la ville (par exemple l'imperméabilisation), d'autres sont beaucoup plus locaux (par exemple l'irrigation des jardins publics). Ils ne sont pas non plus homogènes dans le temps, certains des facteurs étant plus ou moins dépendants des eaux météoriques. Cependant, plusieurs études (Decker *et al.*, 2000; Eiswirth *et al.*, 2004; Foster *et al.*, 1999; Lerner, 1997, 2002) ont montré que dans des conditions climatiques et géologiques différentes, l'effet général de l'urbanisation était le plus souvent une augmentation de la recharge des aquifères. Cet effet est le plus marqué dans les villes dépendant d'ouvrages d'assainissement autonomes et dans les climats arides et semi-arides. Il s'explique principalement par l'importation de volume d'eau de l'extérieur du bassin versant urbain (fuites dans des réseaux, irrigation, etc.). Enfin, en milieu urbain, les ressources en eau souterraine sont souvent exploitées pour l'eau potable ou les besoins industriels. Les prélèvements résultant de cette exploitation contribuent à modifier sensiblement le bilan hydrogéologique.

#### 4.2.1.1. Impacts des usages de l'espace sur ceux de l'eau souterraine

Les impacts des usages de l'espace sur ceux de l'eau souterraine sont dans la plupart des cas conflictuels et jouent un rôle primordial dans la gestion durable des ressources du sous-sol. Le type d'interactions est fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques ainsi que du type d'infrastructures.

#### Concurrence hydrogéologique

On entend par concurrence hydrogéologique l'impact des constructions souterraines entraînant un abaissement des niveaux phréatiques par pompage ou drainage. Lorsque l'aquifère est exploité, l'abaissement du niveau phréatique a pour conséquence une diminution des débits exploitables. Dans les cas extrêmes, les puits peuvent se retrouver entièrement au-dessus du niveau phréatique et devoir être abandonnés.

Pendant la phase de construction, les ouvrages réalisés avec rabattement de la nappe peuvent avoir un impact local sur les autres usages de l'eau souterraine. Par la nature temporaire du chantier, ces impacts sont généralement limités dans le temps et l'espace (figure 4.5).

Par exemple, la construction du tunnel de connexion entre l'A2 (Suisse) et l'A35 (France) à Bâle a été réalisée en traversant un aquifère exploité principalement pour des besoins industriels. Cet aquifère est formé de lits de graviers et de fines d'une épaisseur variant de 15 à 35 m. La construction en tranchée couverte avec abaissement de la nappe (voir annexe B) a eu un impact non négligeable sur ces exploitations. Une section du chantier a présenté des enjeux de coordination particulièrement importants : la réalisation d'un croisement entre le tunnel de connexion et un autre tunnel. Pour la construction, 140 l/s ont dû être pompés sur une période de trois ans et demi. À proximité de la zone, 13 puits industriels exploitant 30 l/s en moyenne et réinjectant 3,5 l/s (utilisation d'eau de refroidissement) ont été touchés par l'abaissement de la nappe. Des stratégies ont été développées pour réduire et compenser ces impacts. Selon les zones, les pompages ont

été encaissés dans des enceintes de parois moulées (voir annexe B) ou bien les industries ont été approvisionnées par les eaux pompées, lorsque les conditions de qualité étaient acceptables (Epting *et al.*, 2007).

De manière analogue, la construction d'un tunnel ferroviaire reliant la ville de Sydney (Australie) à son aéroport a été réalisée en traversant l'aquifère de Botany Sand sur 10 km. Les eaux de cet aquifère de sables sédimentaires fluviaux, marins et éoliens étaient exploitées à raison de 11 millions  $m^3/an$  pendant la construction. Pour limiter l'impact sur l'aquifère, il a été fixé aux constructeurs un taux d'infiltration maximum dans le tunnel de  $50 m^3/jour/km$ . Des modélisations ont montré que le temps de retour à l'état d'équilibre dans l'aquifère serait de 2 à 10 ans et que certains niveaux phréatiques seraient réduits jusqu'à 5 m après 50 ans d'exploitation de l'ouvrage (ces points sont situés au droit de certaines stations de l'ouvrage ferroviaire) si cette cible était atteinte (Merrick, 1997).

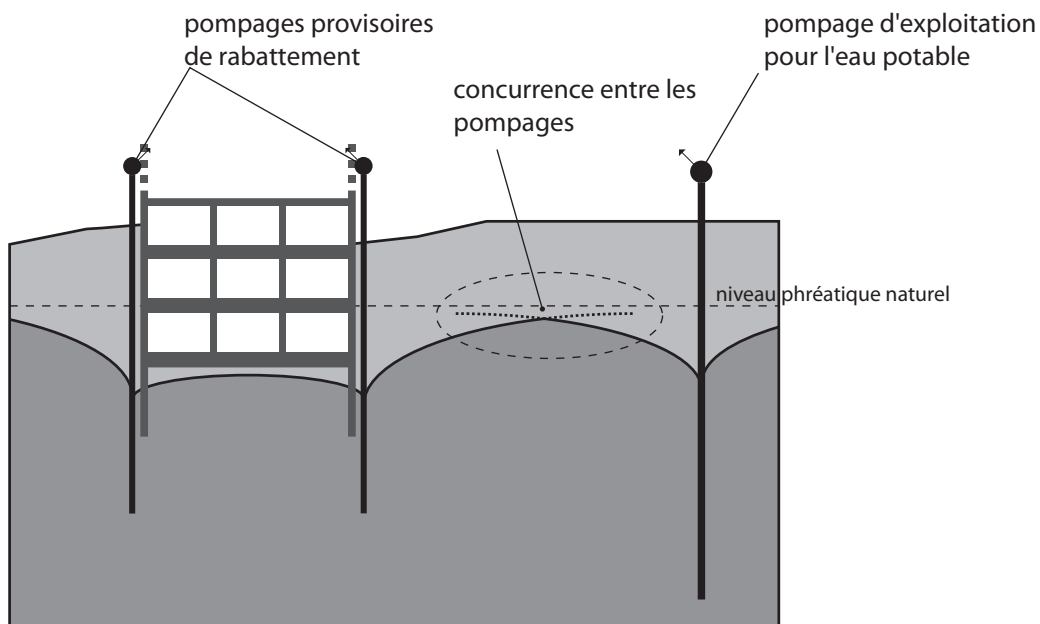


FIGURE 4.5.: Exemple de concurrence hydrogéologique pendant la construction

Les pompes provisoires pour la construction d'un ouvrage souterrain abaissent la nappe et entrent en concurrence avec le pompage pour l'eau potable : les quantités pompées au droit de ce dernier sont diminuées

Pendant la phase d'exploitation, la concurrence hydrogéologique concerne toutes les infrastructures souterraines non étanches se trouvant dans la zone saturée et dans une moindre mesure dans la zone de battement de la nappe (figure 4.6). À débit pompé égal, le rayon d'influence est plus important pour un rabattement permanent pendant la phase d'exploitation que pour un rabattement temporaire pendant la phase de construction. Les ouvrages étanches construits dans la nappe sont également sujets à des venues d'eau. Cependant, avec des standards de construction de qualité, ces dernières peuvent être

maintenues très basses.

Si ces impacts ne sont pas anticipés et concernent de grands ouvrages ou des aquifères très perméables, ils peuvent avoir des conséquences particulièrement importantes. C'est par exemple le cas à Séoul en Corée. La ville est construite sur un aquifère formé d'une zone fracturée dans le soubassement rocheux cristallin et recouverte de dépôts alluvionnaires peu épais. Les nombreuses infiltrations dans le réseau de métros impliquent des pompages très importants. Dans ce réseau de 297 km de tunnels, construit à des profondeurs atteignant localement 60 m, 47 millions de  $m^3$  d'eau ont été pompés en 2003. Ces pompages ont eu un impact fort sur la nappe, qui a baissé localement de plusieurs mètres. Plusieurs puits d'exploitation (l'aquifère est exploité par 2000 puits, pour un débit moyen de 41 millions de  $m^3/an$ ) ont dû être abandonnés à proximité des tunnels pour cette raison (Chae *et al.*, 2008).

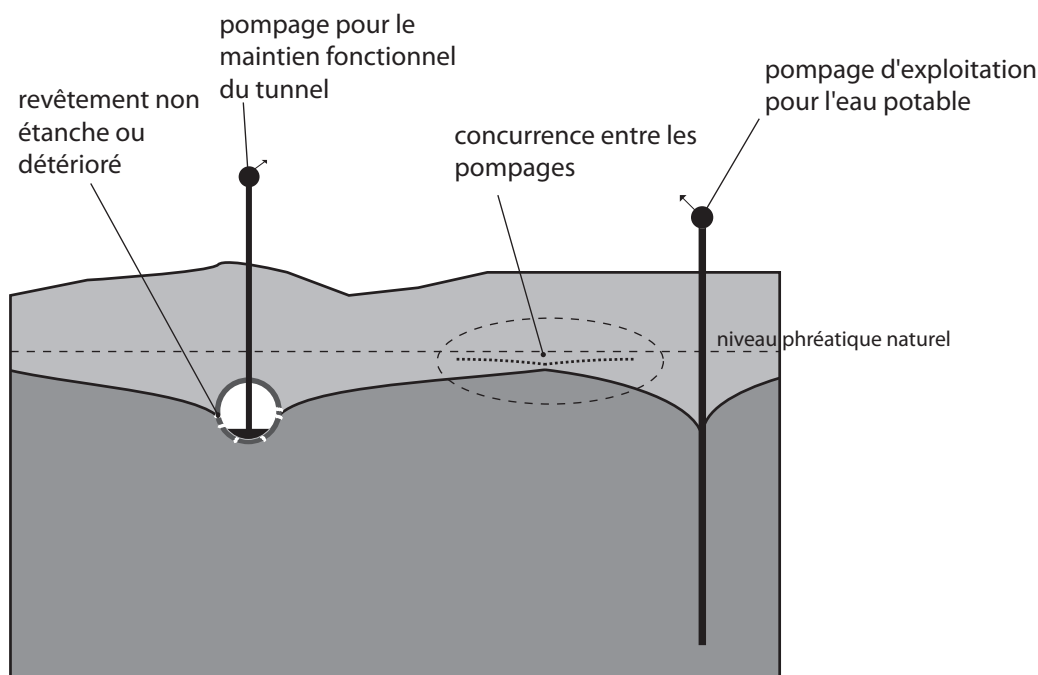


FIGURE 4.6.: Exemple de concurrence hydrogéologique pendant l'exploitation

Les pompages pour assurer le maintien hors d'eau du tunnel abaissent la nappe et entrent en concurrence avec le pompage pour l'eau potable : les quantités pompées au droit de ce dernier sont diminuées.

Lorsque les interactions concernent un ouvrage bien identifié, les impacts sont généralement moins forts. Ils dépendent cependant fortement du contexte hydrogéologique. Ainsi, à Stockholm, les impacts de la construction et de l'exploitation du tunnel d'Ormen ont fait l'objet d'une surveillance particulière (Cesano et Olofsson, 1997). Ce tunnel de 3,7 km de long, construit dans le soubassement rocheux, a un effet drainant sur les dépôts quaternaires en surface. 53 % des puits surveillés ont montré une réduction de niveau moyen de 0,1 m ou plus dans le long terme et 85 % ont été affectés ponctuellement

lors de la construction. Ces impacts sont différents suivant la taille des aquifères comme le montre la figure 4.7.

Dans le long terme, la concurrence hydrogéologique se produit donc essentiellement pour les ouvrages construits dans la nappe et non étanches. Comme une étude réalisée pour l'OFEFP<sup>6</sup> l'a montré, ces impacts sont d'autant plus forts que le terrain est perméable. Ils peuvent également être ponctuellement importants dans la zone de battement des aquifères à porosité de fracturation (OFEFP, 1998). La table 4.4 synthétise ces conditions de conflit.

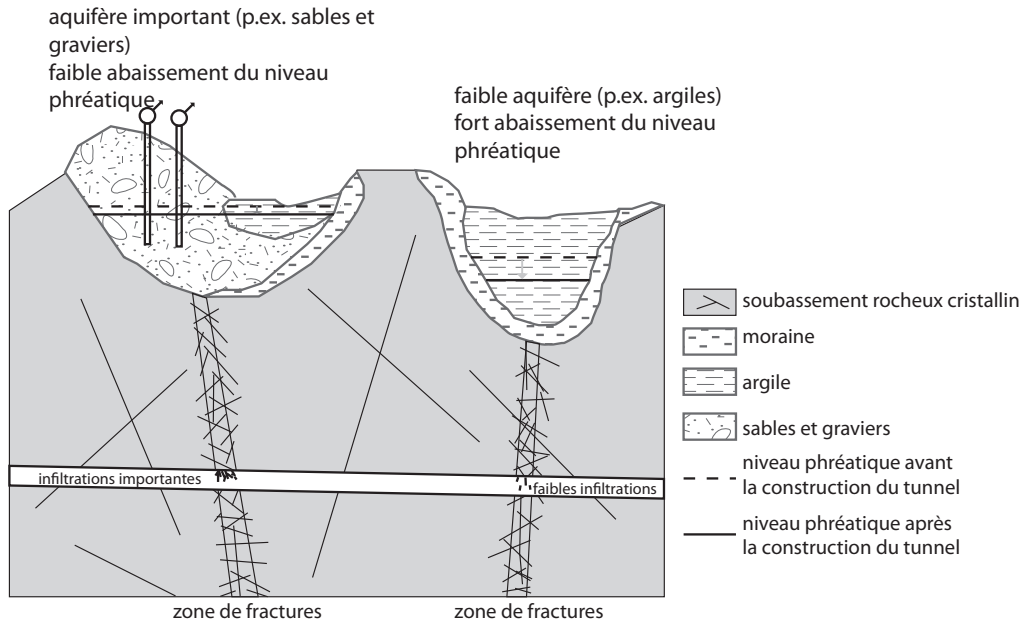


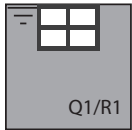
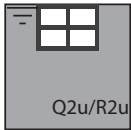
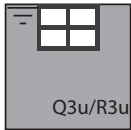
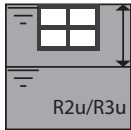
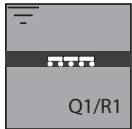
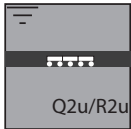
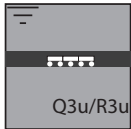
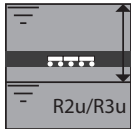
FIGURE 4.7.: Concurrence hydrogéologique cas du tunnel d'Ormen à Stockholm (Cesano et Olofsson, 1997)

6. Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage

TABLE 4.4.: Concurrence hydrogéologique, conditions de conflit

(\*) Dans la zone saturée, les ouvrages sont maintenus hors d'eau par pompage ou drainage

Les codes hydrogéologiques (Qi, Ri) ont été décrits à la table 2.1

		Contexte hydrogéologique			
		Q1/R1 saturé	Q2u/R2u saturé	Q3u/R3u saturé	R2u/R3u battement
Usage de l'espace	Ouvrages ponctuels non étanches*				
	Ouvrages linéaires horizontaux non étanches*				
Impact		Faible	Modéré à important	Important	Temporairement modéré ou important

### Effet barrage

Les ouvrages souterrains pénétrant dans la nappe changent les conditions d'écoulement et créent un barrage à cet écoulement. La réduction de la section d'écoulement qui en résulte modifie la capacité d'écoulement de l'aquifère (figure 4.8). Les échanges aux limites de l'aquifère sont perturbés par des effets barrage. Le niveau phréatique est modifié; il est plus élevé en amont de l'ouvrage et plus bas en aval. Les modifications hydrauliques induites par l'effet barrage ont des conséquences sur les ouvrages souterrains et les ouvrages de fondation (modification de la stabilité des ouvrages, inondations, etc.) (Marinos et Kavvas, 1997).

Pendant la phase de construction, un effet barrage peut avoir lieu lorsque le chantier est isolé hydrauliquement (pour abaisser localement la nappe ou pour réduire les infiltrations d'eau). Cette isolation peut être réalisée au moyen de rideaux de palplanches, par construction de parois moulées ou par injection ou congélation des terrains (annexe B). La congélation des terrains est temporaire; les palplanches peuvent être retirées après construction; les autres mesures sont permanentes. Pendant la phase d'utilisation, les ouvrages étanches immergés dans la zone saturée ont un effet barrage. Pendant la phase de démolition, si des remblais sont mis en place dans la zone saturée et s'ils ont une perméabilité inférieure aux terrains d'origine, un effet barrage peut aussi se créer. Techniquement, l'effet barrage peut être réduit par la mise en place de dérivation ou de tranchées drainantes sous les ouvrages, afin d'augmenter localement la perméabilité et de compenser la perte d'écoulement.

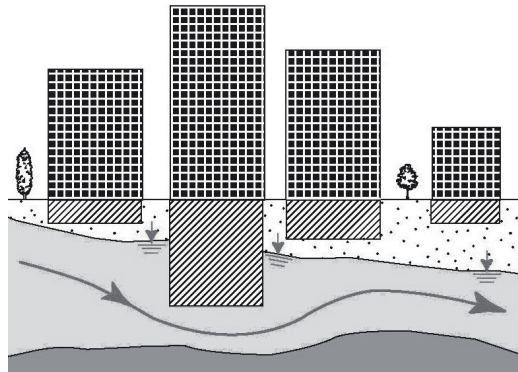


FIGURE 4.8.: Effet barrage de sous-sols d'immeubles

Les ouvrages linéaires horizontaux (tunnels et galeries) ont l'effet barrage le plus important lorsque l'axe du tunnel est perpendiculaire au flux (figure 4.9). Par modélisation numérique, Marinou et Kavvadas (1997) ont simulé l'effet d'un tunnel dans une telle situation. À Liège, un tunnel de 500 m traverse ainsi les plaines alluviales de la Meuse et de l'Ourthe. L'aquifère traversé est peu épais (environ 7 m) et très conducteur (de  $1E^{-3}$  à  $2E^{-2} m/s$ ). Il produit une augmentation des niveaux phréatiques atteignant 0,6 m en basses eaux et 1,6 m en hautes eaux (Dessargues, 1997). À Genève, l'effet barrage a été un critère pour le choix d'une variante de la traversée de l'Arve par le CEVA (Parriaux, 2004).

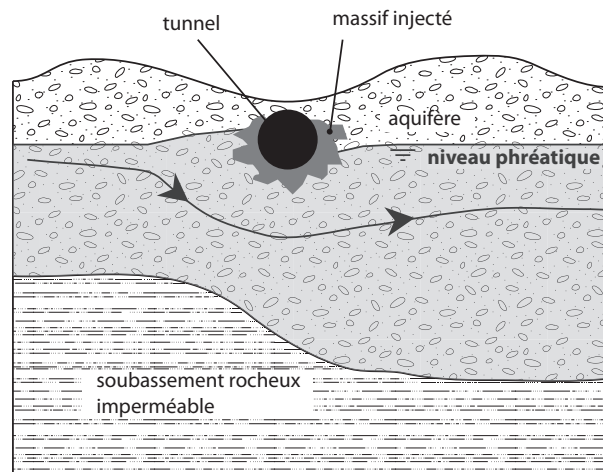


FIGURE 4.9.: Effet barrage d'un tunnel pénétrant dans une nappe, exemple de Liège et de Genève

Les ouvrages ponctuels et linéaires verticaux ont un effet barrage moins important que les ouvrages linéaires horizontaux, vu leur emprise sur l'aquifère. Cependant, l'effet cumulatif de l'implantation de nombreux ouvrages ponctuels ou verticaux dans la nappe peut être marqué. Ainsi, à Hong-Kong (Chine), la forte densité de fondations profondes

conjugée à la mise en place de remblais sur la mer ont entraîné une forte augmentation des niveaux de la nappe (figure 4.10). La ville est construite au-dessus d'un aquifère formé de roches cristallines décomposées et de colluvions. La densité de construction et la taille des bâtiments sont très élevées. Les bâtiments sont régulièrement fondés sur des pieux dont le diamètre est typiquement de 1,2 à 3,2 m et la profondeur de 20 à 50 m. Autour de nombreux bâtiments, des parois moulées ont été construites et des injections réalisées pour limiter les infiltrations dans les étages souterrains. Ces infrastructures géotechniques amplifient l'effet barrage. Des simulations hydrogéologiques ont montré que l'influence générale de cet effet était une remontée des niveaux phréatiques d'environ 20 à 30 m et que les ouvrages géotechniques en étaient majoritairement responsables (Jiao *et al.*, 2006).

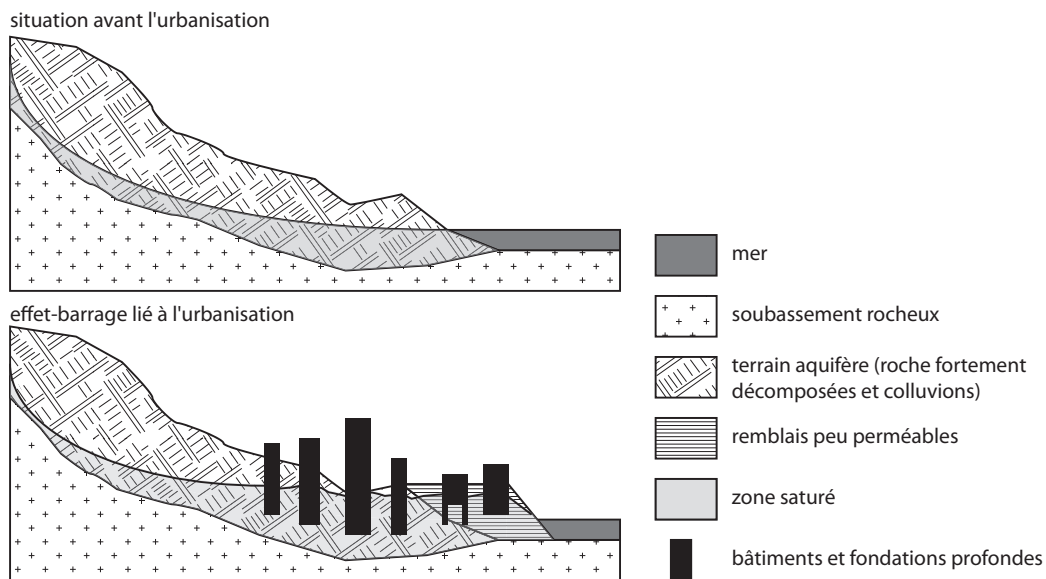
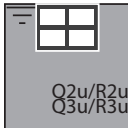
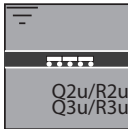
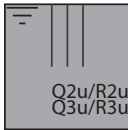


FIGURE 4.10.: Effet barrage lié à la construction de fondations profondes et de remblais sur la mer à Hong Kong (Jiao *et al.*, 2006)

Les conditions critiques du point de vue de l'effet barrage sont reportées dans la table 4.5.

TABLE 4.5.: Effet-barrage : conditions de conflit

(\*)En particulier si l'axe du tunnel est perpendiculaire à l'écoulement

	Contexte hydrogéologique		Impact
	Q2u/R2u saturé	Q3u/R3u saturé	
Usage de l'espace	Ouvrages ponctuels étanches		Modéré
	Ouvrages linéaires horizontaux étanches		Important*
	Ouvrages linéaires verticaux		Faible (effets cumulatifs possibles)

### Courts-circuits entre aquifères superposés

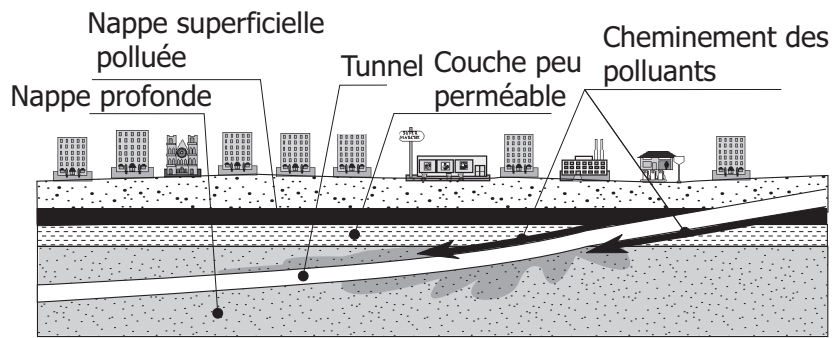
Lorsque deux aquifères superposés sont traversés par un même ouvrage, la perforation de la ou des couches imperméables qui les séparent provoque un court-circuit hydraulique : les eaux de la nappe dont le potentiel est le plus élevé peuvent s'infiltrer dans la nappe dont le potentiel est le plus faible (figure 4.11). On notera qu'en fonction des conditions hydrogéologiques, la nappe de potentiel le plus élevé n'est pas toujours la nappe supérieure (figure 4.11(b)).

Les courts circuits provoquent :

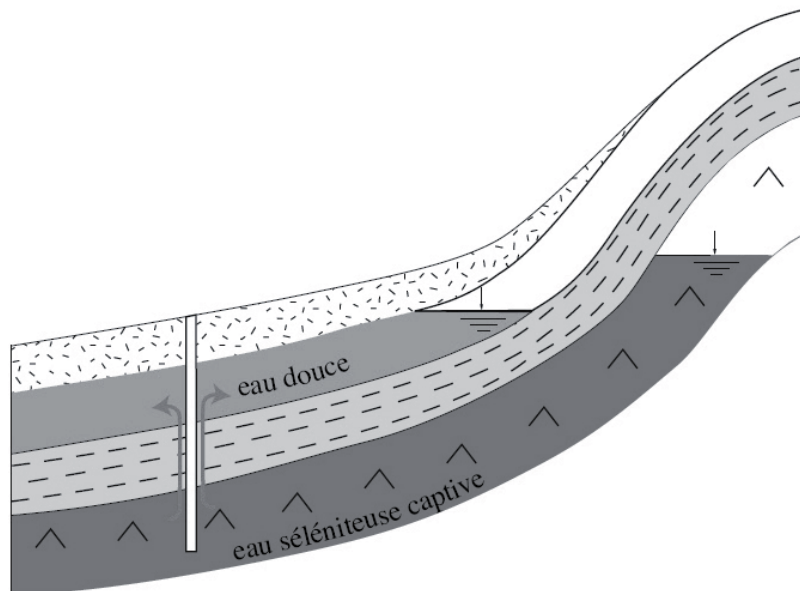
- Un effet sur le régime quantitatif des deux nappes, en particulier, la nappe dont le potentiel est le plus élevé, peut être drainée de manière importante.
- Un effet qualitatif sur la nappe dont le potentiel est le plus faible, les eaux des deux nappes pouvant avoir des chimies différentes. En milieu urbain, cet effet qualitatif a une grande importance, car les nappes superficielles peu profondes sont souvent polluées.

Les usages de l'espace souterrain par des infrastructures linéaires verticales sont particulièrement susceptibles de créer des courts-circuits entre aquifères superposés. Parmi ces ouvrages, on trouve les fondations profondes, mais aussi les ouvrages nécessaires à l'exploitation de la géothermie, ou de l'eau souterraine. Barker et Lawrence (2008) ont ainsi mis en évidence l'effet de la mise en connexion par des puits, d'un aquifère semi-captif avec un aquifère de surface pollué, dans la ville de Hat Yai en Thaïlande. L'effet de court-circuit est dans ce cas amplifié par la drainance qu'induit le pompage. Les risques





(a) L'aquifère supérieur s'infiltré dans l'aquifère inférieur



(b) L'aquifère inférieur s'infiltré dans l'aquifère supérieur

FIGURE 4.11.: Court-circuit entre deux aquifères superposés lié à la construction d'un ouvrage

tant qualitatifs que quantitatifs sont d'autant plus importants que les conductivités hydrauliques des aquifères superposés sont élevées.

Quand on construit des ouvrages qui traversent deux aquifères superposés, il est très important de porter une attention particulière au risque de perforation de l'horizon les séparant. Il ne doit pas exister de cheminement préférentiel des eaux à l'interface ouvrage-terrain dans cette zone.

L'importance des impacts négatifs de la mise en relation de deux nappes dépend de la position de la nappe exploitée et de la contamination (anthropique ou géogène) de la nappe de plus grand potentiel. Les conditions critiques sont résumées par la table 4.6 pour l'impact quantitatif et la table 4.7 pour l'impact qualitatif. La flèche sur les figures de la table indique la direction des potentiels décroissants. Seules les situations où la nappe supérieure a un potentiel plus grand que la nappe inférieure ont été représentées. Dans le cas contraire, il faut inverser les caractéristiques des nappes supérieure et inférieure :

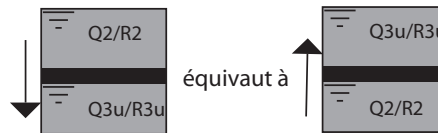
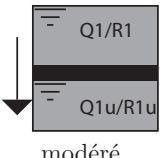
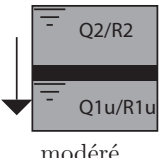
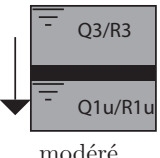
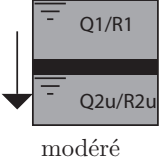
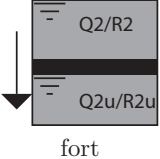
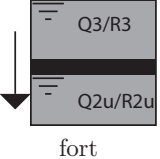
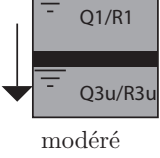
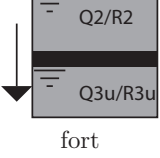
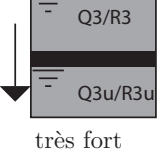


TABLE 4.6.: Court-circuit entre aquifères superposés, impact quantitatif

		Nappe dont le potentiel est le plus élevé		
		Q1/R1	Q2/R2	Q3/R3
Nappe dont le potentiel est le plus faible	Q1/R1			
	Q2/R2			
	Q3/R3			

TABLE 4.7.: Court-circuit entre aquifères superposés, impact qualitatif

		Nappe dont le potentiel est le plus élevé		
		Q1/R1	Q2/R2	Q3/R3
Nappe dont le potentiel est le plus faible	Q1u/R1u	 modéré	 modéré	 modéré
	Q2u/R2u	 modéré	 fort	 fort
	Q3u/R3u	 modéré	 fort	 très fort

### Infiltration d'eau de ruissellement

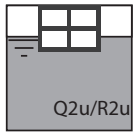
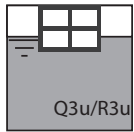
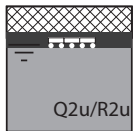
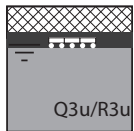
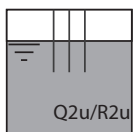
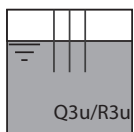
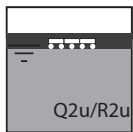
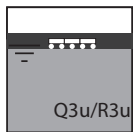
Lors de la phase de construction des ouvrages excavés depuis la surface, la couche protectrice des nappes est réduite, voire supprimée dans le cas des ouvrages pénétrant dans l'aquifère. Le cheminement de l'eau de ruissellement est plus rapide et la capacité épurative du sol diminuée. Si un soin particulier n'est pas apporté à la remise en place de terrains étanches autour de l'ouvrage, un cheminement préférentiel se crée pour l'infiltration des eaux de ruissellement. De l'eau peut être infiltrée tout au long de la phase d'utilisation de l'ouvrage (figure 4.12). Ces eaux de ruissellement contiennent des polluants (en particulier métaux lourds, hydrocarbures, carbone organique dissous et nutriments (voir par exemple Ellis, 1997; Pigué *et al.*, 2008; Rossi, 1998)) par lessivage des surfaces imperméables. Par ailleurs, les tunnels collectent des eaux de ruissellement par leurs portails. Si ces eaux de ruissellement ne sont pas correctement évacuées, les tunnels peuvent eux-mêmes jouer un rôle de chemin préférentiel pour les eaux polluées.

L'infiltration d'eau de ruissellement est un problème délicat dès qu'un ouvrage pénètre dans la zone aquifère ; elle est d'autant plus importante que l'aquifère a une conductivité hydraulique élevée. Les conditions critiques sont présentées à la table 4.8.

L'infiltration d'eau de ruissellement peut être réduite par des mesures constructives ciblées telles que la réalisation de forage à tubage permanent pour les ouvrages linéaires verticaux ou des méthodes d'étanchement et de drainage pour les autres ouvrages (annexe B).

TABLE 4.8.: Infiltration d'eau de ruissellement, conditions de conflit

(\*) l'évacuation des eaux du tunnel doit être contrôlée, sinon l'impact est supérieur

	Contexte hydrogéologique		
	Q2u/R2u	Q3u/R3u	
Usage de l'espace	Ouvrages ponctuels	 Q2u/R2u	 Q3u/R3u
	Ouvrages linéaires horizontaux construits en tranchées	 Q2u/R2u	 Q3u/R3u
	Ouvrages linéaires verticaux	 Q2u/R2u	 Q3u/R3u
Impact	Modéré	Important	
Usage de l'espace	Ouvrages linéaires horizontaux construits en tunnels	 Q2u/R2u	 Q3u/R3u
	Impact	Faible*	Faible*

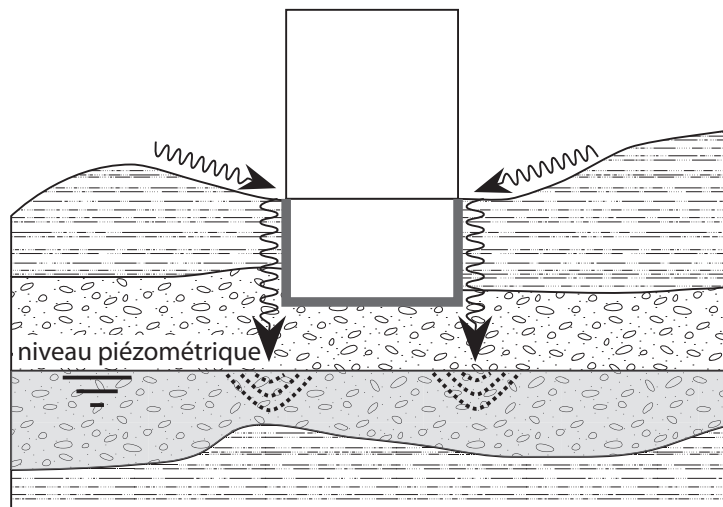


FIGURE 4.12.: Effet du percement des couches étanches par les ouvrages en profondeur (GEOELP in: SIA, 2005)

Ces formes de pollution sont diffuses sur le territoire urbain. Les polluants font partie du bilan de contamination par les eaux de ruissellement, largement documenté dans la littérature (par exemple: Wolf *et al.*, 2006). Leur part reste toutefois difficile à évaluer comparativement aux autres sources de polluants (en particulier, les fuites des réseaux d'évacuation pluviale qui ont des profils de pollution comparables).

### Pollution par les matériaux d'injection

Il est possible de construire des ouvrages souterrains dans les aquifères en réduisant l'effet de concurrence hydrogéologique par des mesures d'étanchement. L'étanchéité est souvent assurée par injection ou jetting (annexe B). Les matériaux d'injection sont des coulis à base de ciment, de gel de silicates ou de résine synthétique. Pour obtenir une pénétration optimale des coulis, des adjuvants synthétiques sont utilisés. En raison de l'hétérogénéité géologique des terrains, il est très difficile de prévoir précisément quelle sera l'invasion du front d'injection. Les coulis peuvent migrer sur de grands volumes et augmenter l'effet de barrage des ouvrages. Par ailleurs, les matériaux utilisés dans les coulis et leurs adjuvants ne sont pas toujours compatibles avec les exigences qualitatives pour l'eau de boisson (figure 4.13). Lors de l'utilisation de tunneliers à pression de boues (annexe B), il peut également se produire une migration des boues dans l'aquifère.

L'impact des matériaux d'injection sur les eaux souterraines reste peu documenté. Deux études peuvent toutefois être évoquées :

- A Berlin, entre 1990 et 1995, 100'000  $m^3$  de gel de silicates ont été injectés dans les aquifères poreux. En 1995, l'université de Karlsruhe a mené une étude sur un terrain pilote pour évaluer la migration de ces gels. Des essais d'injection ont été réalisés et les concentrations en sodium, aluminium et silicates ont été mesurées. Des modélisations

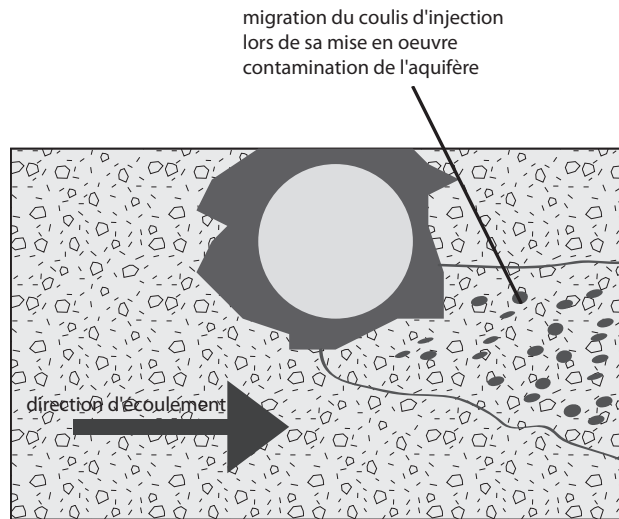


FIGURE 4.13.: Migration du coulis d'injection dans l'aquifère

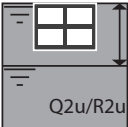
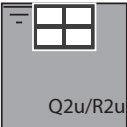
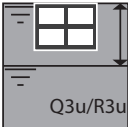
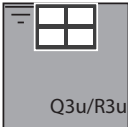
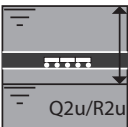
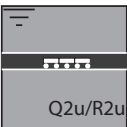
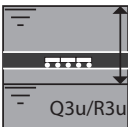
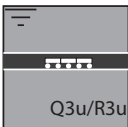
de transport des polluants ont également été réalisées. L'étude a conclu que l'influence des injections de gel de silicate sur les eaux souterraines est assez faible, la capacité tampon de l'aquifère permettant de fixer les ions en composés immobiles de carbonates et d'aluminates (Eiswirth *et al.*, 1999).

- Des essais de jetting ont été menés à Genève en prévision de la construction de la traversée de l'Arve par le tunnel du CEVA. Les essais ont été réalisés dans un terrain aquifère d'alluvionnement ancien, de perméabilité élevée. Le coulis utilisé est un coulis de ciment avec un adjuvant commercial synthétique (à base de polyacrylamides). L'étude hydrogéologique a mis en évidence
  - la formation de veines par migration du coulis sur quelques mètres,
  - une modification locale et supposée temporaire des teneurs en sulfates et en sodium ; cette augmentation n'est plus mesurable au-delà de 10 à 15 m,
  - une anomalie marquée du pH des eaux infiltrées dans les cellules (le coulis ayant lui-même un pH mesuré à 12,6),
  - les mesures en continu de pH ne montrent pas de variation au-delà de 10 à 15 m des cellules injectées.

Les auteurs recommandent le traitement des eaux infiltrées avant rejet dans un récepteur naturel (Cervera et Barras, 2006).

Les conditions critiques de pollution par les matériaux d'injection sont liées à la perméabilité de l'aquifère (plus il est perméable, plus le front de migration sera important) et aux flux d'injection (table 4.9).

TABLE 4.9.: Pollution par les matériaux d'injection, conditions de conflit

	Contexte hydrogéologique				
	Q2u/R2u battement	Q2u/R2u saturé	Q3u/R3u battement	Q3u/R3u saturé	
Usage de l'espace	Ouvrages ponctuels étanches				
	Ouvrages linéaires horizontaux étanches				
Impact	Faible	Modéré	Modéré	Fort	

### Mobilisation de polluants

Les impacts des constructions souterraines sur les eaux peuvent indirectement contribuer à dégrader la qualité de ces dernières par la mobilisation de polluants ou de substances géogènes :

- Le cas de la mise en connexion de deux nappes est traité sous « courts-circuits entre aquifères superposés ».
- Si les eaux de ruissellement traversent des sites pollués situés dans la zone non saturée pendant le processus d'infiltration, elles peuvent mobiliser ces polluants par lixiviation (figure 4.14).
- Lorsque les ouvrages génèrent des modifications importantes des conditions d'écoulement, les plumes de polluants existant dans une nappe (par exemple si une nappe est touchée par un site contaminé ou des rejets industriels) peuvent être déplacées vers les zones de captage par drainance (figure 4.15).

Les risques de pollution par mobilisation de polluants peuvent être réduits de deux manières :

- Décontamination du site (dans le cas où l'ouvrage est situé directement au-dessus du site pollué, cette solution est à préférer).
- Monitoring des plumes de contamination. Les outils de modélisation numérique permettent de prévoir les impacts de la mobilisation de polluants. Les résultats de simulation peuvent alors être contrôlés sur site par un suivi et des analyses piézométriques.

La problématique de mobilisation des polluants est particulièrement sensible lorsqu'elle est conjuguée avec la concurrence hydrogéologique. Dans les deux études de cas de Bâle

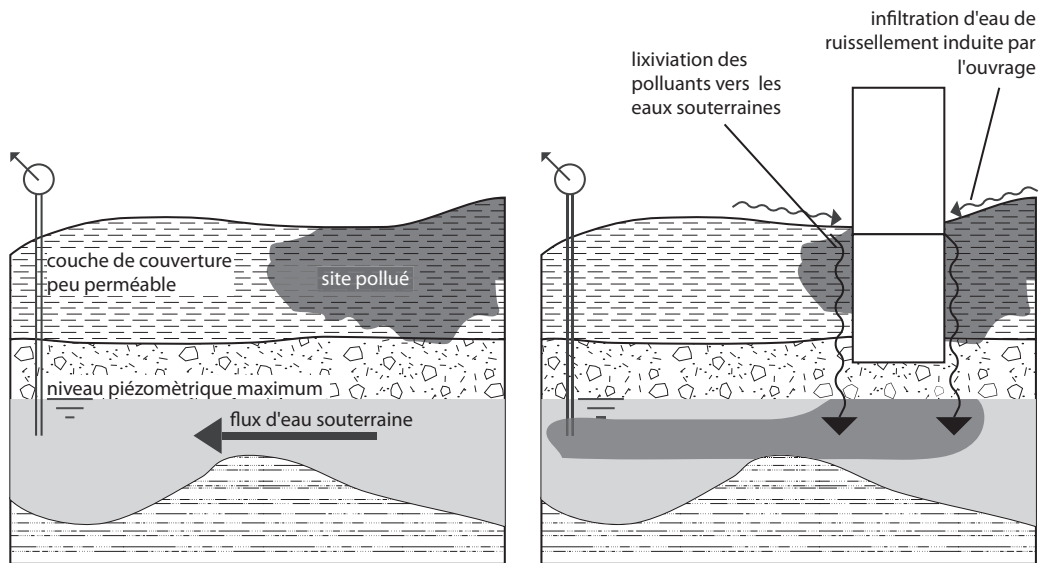


FIGURE 4.14.: Mobilisation de polluants par lixiviation

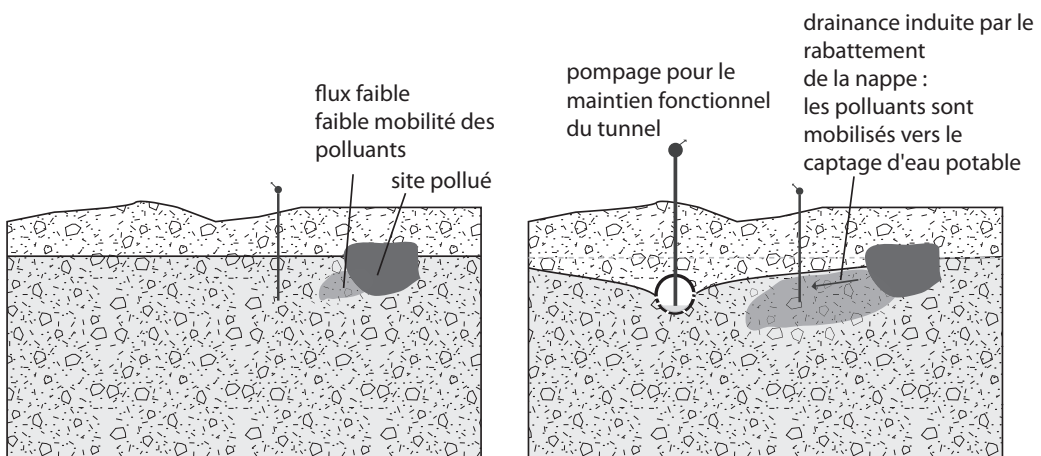


FIGURE 4.15.: Mobilisation de polluants par drainance



et de Sydney décrites précédemment, la présence de sites contaminés a été un point important nécessitant la mise en place d'un suivi précis, puisque la drainance engendrée par les pompages de constructions était soupçonnée de pouvoir mobiliser des contaminants vers les captages.

### Utilisation des ouvrages souterrains pour le captage d'eau

Dans certaines situations, la construction d'ouvrages souterrains peut offrir des opportunités de captage des eaux souterraines à faible coût. Les eaux sont drainées par l'ouvrage et transportées entre le tunnel et son revêtement interne. Cette solution reste peu fréquente en milieu urbain. Avant de l'envisager, le risque de contamination de l'eau doit être évalué soigneusement. Par ailleurs, pour qu'une telle solution soit techniquement possible, il faut que les charges hydrauliques ne soient pas trop importantes, sinon il est difficile de concilier l'étanchéité de l'ouvrage avec la réalisation d'une zone de drainage.

De telles solutions ont été mises en œuvre pour des tunnels routiers situés dans des aquifères rocheux principalement. En milieu urbain, la qualité des eaux ou les dégradations de cette qualité liée à la construction d'ouvrages souterrains sont des éléments à prendre en compte avant d'envisager ces solutions. En Suisse, le tunnel autoroutier de Glion est équipé d'un tel captage (figure 4.16).

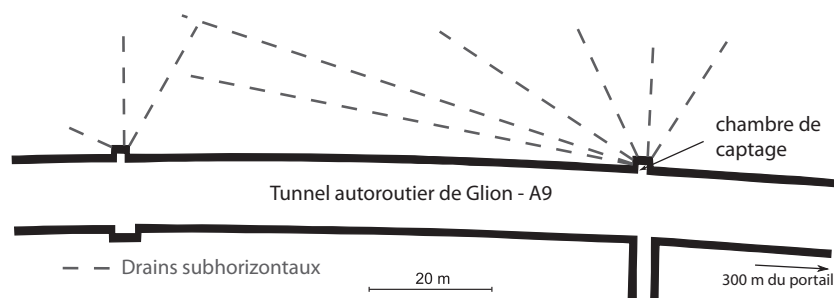
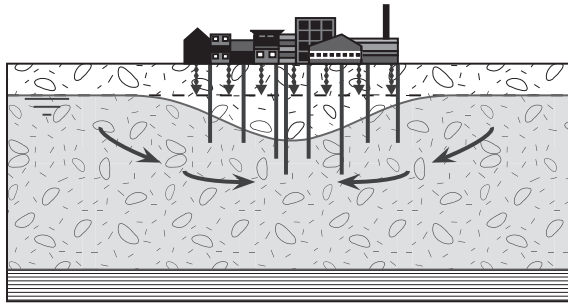


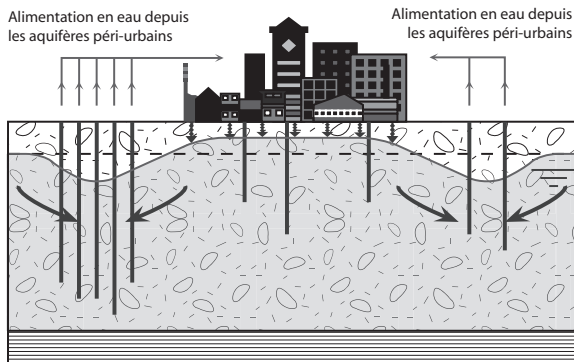
FIGURE 4.16.: Captage d'eau potable dans le tunnel de Glion (autoroute A9, Suisse)

#### 4.2.1.2. Impacts des usages de l'eau souterraine sur ceux de l'espace

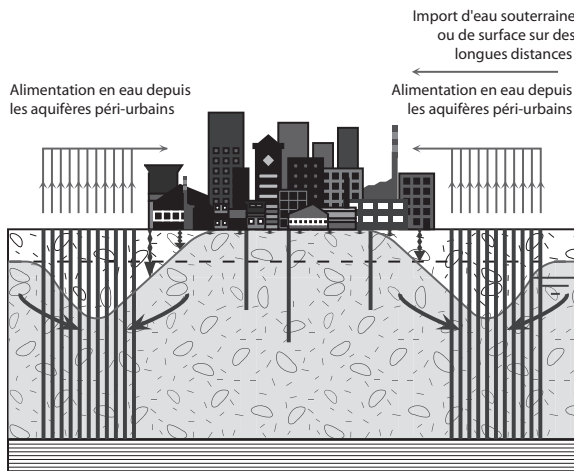
De nombreuses villes des pays industrialisés ont connu un développement similaire de leurs nappes souterraines (figure 4.17). Les villes construites au-dessus d'aquifères, ont exploité cette ressource au début de leur développement, souvent sans stratégie coordonnée de gestion qualitative et quantitative. Par conséquent, les nappes ont été surexploitées et polluées. Pour ces raisons et aussi parce que la demande a changé (en particulier, les industries ont migré à la périphérie de la ville), les exploitations ont été transférées vers l'extérieur de la ville. En centre-ville, les niveaux phréatiques ont augmenté. Parallèlement, la pression de la demande en eau a été reportée toujours plus loin de la ville, avec des conséquences sur les coûts, la gestion énergétique et la concurrence entre la ville et les régions périphériques.

**(a) Le village devient une ville**

- Augmentation de la demande en eau des ménages et des industries.
- Baisse de la nappe phréatique, les puits sont construits plus profonds.
- Les eaux usées et de ruissellement s'infiltrent dans le sous-sol.
- Les nappes superficielles dans les centres des villes deviennent polluées.
- La subsidence peut se produire si les aquifères sont peu consolidés.

**(b) La ville s'étend**

- Les aquifères sous la ville sont abandonnés en raison de la pollution, pour lutter contre la subsidence ou parce que la demande a diminué avec la migration des industries vers la périphérie.
- Au centre, les eaux souterraines remontent en raison de la réduction des pompages et de l'augmentation de la recharge.
- Les eaux souterraines sont importées de la périphérie, le niveau des aquifères baisse en périphérie.
- La modification des gradients hydrauliques produit une circulation des eaux polluées du centre ville vers la périphérie.

**(c) La ville s'étend plus loin**

- La pression sur les aquifères péri-urbains augmente, la qualité de l'eau baisse en raison de la pollution urbaine.
- Pour répondre à l'ensemble des besoins, l'eau doit être importée sur des distances plus longues, entraînant une augmentation des coûts.
- La nappe phréatique monte au centre de la ville, inondant les infrastructures de sub-surface.
- Les possibilités d'infiltration des eaux pluviales sont réduites.
- Les réseaux d'eaux pluviales sont parasités par les eaux souterraines.

FIGURE 4.17.: Évolution des niveaux phréatiques et croissance urbaine. Phénomène de rebond de la nappe phréatique (adapté de Morris *et al.*, 1997)

Ce phénomène de rebond phréatique a été décrit pour plusieurs villes et plusieurs contextes hydrogéologiques :

- Barcelone (Espagne). Dans les années soixante, l'extraction d'eau souterraine dans la basse vallée du Besós était de 60 à 70 millions de  $m^3/an$ . L'abaissement de la nappe phréatique était alors en ville de quelques mètres à plus de quinze mètres. À partir de la fin des années soixante-dix, la pollution de la nappe et la désindustrialisation de Barcelone ont conduit à une baisse radicale des prélèvements. En conséquence, la nappe est remontée de 1 à 10 m dans la ville de Barcelone (Vázquez-Suñe *et al.*, 1997; Vázquez-Suñe *et al.*, 2005).
- Milan (Italie). La ville est construite sur un aquifère de dépôts fluviaux et fluviaux-glaciaires (faciès de sables et graviers) à nappe libre. En 1915, la nappe phréatique se trouvait 1 m sous le niveau du terrain. En 1970, en raison des exploitations urbaines, industrielles et agricoles, la nappe avait baissé localement jusqu'à 40 m. Depuis les années quatre-vingts, on observe une remontée ; en 1995 la nappe se trouvait à 20 m sous la surface. Cette remontée est liée à une désindustrialisation de la région et à une diminution de la population (Bonomi et Ellis, 1999).
- Londres (Royaume-Uni). La ville est construite sur un aquifère de craie confiné sous une couche d'argile. Jusqu'en 1965, les niveaux phréatiques ont diminué, depuis ils remontent de 0,5 à 1,5 m par an (Lerner et Barrett, 1996; Mavroulidou et Woods, 1997).
- Paris (France) et Tokyo (Japon) ont connu des développements similaires décrits au chapitre 3.

Dans les villes postindustrielles, la remontée des nappes est souvent un problème amplifié par l'augmentation de la recharge qu'induit l'urbanisation. Les eaux souterraines sont une des contraintes principales pour la construction et l'exploitation des ouvrages souterrains (ITA Working group on maintenance and repair of underground structures, 1991). Aussi, la variation des niveaux phréatiques engendre une série de conflits entre les usages de l'eau et de l'espace.

### **Infiltration dans les ouvrages souterrains**

L'infiltration d'eaux souterraines dans les ouvrages est un problème particulièrement important dans les villes où un rebond de la nappe phréatique se produit (figure 4.18). Souvent, des infrastructures ont été construites sans mesures d'étanchement dans des terrains non saturés au moment de la construction. Lorsque la nappe remonte, elle atteint le niveau de ces infrastructures souterraines et produit des infiltrations très importantes. La préservation des infrastructures demande alors de pomper massivement dans les aquifères pour abaisser la nappe. Ainsi, dans la ville de Barcelone, 12 millions de  $m^3$  ont été pompés du réseau de métro en 1999 (Vázquez-Suñe *et al.*, 1999). Ces pompages sont en croissance constante et il faudrait pomper 40 millions de  $m^3/an$  pour stabiliser le niveau de la nappe. Les eaux pompées sont en partie dirigées vers le réseau d'assainissement pluvial. Cette surcharge du réseau rend la ville vulnérable aux fortes crues (Vázquez-Suñe *et al.*, 1997). À Paris, les prélèvements dans le réseau de la RATP dépassaient les 5 millions de  $m^3/an$  à la fin des années quatre-vingt et allaient augmentant depuis la fin des années soixante. À Milan, les eaux de la nappe inondent de nombreux

parkings, caves et souterrains, et menacent le patrimoine historique (Bonomi et Ellis, 1999).

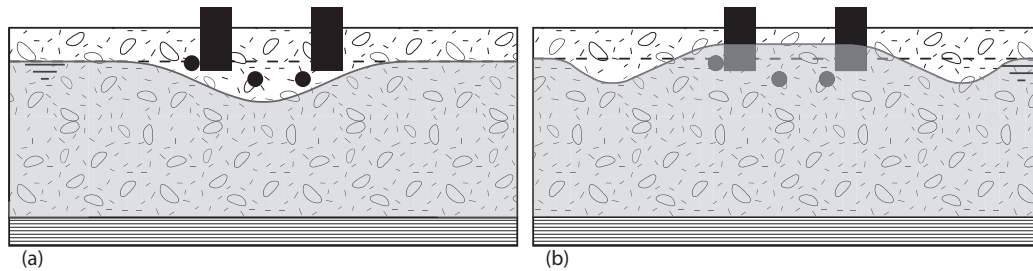


FIGURE 4.18.: Effet de la remontée des nappes sur les ouvrages construits dans la zone non saturée

(a) Pendant la première phase de développement de la ville (voir figure 4.17), les ouvrages souterrains sont construits au-dessus du niveau de la nappe, mais sous son niveau naturel.

(b) Un rebond de la nappe se produit, les ouvrages sont inondés, des pompages doivent être mis en œuvre pour les maintenir hors de l'eau.

En général, les infiltrations ont lieu préférentiellement dans les zones de faiblesse que forment les joints de la structure. Les flux peuvent y être très importants et engendrer des dégradations. Par exemple, à Tokyo un tunnel construit en voussoirs de béton armé a été sujet à des infiltrations par remontée de la nappe. Les infiltrations ont eu lieu principalement au droit des joints entre les voussoirs et ont érodé les sédiments autour du tunnel. Ce dernier a subi des tassements et une ovalisation (ITA Working group on maintenance and repair of underground structures, 1991). Lorsque des matières sont transportées dans les eaux infiltrées, elles peuvent également endommager les systèmes techniques, en particulier les installations de pompages. Enfin, dans les régions soumises au gel, la conjonction des effets de l'eau et du gel accélère les détériorations. En l'absence de mesures de réparation, ces détériorations conduisent à une augmentation des infiltrations (ITA Working group on maintenance and repair of underground structures, 1991).

Les infiltrations, surtout si elles sont localisées, peuvent être réduites par des mesures de construction, en particulier des injections (annexe B). Ces mesures sont toutefois difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. L'effet des étanchements sur un ouvrage déjà construit est moins efficace que des mesures prises lors de la construction. Des infiltrations importantes peuvent imposer une rénovation complète de l'ouvrage et le remplacement du revêtement du tunnel ; en particulier, si des quantités importantes d'eau ou de composés chimiques y ont percolé (ITA Working group on maintenance and repair of underground structures, 1991).

### Modification de la poussée d'Archimède

Les ouvrages construits de manière étanche dans la zone phréatique sont soumis à une force de sous-pression proportionnelle au potentiel hydraulique au niveau de leur sou-

bassement (poussée d'Archimède). L'augmentation des niveaux phréatiques entraîne une augmentation de la pression dans les pores ou les fractures des aquifères et donc de la poussée d'Archimède sur les constructions souterraines et les systèmes de fondation (Heathcote et Crompton, 1997) (figure 4.19). Les ouvrages sont soumis à une force plus importante. Dans les cas extrêmes, cette augmentation de la sous-pression peut conduire à une déstabilisation complète de l'ouvrage. Pour contrer cet effet, il est nécessaire de mettre en place des ancrages, d'augmenter le poids propre de l'ouvrage ou encore de réaliser des pompages. Ainsi, à Londres les fondations du new British Library à Bloomsbury ont été surdimensionnées pour prendre en compte l'augmentation de la poussée d'Archimède (Feb *et al.*, 1989). À Tokyo, de nombreux bâtiments sont construits en prenant des mesures constructives permettant d'augmenter le poids propre de l'ouvrage en fonction de la remontée du niveau phréatique (voir chapitre 3). L'ensemble de ces mesures augmente les coûts de construction des ouvrages.

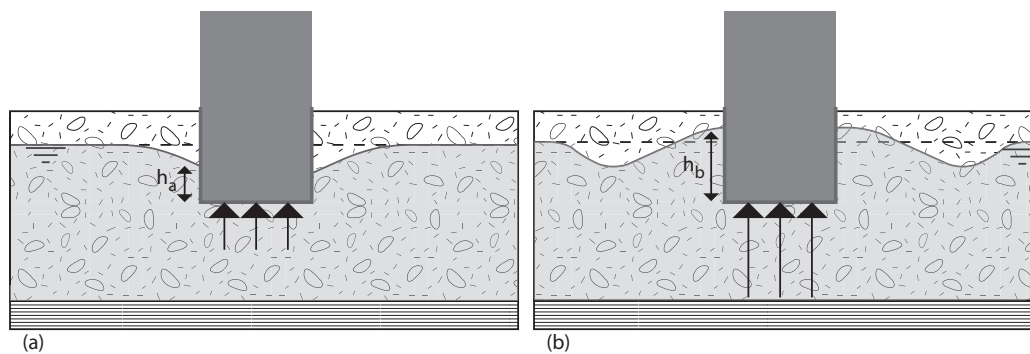


FIGURE 4.19.: Augmentation de la poussée d'Archimède sous un ouvrage.

Au temps (a), l'ouvrage souterrain est construit étanche (figure 4.17), la sous-pression est proportionnelle à la hauteur  $h_a$ .

Au temps (b), la sous-pression a fortement augmenté et est proportionnelle à  $h_b$ .

### Subsidence et soulèvement

Dans les terrains meubles, à porosité intergranulaire, la réduction des niveaux phréatiques entraîne une diminution de la pression hydrostatique dans les pores. Les conditions de l'équilibre hydromécanique sont modifiées. La perte de portance entraîne un affaissement du squelette. Cet affaissement se traduit en surface par la subsidence du terrain (Musy et Soutter, 1991). Par ailleurs, le volume de certaines argiles varie avec leur taux d'humidité. Cette variation peut être responsable d'importants phénomènes de subsidence (Custodio, 1997). En fonction des paramètres du terrain (limite de plasticité, état de préconsolidation, etc.) et de l'ampleur de la surexploitation, la subsidence peut avoir une intensité différente. À Mexico, elle atteint plusieurs mètres (chapitre 3), à Londres, plusieurs dizaines de centimètres (Lerner et Barrett, 1996) et à Tapei, localement plus d'un mètre, les vitesses de subsidence atteignant au plus fort  $70 \text{ mm/an}$  (Chen *et al.*, 2007).

Le phénomène de subsidence est partiellement réversible. En cas de remontée des nappes, il peut donc se produire un soulèvement des terrains. En raison de la nature élastoplastique du matériel géologique, le soulèvement par recouvrement des niveaux phréatiques est généralement sensiblement inférieur à la subsidence. Chen *et al.* (2007), estiment que son intensité est d'un ordre de grandeur de moins. Le soulèvement est par ailleurs différé par rapport à la remontée du niveau phréatique alors que la subsidence est simultanée (figure 4.20).

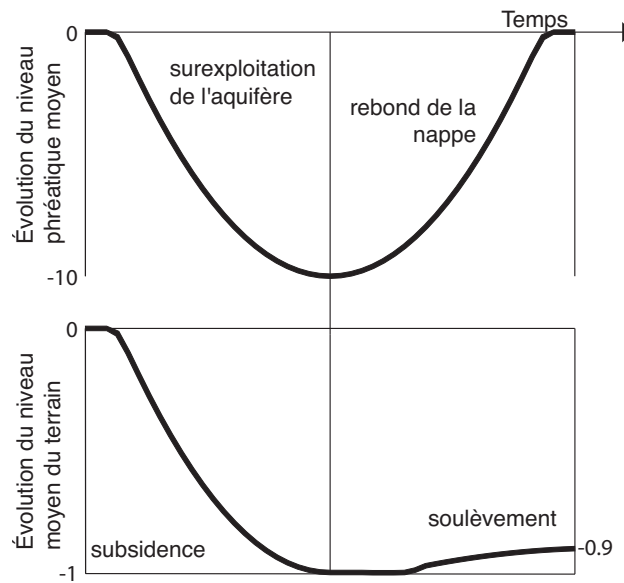


FIGURE 4.20.: Subsidence et soulèvement liés à la surexploitation puis au rebond de la nappe. Les chiffres donnent les ordres de grandeur des phénomènes (adapté de: Chen *et al.*, 2007).

En raison de la nature hétérogène du milieu géologique, la subsidence et le soulèvement n'ont pas lieu de manière uniforme. Ces phénomènes entraînent sur les infrastructures de fondation et les infrastructures souterraines des contraintes différentielles qui peuvent les endommager. En particulier, dans les systèmes où des fondations sont connectées, mais reposent sur des épaisseurs différentes, les contraintes peuvent être très élevées (Lerner et Barrett, 1996).

Des modifications texturales des terrains poreux peuvent également être à l'origine de la subsidence. C'est le cas à Riyad en Arabie Saoudite. La ville est construite sur des sédiments éoliens. Les particules de sols sont faiblement liées par un ciment d'halite et de gypse. La ville a connu une augmentation des niveaux phréatiques urbains (nappe superficielle non exploitée) par augmentation de la recharge. Cette montée de la nappe produit une dissolution du ciment évaporitique du sol et sa compaction (Stipho, 1997). C'est le phénomène d'hydrocompaction.

### Corrosion des infrastructures et détérioration des ouvrages

En milieu urbain, l'exploitation des eaux souterraines contribue à la mobilisation de polluants anthropiques et de composés chimiques d'origine géogène. Cette mobilisation peut avoir des impacts sur la qualité de l'eau de boisson, mais aussi sur les infrastructures en contact avec la nappe. Deux phénomènes sont particulièrement fréquents : l'attaque du béton par les sulfates et la corrosion de l'acier en milieu salin (Custodio, 1997). Ces phénomènes sont principalement liés à la présence de sulfates et de chlorures.

La présence de sulfates peut avoir des causes géogènes, en particulier en cas de présence d'évaporites ou par oxydation de la pyrite. Il peut également avoir des causes anthropiques, notamment par la lixiviation de déchets. En conditions réductrices, il peut être transformé en sulfure d'hydrogène par réaction biochimique. Dans ces cas, l'action des sulfates peut être combinée à l'attaque acide de l'acier dans les bétons armés. De tels cas de corrosion ont été rapportés par exemple au Japon et au Royaume-Uni (ITA Working group on maintenance and repair of underground structures, 1991).

Les chlorures sont présents dans l'eau de mer. En milieu côtier, une surexploitation de la nappe peut entraîner l'invasion d'un front d'eau salée. Les chlorures peuvent également être importés avec des matériaux de remblais d'origine marine (voir par exemple à Göteborg: Norin *et al.*, 1999), ou mis en solution lors de la percolation d'eau au travers d'horizons chargés en chlorures, par exemple lorsqu'un rebond de la nappe phréatique se produit (Lerner et Barrett, 1996). Les chlorures ont également de nombreuses sources anthropiques : sels de déneigement, lixiviats de décharges, rejets d'eaux usées, etc.

Les caractéristiques physiques des eaux souterraines peuvent également avoir un effet sur les ouvrages souterrains. La turbidité entraîne des dysfonctionnements des systèmes mécaniques de pompage. Les eaux dures provoquent des dépôts calcaires. Les eaux agressives (faible minéralisation et pH acide) provoquent une dissolution des carbonates et une attaque acide des infrastructures.

Les conditions critiques de corrosion sont liées aux conditions physico-chimiques de l'aquifère pour tous les ouvrages dans la zone saturée ou la zone de battement. Du point de vue de la construction, il s'agit surtout d'éviter de développer des infrastructures :

- Dans la zone saturée ou de battement des eaux pour lesquelles un problème physico-chimique est connu.
- Dans la zone saturée ou de battement des eaux pour lesquelles un problème géogène peut être attendu : en particulier en présence de roches évaporitiques.

Par ailleurs, dans les villes situées sur des terrains sédimentaires fins saturés, les bâtiments anciens ont souvent été construits sur des pieux de fondation en bois. L'abaissement de la nappe pour l'exploitation d'eau potable ou pour la construction peut entraîner la décomposition de ces fondations par oxydation. Cette situation a par exemple été observée à Helsinki en Finlande (chapitre 3) ou à Göteborg en Suède (Norin *et al.*, 1999).

## 4.2.2. Interactions espace-géothermie

### 4.2.2.1. Impacts des usages de l'espace sur ceux de la géothermie

#### Géostructures énergétiques

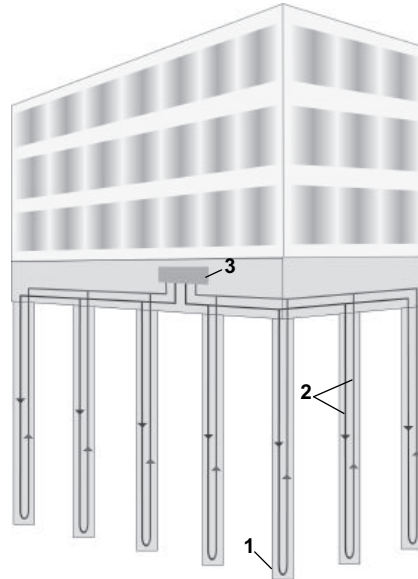


FIGURE 4.21.: Bâtiment fondé sur pieux énergétiques (Joliquin, 2002)

1. Pieux énergétiques
2. Échangeurs de chaleur
3. Pompe à chaleur

La construction d'ouvrages souterrains offre des possibilités d'utilisation conjointe de l'énergie géothermique et de l'espace par le développement de géostructures énergétiques. Les ouvrages souterrains peuvent être équipés d'échangeurs thermiques reliés à une pompe à chaleur (figure 4.21). Les développements principaux de géostructures énergétiques ont eu lieu dans l'équipement de fondations sur pieux. Par exemple, le terminal Midfield de l'aéroport de Zürich a été construit sur une forêt de 440 pieux de 30 m de longueur. 306 pieux ont été équipés d'échangeurs de chaleur. Le système permet de fournir l'ensemble des besoins de chauffage et de refroidissement du terminal de manière plus économique qu'un système conventionnel (Pahud et Hubbuch, 2007).

Il est également possible d'équiper des parois moulées, des radiers ou des voussoirs en échangeurs de chaleurs. Ce type de développement est encore rare. La ligne U2 du métro de Vienne a notamment été équipée lors de son prolongement récent. Une capacité de chauffage de 449 kW et une capacité de refroidissement de 231 kW ont été installés. Ceci permet d'assurer les besoins thermiques des stations et des galeries marchandes, de prévenir les effets du gel dans les tunnels et de distribuer une partie de l'énergie à des tiers (Unterberger *et al.*, 2005) (figure 4.22).



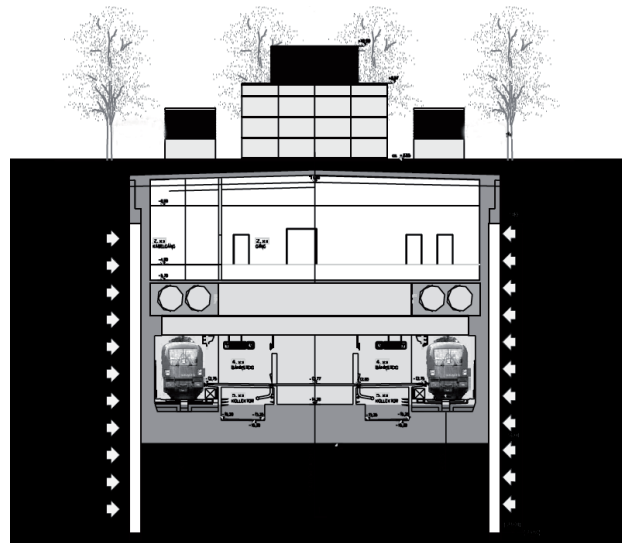


FIGURE 4.22.: Installation géothermique à la station Praterstern du métro U2, Vienne. Les parois moulées sont équipées d'échangeurs de chaleur (<http://www.enercret.com/>)

### Valorisation thermique des flux techniques

Lorsque les eaux doivent être pompées dans ou aux abords d'un ouvrage souterrain, pour des raisons techniques (par exemple infiltration d'eau), il peut être intéressant d'en exploiter le flux thermique à l'aide d'une pompe à chaleur. Dans le contexte suisse, un flux de 50 à 200  $l/min$  d'eau permettrait par exemple d'extraire de 10 à 60 KW (en refroidissant les eaux de 3°C au plus), soit les besoins de chauffage d'un bâtiment de 200 à 1'000  $m^2$  de plancher.

#### 4.2.2.2. Impacts des usages de la géothermie sur ceux de l'espace

##### Conflit d'espace

L'emprise spatiale des ouvrages d'exploitation de la géothermie peut entrer en conflit avec les autres usages de l'espace. La plupart des installations ont une emprise relativement restreinte, cependant lorsque des champs de sonde géothermiques sont dimensionnés, il n'est plus possible de construire d'autres ouvrages souterrains dans ces régions (par exemple un métro, figure 4.23).

##### Modification thermomécanique

L'utilisation de l'énergie géothermique dans des structures porteuses peut avoir un effet de modification des conditions mécaniques par sollicitation thermique. Une étude menée par Laloui *et al.* (2003) a montré que la variation de température pouvait avoir comme effet le soulèvement du pieu, la mobilisation du frottement latéral par son déplacement

relatif et un effort supplémentaire par dilatation empêchée. Les auteurs concluent toutefois que ces contraintes peuvent être prises en compte lors du dimensionnement de tels ouvrages. Lors des essais, l'intégrité du pieu testé, volontairement surdimensionné, n'a jamais été affectée (figure 4.23).

Pour les autres géostructures énergétiques, des risques sont également liés au réchauffement du sous-sol (geocooling) dans la zone non saturée et à l'abaissement de la teneur en eau par évaporation. Les pieux sont peu affectés, car ils sont généralement dans la zone saturée. Les risques sont (GEOLEP in SIA, 2005) :

- Parois dans le sol : décollement du terrain contre la paroi, fissure de dessiccation dans le sol et le sous-sol.
- Radier : tassements différentiels et fissuration.

### Gel du terrain

En cas de surexploitation thermique, le terrain peut être refroidi en dessous de 0°C. Les fondations géothermiques (ou les fondations touchées par le gel des terrains) peuvent subir des déformations qui entraînent leur rupture (figure 4.23) (SIA, 2005).

### Impact des prélèvements

Dans le cas des systèmes ouverts, on peut craindre des impacts, liés à l'exploitation de l'eau souterraine sur l'espace. L'eau étant normalement réinjectée dans le même aquifère, ces impacts sont modérés. Par ailleurs, il convient de s'assurer que le prélèvement géothermique n'induit pas une baisse de qualité de l'eau (figure 4.23).

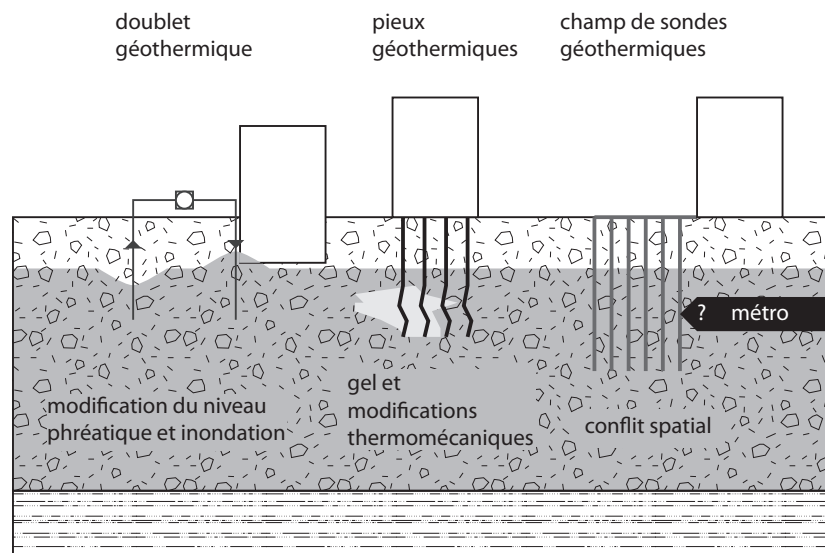


FIGURE 4.23.: Principaux impacts de l'usage de la géothermie sur l'usage de l'espace

### 4.2.3. Interactions espace-géomatériaux

#### 4.2.3.1. Impacts des usages de l'espace sur ceux des géomatériaux

##### Valorisation des géomatériaux ou élimination des matériaux d'excavation

Lors des constructions souterraines, les matériaux d'excavation doivent être gérés, par revalorisation (matériaux de construction ou remblais) ou par leur mise en décharge<sup>7</sup> (après un éventuel traitement). Les conditions géologiques et l'éventuelle présence de polluants dictent les conditions de cette gestion. Six situations peuvent être distinguées, de la plus favorable à la plus défavorable (figure 4.24) :

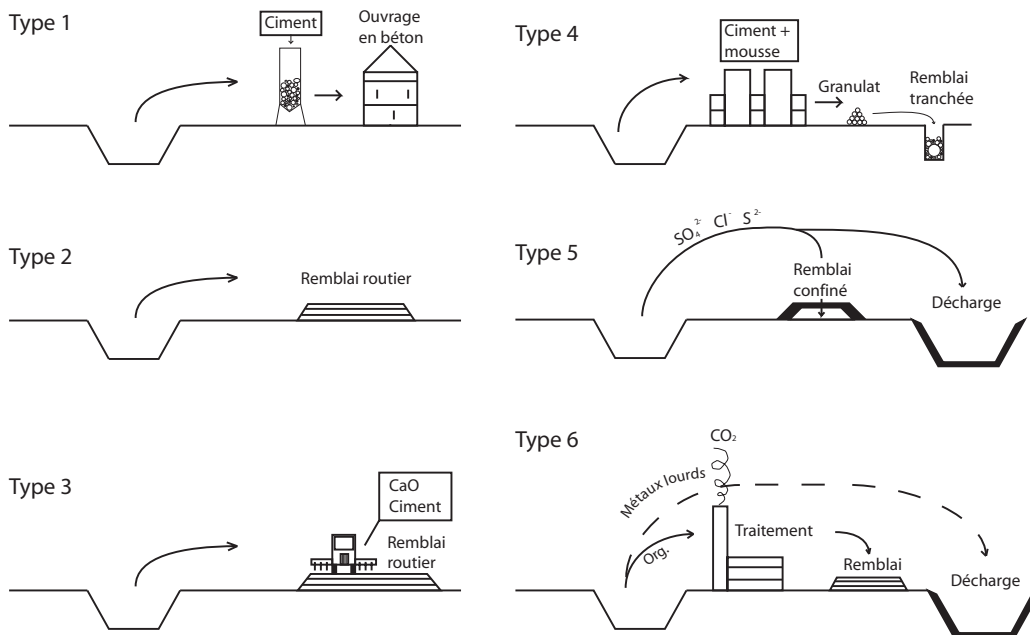


FIGURE 4.24.: Mode de valorisation possibles des géomatériaux

- Type 1 : Matériaux nobles pouvant être utilisés avec ou sans lavage et tamisage dans l'industrie des géomatériaux : alluvions et débris de roches dures pour les granulats, blocs pour la construction en pierre et la protection contre l'érosion, gypse pur dans l'industrie du plâtre, marnes et calcaires dans l'industrie du ciment.
- Type 2 : Matériaux qui peuvent être réutilisés sans traitement comme remblais : sols et débris de roches avec une faible teneur en eau et en argiles.
- Type 3 : Matériaux qui peuvent être réutilisés après traitement sur site ou hors site de construction, essentiellement pour des remblais. Traitement à la chaux et au ciment des matériaux à forte teneur en eau.
- Type 4 : Matériaux avec une très forte teneur en eau nécessitant un traitement en usine pour être transformés en granulats artificiels (boues minérales).

7. Dans ce travail, le terme décharge est utilisé indistinctement pour décrire les dépôts définitifs, les remises en culture et les décharges.

- Type 5 : Matériaux pouvant polluer l'environnement pour des raisons géogènes. Ils peuvent être utilisés en remblais confinés ou doivent être éliminés en décharges contrôlées (gypse, anhydrite, roches salines, roches riches en sulfates).
- Type 6 : Matériaux pouvant polluer l'environnement pour des raisons anthropiques. Ils doivent être traités avant leur réutilisation ou mis en décharge.

#### **4.2.3.2. Impacts des usages des géomatériaux sur ceux de l'espace**

##### **Coordination extractions-constructions**

En règle générale, il n'y a pas d'excavation de géomatériaux en milieu urbain, sinon pour la construction. Cependant, il peut arriver que des terrains exploités en gravière ou carrière soient amenés à être urbanisés. Dans ce cas, les excavations réalisées peuvent offrir des opportunités de développement de l'espace souterrain à faible coût. Ainsi, dans le canton de Genève, un projet de développement territorial est en cours en 2008 : le PACA Bernex . Il touche un périmètre inscrit au plan directeur des gravières. La coordination entre des contraintes et opportunités offertes par l'exploitation des graviers et le développement urbain a été inscrite dans le cahier des charges du projet d'urbanisme. Dans plusieurs villes, d'anciennes carrières souterraines ont été réutilisées pour diverses fonctions (par exemple la culture des champignons ou comme lieu de sépulture (catacombes) à Paris : Clément, 2001).

#### **4.2.4. Interactions eau souterraine-géothermie**

##### **4.2.4.1. Impacts des usages de l'eau souterraine sur ceux de la géothermie**

##### **Dessaturation des terrains**

Les terrains meubles saturés ont une conductivité thermique supérieure aux mêmes terrains non saturés. Aussi, un abaissement de la nappe phréatique par pompage peut provoquer une diminution du rendement des sondes géothermiques et des géostructures énergétiques (figure 4.25). Si ces modifications sont temporaires (par exemple dans le cas d'un chantier maintenu hors de l'eau par pompage), les impacts le sont en général aussi. Il est toutefois important de les planifier et de les suivre pour éviter une surexploitation de l'installation ; celle-ci pourrait entraîner le gel et la détérioration des sondes géothermiques. Si les modifications du niveau phréatique ont lieu dans le long terme, les performances du système sont réduites de manière permanente. Il est alors possible que les rendements des ouvrages ne répondent plus aux besoins.

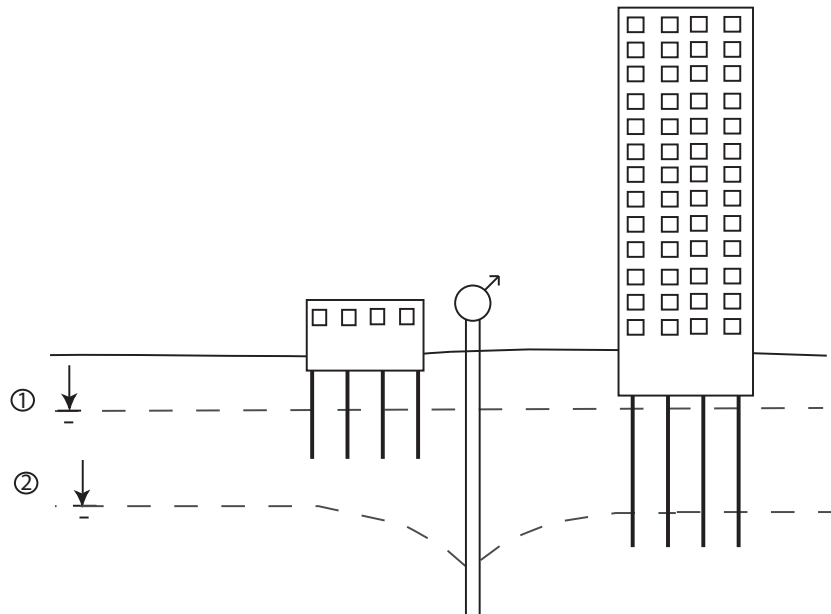


FIGURE 4.25.: Diminution du rendement des ouvrages géothermiques par abaissement de la nappe

Au temps (1) les géostructures énergétiques sont partiellement dans la zone saturée, la conductivité thermique pour des graviers saturés est de  $2 W/m.K$ . Au temps (2) en raison d'un rabattement de la nappe par pompage, les sondes sont entièrement dans la zone non saturée, la conductivité thermique est de  $0,4 W/m.K$ .

#### 4.2.4.2. Impacts des usages de la géothermie sur ceux de l'eau souterraine

Les ouvrages géothermiques entrent en conflit avec les ressources en eau souterraine de manière analogue aux ouvrages linéaires verticaux. Ils peuvent ainsi provoquer :

- La mise en relation de nappes superposées par court-circuit
- Un effet barrage à l'écoulement des eaux (principalement pour les champs de sondes).
- L'infiltration d'eau de ruissellement par percement des couches étanches. En cas de gel des terrains à cause de l'exploitation géothermique, les impacts causés par le gel sur les terrains entourant l'installation peuvent augmenter sensiblement cet effet.

Les ouvrages ouverts peuvent également entrer en concurrence hydrogéologique avec les captages d'eau potable. Toutefois, cet impact est faible lorsque les eaux sont réinjectées dans la nappe.

Les ouvrages géothermiques présentent également certains impacts spécifiques liés au transport de chaleur ou à la présence de liquide pouvant polluer les eaux :

- Les systèmes fermés peuvent, lors d'une rupture, perdre leur fluide caloporteur. Graf et Parriaux (1996) ont montré que ce risque était faible. Cependant, pour le réduire et pour assurer l'intégrité des systèmes, il convient d'éviter les zones de glissement de terrain ainsi que les roches gonflantes pour l'installation de ces systèmes.
- L'activité biologique est réduite par le refroidissement des sols. Au contraire, une hausse de la température peut conduire au développement accéléré de germes pathogènes dont la croissance sera fortement soutenue par le niveau d'énergie interne de l'eau (SIA, 2005).
- La variation de température modifie les constantes d'équilibre des substances minérales dissoutes et des gaz. La dureté carbonatée aura tendance à augmenter lorsque la température baisse, en raison d'une meilleure dissolution du gaz carbonique. Au contraire, la plupart des sels minéraux seront moins solubles. Le réchauffement des eaux souterraines est à priori plus dommageable que le refroidissement. Il conduit à un entassement des pores de l'aquifère et des désagréments techniques importants. Ces effets restent encore peu documentés.

L'ensemble des impacts de l'usage de la géothermie sur les eaux souterraines est synthétisé par la figure 4.26

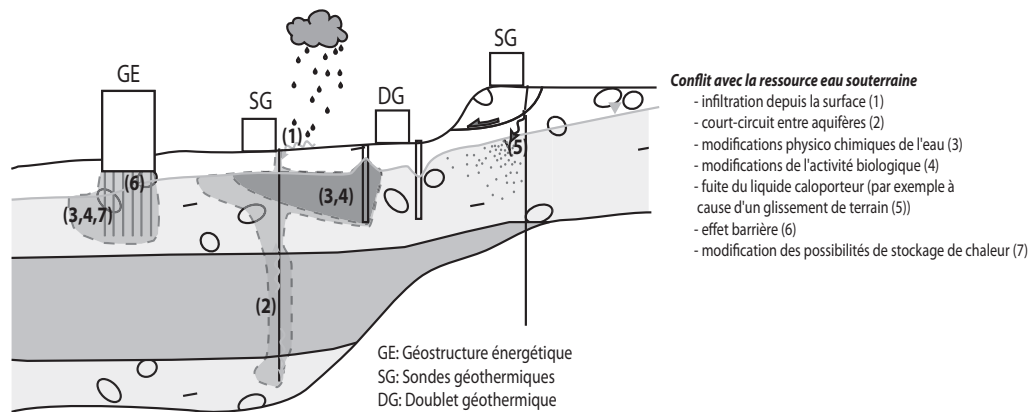


FIGURE 4.26.: Impacts de l'usage de la géothermie sur les eaux souterraines (figure : David Bréthaut, GEOLEP)

## 4.2.5. Interactions eau souterraine-géomatériaux

### 4.2.5.1. Impacts des usages des géomatériaux sur ceux de l'eau souterraine

#### Dégradation de la qualité ou de la quantité des eaux souterraines

L'exploitation des géomatériaux en milieu urbain dépend généralement de celle de l'espace. Cependant, il peut arriver que des carrières ou gravières préexistantes dans des zones urbaines nouvellement développées. Ces exploitations ont un impact sur les eaux souterraines par réduction de la couche géologique protectrice et également par effet de barrage si elles sont remblayées par des matériaux de conductivité hydraulique plus faible. Par exemple, dans la région de Rome, les carrières du bassin de Galeria Magliana ont un impact marqué sur la nappe. Ces carrières, qui se trouvent dans la périphérie industrielle de Rome, sont la principale ressource de granulats de la ville. Les matériaux ont été exploités dans la nappe, avec pour conséquence un drainage par la mise en connexion de deux nappes superposées et un effet barrage par la mise en place de matériaux peu perméables. Au bilan, la perte de volume du réservoir aquifère est estimée à 500 millions de  $m^3$  (Capelli *et al.*, 1999).

## 4.2.6. Interactions entre les usages de l'espace

### Gestion de l'espace

Les usages de l'espace peuvent entrer en conflit en souterrain comme en surface. En l'absence de gestion coordonnée, ils peuvent aboutir à une congestion, principalement des volumes les plus proches de la surface. Un projet d'urbanisme pour le souterrain permettrait de développer des formes plus cohérentes d'usage du sous-sol. Les études de cas du chapitre 3 mettent en évidence les problèmes de congestion pour les villes qui n'ont

pas bénéficié d'une vue d'ensemble (par exemple Paris et Tokyo). Elles montrent aussi certaines expériences de construction d'une *ville souterraine*, essentiellement organisée autour d'un urbanisme de réseau (par exemple Montréal).

### **Subsidence**

La construction d'ouvrages souterrains peut modifier les conditions géotechniques dans le sous-sol et la stabilité des ouvrages. En particulier lorsque des pompages sont mis en œuvre pour la construction ou le maintien fonctionnel des ouvrages, des problèmes de subsidence doivent être considérés.

#### **4.2.7. Interactions entre les usages de l'eau souterraine**

Lorsque les prélèvements d'eau potable sont proches les uns des autres, ils peuvent entrer en concurrence hydrogéologique. Cette concurrence est particulièrement critique en cas de surexploitation de l'aquifère (exploitation dans le long terme d'un débit supérieur au flux de recharge).

#### **4.2.8. Interactions entre les usages de la géothermie**

De manière analogue à la concurrence hydrogéologique, les exploitations de l'énergie du sous-sol peuvent interférer. Les plumes de chaud ou de froid d'un ouvrage peuvent avoir un impact sur un autre et modifier les conditions de potentiels et donc le rendement. Cette interaction est particulièrement forte pour les systèmes ouverts. En effet, pour ces systèmes, les plumes thermiques ont une taille importante en raison du transport thermique par advection. Les ouvrages situés en amont de l'écoulement réduisent le flux thermique en aval. Ce phénomène a par exemple été montré par modélisation numérique par Tacher (1999). Il met en évidence que les plumes de froids des systèmes ouverts peuvent s'étendre sur plusieurs centaines de mètres (l'étendue étant définie par une différence de 0,1°C avec la température naturelle). Les ouvrages fermés interagissent sur des distances moindres. Signorelli (2004) a montré que des ouvrages situés à moins de 5 m de distance entrent en conflit de manière forte, qu'à 7,5 m de distance, le rendement est diminué d'environ 30 % alors qu'à partir de 15 m, il n'y a pas d'influence. Ces interactions peuvent devenir critiques dans les champs de sondes géothermiques.

Par ailleurs, en dehors de l'interaction entre les ouvrages, une surexploitation générale du flux renouvelable de chaleur est possible. Dans les conditions usuelles d'utilisation (exploitation saisonnière), les simulations réalisées par Signorelli (2004) montrent que les conditions de température convergent vers un état d'équilibre, y compris dans des champs de sondes espacées de 7,5 m et plus. Ce phénomène pourrait s'avérer plus marqué pour les systèmes ouverts où l'essentiel de la chaleur est transporté par advection. Le couplage chauffage-climatisation permet d'assurer une gestion saisonnière de ce stock de chaleur : du froid est injecté dans le sous-sol en hiver, du chaud en été.



### 4.3. Perspectives offertes par les outils de l'analyse systémique

Les outils de la dynamique des systèmes ont été présentés au chapitre 4.1.2.2. Leur utilisation est illustrée dans ce chapitre pour analyser les interactions entre les ressources en espace et les ressources en eau souterraine dans une ville dont la nappe phréatique évolue selon le modèle de la figure 4.17. Un exemple théorique est construit. Les hypothèses sont volontairement simplifiées par rapport à la réalité pour faciliter la compréhension de la dynamique du système. Aussi, un nombre limité de facteurs agit sur le système (dans la réalité, les pompages, les nombres d'ouvrages et les facteurs de pollutions sont multiples et agissent conjointement). Cet exemple a fait l'objet d'une publication dans les actes de la conférence de l'ACUUS<sup>8</sup> *Underground Space : expanding the Frontiers* (Blunier *et al.*, 2007).

#### 4.3.1. Description du cas

L'exemple théorique représente le cas d'une ville construite sur un aquifère. Au début de l'urbanisation, l'aquifère est exploité pour l'eau potable. L'exploitation provoque un abaissement du niveau phréatique. Un tunnel est construit non étanche et entraîne la pollution de l'eau souterraine par infiltration de polluants. Cette pollution entraîne une diminution graduelle des prélèvements d'eau potable et une remontée de la nappe. Lorsque la nappe atteint l'ouvrage, elle est pompée et évacuée hors du système pour maintenir le tunnel en exploitation. Les caractéristiques du cas d'étude sont les suivantes (figure 4.27) :

- Le système aquifère est homogène : il est assimilé à un réservoir dont le niveau phréatique varie de manière homogène.
- À l'état naturel, l'aquifère est rempli et la concentration de polluants est nulle.
- La recharge de l'aquifère est constante et égale à  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Le débit de sortie de l'aquifère (flux aux épontes) dépend du stock d'eau dans l'aquifère. Il est égal à la recharge lorsque l'aquifère est rempli et égal à 0 lorsqu'il est vide.
- L'urbanisation débute en 1910.
- De 1910 à 1950, le pompage pour l'eau potable augmente linéairement de 0 à  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Il est ensuite stable tant que l'aquifère n'est pas pollué.
- En 1970, le tunnel est construit 20 m sous le niveau naturel de la nappe.
- Le tunnel provoque une pollution, le flux de polluants est dilué de manière homogène dans la nappe. Il n'y a pas de dégradation chimique ou biologique des polluants.
- La consommation d'eau par pompage diminue de manière inversement proportionnelle à la concentration de polluants dans l'aquifère. Si la concentration est nulle, le pompage est maximal ( $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ ); si la concentration est égale ou supérieure à  $60 \text{ mg/l}$  le pompage est nul.
- Si le niveau phréatique atteint la cote du tunnel, l'eau est pompée dans ce dernier pour en maintenir le niveau phréatique sous le tunnel.
- Le système est étudié entre 1900 et 2000.

---

8. Associated Research Centers for the Underground Urban Space

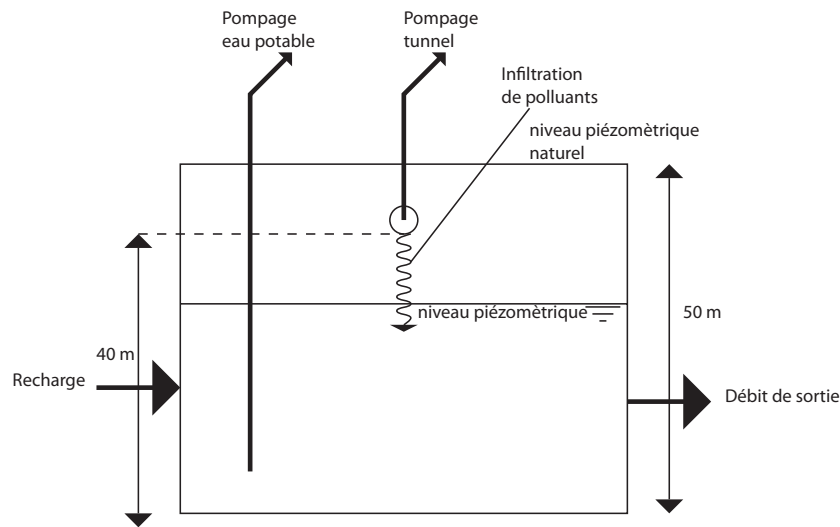


FIGURE 4.27.: Représentation schématique du cas d'étude

#### 4.3.2. Modèle causal

La structure du modèle est étudiée pour les quatre phases successives suivantes (figure 4.28)

- Phase 1, 1900-1910 : aquifère à l'état naturel.
- Phase 2, 1910-1970 : aquifère exploité pour l'eau potable.
- Phase 3, 1970-début du pompage dans le tunnel (soit le moment où la nappe atteint la cote du tunnel) : aquifère exploité et début de la contamination.
- Phase 4, à partir du début des pompages dans le tunnel : l'eau est pompée dans le tunnel et l'exploitation pour l'eau potable réduite.

Pendant la phase 1, le modèle est composé d'une boucle de rétroaction négative B1 et est soumis à un facteur de pression à ses limites : la recharge.

Pendant la phase 2, le pompage est une pression aux limites du système, la structure du système n'est pas modifiée.

Pendant la phase 3, la construction du tunnel entraîne des modifications structurales dans le système. L'infiltration de polluants est une nouvelle pression aux limites. Le système comporte trois boucles de rétroaction. La rétroaction négative qui assure le fonctionnement de l'aquifère (identique à celle de la phase 1 et 2 : B1). Une boucle de rétroaction positive : *polluants dans l'aquifère - pompage eau potable - export de polluants*, B2. Cette boucle est comprise dans une autre boucle de rétroaction négative : *polluants dans l'aquifère - pompage eau potable - niveau piézométrique - écoulement de sortie - export de polluants*, B3.

Pendant la phase 4, le début des pompages dans le tunnel implique de nouvelles modifications structurales. Il comporte cinq boucles, les trois boucles de la phase 3 et deux nouvelles boucles de rétroaction négative :

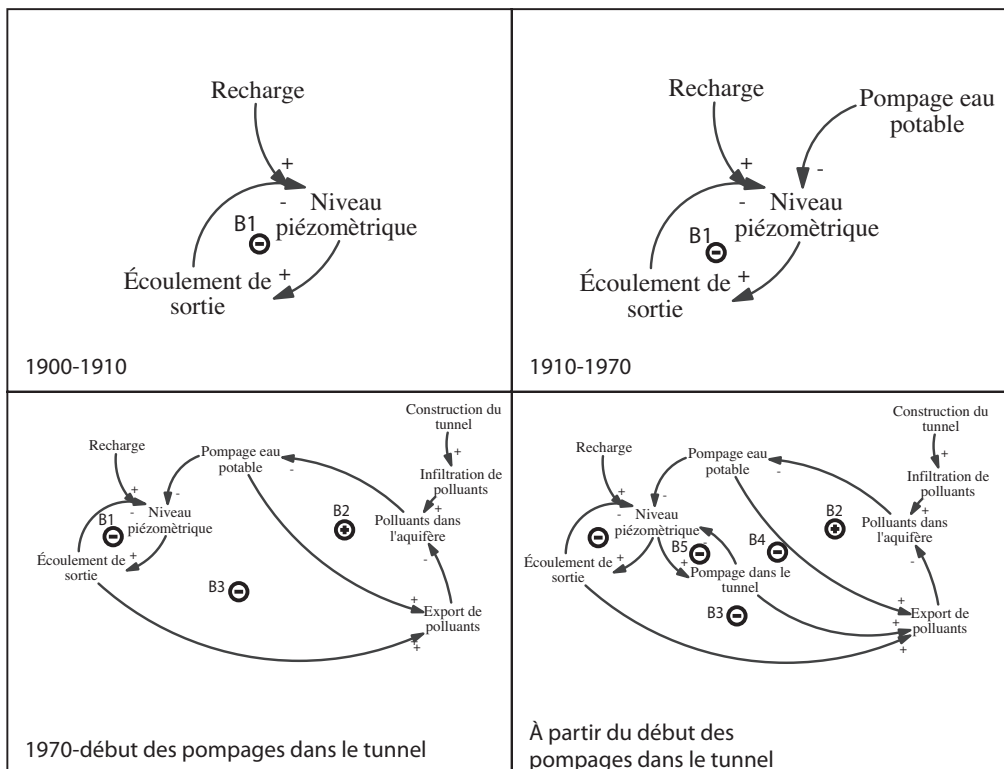


FIGURE 4.28.: Modèle causal du système

- B4 *polluants dans l'aquifère - pompage eau potable - niveau piézométrique - pompage dans le tunnel - export de polluants*
- B5 *pompage dans le tunnel - niveau piézométrique*

### 4.3.3. Modèle stocks et flux

Le modèle de stocks et de flux est construit à partir du modèle causal complet (phase 4) (figure 4.29).

Deux stocks sont identifiés : la quantité d'eau dans l'aquifère et la quantité de polluants. Le stock d'eau est gouverné par quatre flux venant ou allant vers les limites du système : la recharge, le débit de sortie, le pompage d'eau potable et le pompage dans le tunnel. Le stock de polluants est gouverné par deux flux : les polluants infiltrés depuis le tunnel et les exports de polluants. Les stocks et les flux sont reliés par deux convertisseurs : le niveau phréatique qui est un indicateur du stock d'eau, et la concentration de polluants, un indicateur du stock de polluants.

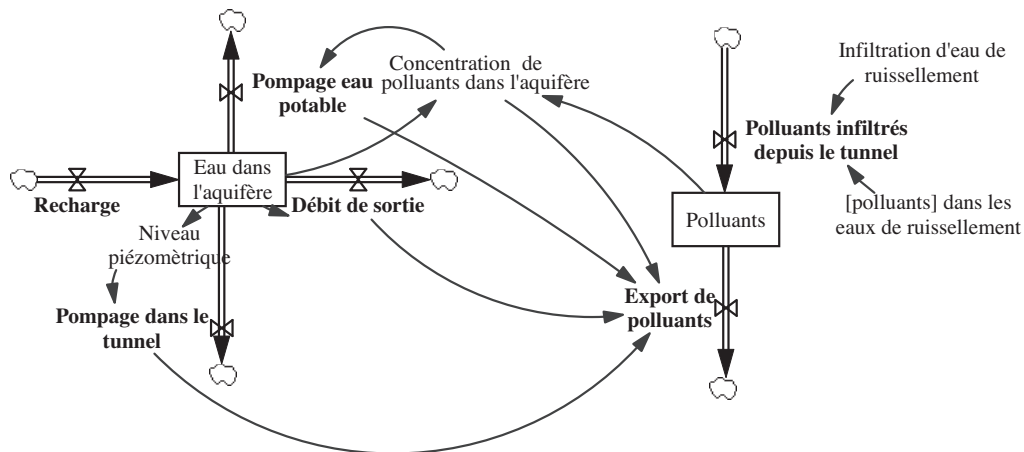


FIGURE 4.29.: Modèle de stocks et flux du système

### 4.3.4. Simulation et discussion

Le modèle de stock et de flux est implémenté dans l'outil de modélisation de dynamique des systèmes Vensim. Une simulation de la dynamique du système est réalisée entre 1900 et 2000. Les résultats pour les principaux paramètres sont présentés à la figure 4.30.

De 1900 à 1910, le modèle est stable, l'ensemble des indicateurs est constant ; en effet, il n'y a pas de facteur de pression aux limites du système (la recharge étant une constante). De 1910 à 1970, le système subit une pression due à l'augmentation du pompage d'eau potable. Cette pression engendre une variation du niveau dans l'aquifère, qui est amortie par la boucle de rétroaction négative B1. Il tend vers un nouvel équilibre dans les années

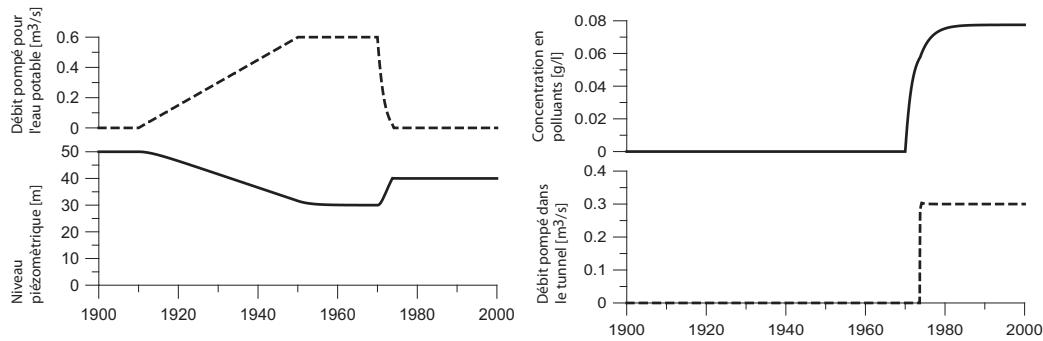


FIGURE 4.30.: Résultats de simulation : Évolution du niveau piézométrique, du débit pompé pour l'eau potable, de la concentration de polluants dans l'aquifère et du débit pompé dans le tunnel

1950-1960 environ. À partir de 1970 (construction du tunnel), l'augmentation de la concentration de polluants dans l'aquifère est rapide, elle est toutefois amortie par les boucles B3, puis B4 et B5 qui ont toutes trois un effet similaire : l'augmentation de la concentration de polluants entraîne une augmentation des exports d'eau du système, donc un export de polluants. Quand la pollution commence à augmenter, le système subit toutefois une amplification liée à la réduction des prélèvements pour l'eau potable (boucle de rétroaction positive B2), ceci se traduit par une augmentation rapide de la concentration de polluants, puis une inflexion de cette augmentation. Le système retrouve un nouvel état d'équilibre à partir de 1980 environ où seul subsiste le pompage dans le tunnel.

Les variations du système étudié sont ainsi sensiblement amorties par les rétroactions négatives qui expliquent les états d'équilibre observés. Les variations de conditions aux limites du système (nouveau pompage, nouvelle construction) entraînent une évolution du système se manifestant par des modifications structurales. La compréhension de ces phénomènes d'évolution est particulièrement importante. En effet, dans le système étudié, elles ont pour conséquence : l'abandon graduel des pompages pour l'eau potable et le besoin de mettre en œuvre des pompages dans le tunnel. Ces pompages ont un coût environnemental et économique sans bénéfice, l'eau polluée ne pouvant être utilisée pour les besoins de la ville.

Une telle approche met en évidence la nécessité de comprendre les interactions entre les usages du sous-sol et les modifications qu'elles peuvent entraîner sur le système sous-sol. Le modèle causal est un outil efficace de conceptualisation pour la compréhension du système. Fondée sur l'analyse des interactions développée au chapitre 4.2, il permet de développer une compréhension de la dynamique du sous-sol urbain et de ses exploitations ainsi que des modifications structurales impliquées par les interventions qui y sont menées. La modélisation de stocks et de flux permet d'évaluer de manière plus quantitative cette dynamique, elle peut être utilisée comme préalable ou en complément à l'utilisation d'outils de modélisation numérique mieux adaptés à tenir compte de la nature hétérogène du sous-sol (par exemple les modèles à éléments finis qui sont très utilisés en hydrogéologie).

#### 4.4. Synthèse du chapitre

Les interactions entre les usages du sous-sol urbain jouent un rôle déterminant pour développer une stratégie de gestion durable. Elles ont été décrites selon une systématique dérivée de la matrice structurale de Le Moigne. La table 4.10 en présente la synthèse. Elles ont été illustrées par de nombreux cas issus de la littérature scientifique et technique. 41 types d'interactions (35 conflits et 6 synergies) ont été identifiés et documentés. Certaines peuvent être gérées par des choix de dimensionnement à l'échelle du projet (par exemple la subsidence liée à la construction d'un nouveau bâtiment). Toutefois, la plupart ont des conséquences à large échelle sur la plupart des usages du sous-sol. En particulier, les interactions impliquant la ressource en eau provoquent de tels impacts. En effet, le milieu hydrogéologique étant continu, il contribue à transférer les pressions locales à leur environnement. De plus, la multiplication des interventions tend à augmenter l'intensité des conflits. Par exemple, si l'effet barrage d'un bâtiment implanté sur une nappe a un impact relativement localisé autour de ce bâtiment, la multiplication des ouvrages dans la zone saturée d'un aquifère peut modifier fortement l'ensemble du bilan hydrogéologique et perturber les fonctions d'échanges entre l'aquifère et son environnement. Pour cette raison, une prise en compte de ces interactions avec des outils de gestion portant sur une échelle plus large que celle du projet apparaît indispensable pour assurer le développement durable des ressources du sous-sol urbain.

La représentation matricielle met en évidence le fait que de nombreuses interactions sont liées par des relations de rétroaction (par exemple, les impacts polluifs des constructions peuvent avoir un impact sur la gestion des eaux qui, elle-même, entrainera des problèmes d'infiltration dans les ouvrages). Aussi, l'approche du sous-sol urbain comme un système apparaît particulièrement pertinente. Une analyse plus formelle sur le plan de la systémique permet de mieux comprendre la dynamique du système sous-sol et d'anticiper les conséquences des interventions. Un cas d'étude théorique a été présenté dans ce sens, il ouvre des perspectives pour une application à des situations plus concrètes.

TABLE 4.10.: Synthèse des interactions entre les usages du sous-sol urbain  
 Les signes + indiquent les synergies d'usage, les signe - les conflits.  
 L'agent impacté désigne l'usage qui est modifiée par les effets d'un autre usage :  
 l'agent impactant

AGENT IMPACTÉ		Espace	Eau Souterraine	Géothermie	Géomatériaux
AGENT IMPACTANT	Espace	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Conflit d'espace</li> <li>-Subsidence</li> <li>+Mise en réseau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concurrence hydrogéologique</li> <li>-Effet barrage</li> <li>-Pollution des eaux<sup>1</sup></li> <li>-Court-circuits entre aquifères souterrains</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+Géosstructures énergétiques</li> <li>+Valorisation thermique des flux techniques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Élimination des matériaux d'excavation</li> <li>+Valorisation des géomatériaux</li> </ul>
	Eau Souterraine	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Infiltration dans les ouvrages</li> <li>-Poussée d'archimède</li> <li>-Subsidence et soulèvement</li> <li>-Corrosion et détérioration des ouvrages</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concurrence hydrogéologique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Dessaturation des terrains</li> </ul>	
	Géothermie	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Conflit d'espace</li> <li>-Modifications thermo-mécaniques</li> <li>-Gel du terrain</li> <li>-Impact des prélèvements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Concurrence hydrogéologique</li> <li>-Effet barrage</li> <li>-Pollution des eaux<sup>1</sup></li> <li>-Modifications de l'activité biologique</li> <li>-Modification des paramètres physico-chimiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Interaction des plumes de froid ou de chaud</li> <li>-Surexploitation du flux thermique</li> </ul>	
	Géomatériaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>+Coordination extractions-constructions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Modifications du bilan hydrogéologique</li> <li>-Effet barrage</li> <li>-Court-circuits entre aquifères</li> <li>-Pollution des eaux<sup>1</sup></li> </ul>		

<sup>1</sup>-Pollution des eaux = infiltration d'eau de ruissellement, pollution par les matériaux d'injection, mobilisation de polluants, fuite de liquide caloporteur





## Chapitre 5

# *Concepts pour l'intégration du sous-sol dans l'aménagement du territoire*

Les chapitres 3 et 4 ont mis en évidence le besoin d'appréhender la gestion du sous-sol à une échelle qui dépasse celle du projet. La multiplication des usages et les conflits et synergies qui y sont reliés, nécessitent de développer une vision territoriale du développement des ressources souterraines.

Dans ce chapitre, les pratiques d'aménagement du territoire sont analysées dans le contexte suisse. Le rôle actuel ou potentiel des ressources du sous-sol dans ces pratiques est considéré avec attention. Finalement, une démarche pour mettre en œuvre une approche coordonnée de développement des ressources du sous-sol est esquissée. La mise en pratique de cette démarche est présentée aux chapitres 6 et 7.

### **5.1. Stratégies et outils d'aménagement du territoire**

L'aménagement du territoire est une discipline récente, qui vise à organiser la répartition des activités humaines sur le territoire en « conciliant durablement les intérêts de la société, de l'économie et de l'écologie » (LDTer loi en consultation). Plusieurs échelles et niveaux de planification s'interpénètrent pour créer un cadre d'action. En Suisse, la LAT<sup>1</sup> fixe les buts et principes de l'aménagement.

On distingue essentiellement trois niveaux d'action dans la planification territoriale :

- le niveau stratégique,
- le niveau réglementaire,
- le niveau opérationnel.

---

1. Au moment de la rédaction, la LAT est en cours de révision. Le projet de loi appelé à la remplacer, la LDTer est en consultation

Les actions menées au niveau stratégique permettent d'orienter le développement du territoire de la manière souhaitée. On distingue les outils ayant une portée territoriale (assurant la coordination de l'ensemble des activités) de ceux ayant une portée sectorielle (portant sur un thème précis, par exemple les transports publics, l'énergie, l'agriculture). Ces outils sont contraignants pour les autorités.

En Suisse, les principaux outils stratégiques de portée territoriale sont les plans directeurs cantonaux. Ils sont établis à l'échelle du canton par les autorités locales et sont approuvés par la Confédération. « Ils désignent les parties du territoire qui se prêtent à l'agriculture, se distinguent par leur beauté ou leur valeur (...) ou qui sont gravement menacées par des forces naturelles ou des nuisances. [Par ailleurs,] ils définissent l'état et le développement souhaités de l'urbanisation, des transports et communications, de l'approvisionnement ainsi que des constructions et installations publiques » (LAT art. 6). La planification directrice cantonale a donc une portée spatiale (coordination des activités), mais aussi temporelle (ordre dans lequel les activités sont envisagées). Les plans directeurs cantonaux sont réexaminés intégralement tous les dix ans et, au besoin, remaniés (LAT art. 8). D'autres planifications stratégiques peuvent être mises en œuvre à l'échelle de la commune voire à une échelle plus fine (en particulier, les planifications de périmètres stratégiques de développement ou de rénovation : nouveau quartier, transformation de friche industrielle, etc.). Depuis 2006, un outil stratégique national : le *projet de territoire suisse*, est en cours d'élaboration. La LDTer, si elle est acceptée, lui donnera une valeur légale.

Les actions stratégiques sectorielles fixées par la LAT concernent les tâches dont la compétence appartient à la Confédération. En 2009, il y avait six plans sectoriels et deux conceptions, élaborées ou en cours, portant sur le paysage, les transports et les infrastructures.

Les outils réglementaires définissent précisément les modes d'utilisation de l'espace. Ils sont contraignants pour les propriétaires fonciers. Les principaux outils réglementaires en Suisse sont les plans d'affectation. Ils séparent les zones à bâtir des zones de non-bâtir et définissent les droits des propriétaires quant à l'utilisation du sol. Ils règlent par ailleurs la mesure de l'utilisation du sol et le degré de sensibilité au bruit. L'affectation est liée à des plans réglementaires répondant à des besoins sectoriels, tels que le plan de délimitation des forêts, les zones et secteurs de protection des eaux ou les plans généraux d'évacuation des eaux. L'utilisation du sol peut être précisée localement par des plans d'affectation de détail (plans de quartier, plans d'alignements, etc.).

Les outils opérationnels sont les outils de mise en œuvre des politiques, stratégies et règlements d'aménagement du territoire. Pour l'essentiel, il s'agit des procédures d'autorisation liées aux usages et aux modifications du territoire (par exemple les autorisations de construire). Dans ce travail, ces outils ne font pas l'objet d'une analyse approfondie.

L'aménagement du territoire incombe en premier lieu aux cantons, la Confédération ayant pour mission d'en édicter les principes (art. 75 de la constitution). L'affectation est généralement réalisée par les communes (ce point est précisé par les lois cantonales). L'autorité cantonale doit accepter les plans. Globalement, les autorités de niveau supérieur fixent les grandes lignes et principes alors que les autorités locales assurent la

mise en œuvre des mesures d'aménagement. Les plans et outils adoptés par les autorités de niveau supérieur sont prioritaires sur ceux des niveaux inférieurs et il existe une coordination entre les niveaux, le niveau supérieur étant l'autorité d'acceptation des niveaux inférieurs. Cette répartition des tâches tend toutefois à être modifiée. En effet, les limites administratives des collectivités territoriales ne correspondent pas toujours aux limites fonctionnelles du territoire. Aussi, de plus en plus de projets sont formalisés à des échelles transversales et concernent des espaces fonctionnels. La nouvelle LDTer apportera une base légale pour deux instruments : les projets d'agglomération et les planifications des espaces fonctionnels ruraux. Les projets d'agglomération sont en cours d'élaboration depuis 2002. Ils permettent l'octroi de subventions fédérales pour le financement des infrastructures.

Les principaux outils d'aménagement du territoire stratégiques et réglementaires mis en œuvre en Suisse sont récapitulés par la figure 5.1.

		Niveau stratégique		Niveau réglementaire
		Objectifs sectoriels	Développement territorial	
Confédération	Agglomération Espace fonctionnel rural	<b>Conception</b> (p.ex. conception paysage suisse) <b>Plan sectoriel</b> (p.ex. dépôts en couches géologiques profondes)	<i>Projet de territoire Suisse</i>	
Canton		Plan directeur sectoriel (p.ex. chemins piétons)	<b>Plan directeur cantonal</b>	<b>(Plan d'affectation)</b>
Commune			Plan directeur communal	<b>Plan d'affectation</b> Règlement de construction
Quartier			masterplan / périmètre d'urbanisme Plan directeur de quartier	Plan d'affectation de détail

**Outils définis par la Loi sur l'Aménagement du Territoire**  
*Outils complémentaires définis dans la Loi sur le Développement Territorial*

FIGURE 5.1.: Principaux outils d'aménagement du territoire et échelle de réalisation

## 5.2. Enjeux pour les ressources du sous-sol

### 5.2.1. Plans et outils de portée générale

Actuellement, les deux principaux plans d'aménagement du territoire en Suisse sont les plans directeurs cantonaux et les plans d'affectation. Ni les uns, ni les autres ne tiennent

réellement compte du sous-sol. En effet, force est de constater que l'aménagement du territoire est souvent conditionné à une vision bidimensionnelle de l'espace. Les gabarits fixés dans certaines zones bâties sont une exception, mais ils réglementent l'espace en hauteur et non en profondeur.

Plusieurs plans ont été analysés et la seule mention faite au souterrain est dans certains plans d'affectation de détail (plans de quartiers) qui fixent le nombre d'étages souterrains et leur affectation (très souvent des parkings). Les ressources du sous-sol sont toutefois considérées par certains outils sectoriels d'aménagement tels que le *plan sectoriel dépôts en couches géologiques profondes*, les *cadastres des sites pollués* (l'extension en profondeur des pollutions ne fait toutefois pas partie des documents publics), les *régales des mines* des cantons et surtout, les outils servant à la *protection des eaux* qui sont étudiés plus en détail au chapitre 5.2.2.

Les ressources du sous-sol sont pourtant de plus en plus utilisées à diverses fins, notamment pour des besoins d'intérêt public (lignes de transports, pôles d'échange, eau potable, etc.) et leur exploitation fait apparaître d'importants enjeux de coordination (en raison des interactions entre les usages du sous-sol : chapitre 4 et des risques de congestion de l'espace souterrain : chapitre 3). Aussi, il apparaît nécessaire que les outils d'aménagement de portée générale considèrent cette « dimension cachée du territoire ». Une telle prise en compte devrait être mise en avant aux deux niveaux de planification : stratégique et réglementaire. Pour cela, il est nécessaire de faire mieux connaître aux planificateurs et gestionnaires urbains le sous-sol, ses ressources et leurs potentialités.

Les plans directeurs cantonaux sont composés d'études de base, de lignes directrices et de mesures. Les premières n'apparaissent pas toujours directement dans le plan, mais sont l'outil qui permet de réaliser un état des lieux des potentialités et usages du territoire et d'en tirer les principaux enjeux desquels sont déduits les concepts et les plans d'action, comme l'ont montré Lardon et Piveteau (2005) (figure 5.2). Cette articulation étant valable pour la planification directrice cantonale, mais aussi pour les autres plans stratégiques de portée générale. Aussi, notre principale proposition est de *développer une étude de base spécifique aux ressources du sous-sol*, au niveau cantonal, mais aussi à d'autres échelles fonctionnelles, en particulier dans les planifications de périmètres urbains. Une telle étude de base, formerait un outil de diagnostic spécifique au sous-sol, qui permettrait de développer un cadre d'action stratégique tenant compte des ressources du sous-sol et de le transposer dans les outils réglementaires, par exemple en fixant des gabarits et des affectations de l'espace souterrain et en utilisant les outils de régulation de la densité (par exemple le coefficient d'utilisation du sol). Ces derniers peuvent être utilisés pour promouvoir (comme à Montréal : chapitre 3) l'utilisation du sous-sol ou pour la réguler (comme l'a proposé en France l'AFTES : chapitre 3). Enfin, la nécessité de réduire les conflits et de mettre en œuvre les synergies entre les usages des ressources du sous-sol pourrait être intégrée dans les règlements d'affectation et de construction.

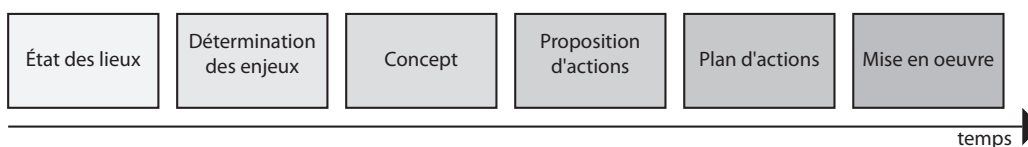


FIGURE 5.2.: Principales étapes d'un projet d'ingénierie territoriale (d'après Lardon et Piveteau, 2005)

## 5.2.2. Interactions : contexte légal en Suisse

Il a été indiqué précédemment que les politiques de protection des eaux forment un cadre partiel de prise en compte des ressources du sous-sol. Ce cadre a fait l'objet d'une évaluation détaillée (annexe C). Une attention particulière a été portée sur la considération des interactions entre les usages du sous-sol urbain. Ce chapitre en présente une synthèse et une critique. Afin de tenir compte des pratiques des professionnels, les outils normatifs, en particulier les documents de la SIA<sup>2</sup>, ont également été considérés.

### 5.2.2.1. Mesures légales d'organisation du territoire relatives aux eaux souterraines

En vue de préserver les eaux souterraines, le territoire est subdivisé en secteurs et zones de protection des eaux. Ces mesures sont réglementées par la LEaux<sup>3</sup> et l'OEaux<sup>4</sup>. Leur mise en application est décrite dans une recommandation de l'OFEV<sup>5</sup> (OFEFP jusqu'en 2005) (OFEFP, 2004). Une nouvelle recommandation vient préciser les conditions de compatibilité entre les usages de la géothermie et la protection des eaux souterraines (OFEV, 2007, en consultation). La figure 5.3 présente ces instruments. Leur mise en œuvre est de compétence cantonale.

Les mesures de protection des eaux ont pour but une protection systématique et orientée vers l'utilisation sur les plans qualitatif et quantitatif. Les mesures de protection des eaux sont les plus restrictives au plus proche des zones de captage. On trouve des instruments qui vont des plus restrictifs aux moins restrictifs :

- Zone de protection des eaux S1 (zone de captage), S2 (zone de protection rapprochée) et S3 (zone de protection éloignée) ; elles visent à protéger les captages et les eaux souterraines juste avant leur utilisation comme eau potable.
- Secteur Au de protection des eaux ; il comprend les nappes d'eau exploitables comme eau de boisson et les zones attenantes nécessaires à leur protection. Ces instruments sont inclus les uns dans les autres, c'est-à-dire que la zone S1 appartient à la zone S2 qui appartient à la zone S3 qui appartient au secteur Au.

En plus de ces instruments imbriqués, l'autorité définit :

2. Société suisse des Ingénieurs et des Architectes  
 3. Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des Eaux  
 4. Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des Eaux  
 5. Office Fédéral de l'Environnement

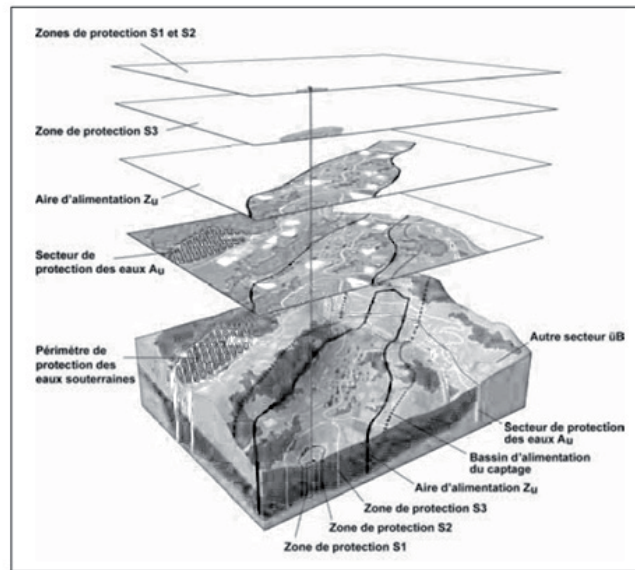


FIGURE 5.3.: Instruments d'organisation du territoire relatifs aux eaux souterraines (OFEFP, 2004)

- Les aires d'alimentation  $Z_u$ , elles visent à préserver la qualité des eaux qui alimentent des captages d'intérêt public. Elles doivent être déterminées lorsque les eaux souterraines sont polluées par des substances mobiles difficilement dégradables ou qu'une telle pollution menace.
- Les périmètres de protection des eaux souterraines, ils servent à protéger les eaux souterraines sur une certaine surface en vue d'une utilisation future. Il s'agit de futures zones S.
- Les autres secteurs de protection  $\ddot{u}B$ . Cette subdivision du territoire est laissée libre aux cantons pour la protection des eaux souterraines de leur territoire non couvertes par les secteurs Au. Ces secteurs, par exemple B, C, sont souvent l'héritage des mesures de protection qui ont précédé la LEaux de 1991<sup>6</sup>.

Ces différents outils d'aménagement du territoire ont des conséquences pour l'exploitation des ressources du sous-sol urbain (en particulier espace et géothermie). Ces conséquences sont décrites dans les deux recommandations de l'OFEV et sont reproduites en annexe C pour les usages suivants :

- ouvrages ponctuels (espace),
- ouvrages linéaires horizontaux (espace),

6. On notera qu'à Genève, le secteur B est utilisé pour marquer les nappes d'eau souterraines du domaine public pour lesquelles le contexte géologique permet de garantir une protection naturelle. Cette subdivision genevoise n'est pas en accord avec les recommandations de l'OFEV qui précisent que « le secteur Au correspondra généralement à l'ancien secteur A et, le plus souvent, à une partie de l'ancien secteur B, en particulier lorsque la distinction était justifiée par une forte épaisseur des couches de couverture ». Cette particularité genevoise permet d'autoriser des usages du sol non conformes avec le secteur Au, mais pour lesquels le contexte géologique permet d'éviter les impacts sur les eaux.

- ouvrages linéaires verticaux (espace),
- sondes géothermiques (géothermie),
- doublets géothermiques (géothermie).

Les recommandations ont été transformées en diagrammes d'aide à la décision (figures C.1, C.2, C.3, C.4 et C.5). Pour les géostructures énergétiques, les recommandations liées à l'usage de la géothermie et celles liées à l'implantation d'ouvrages linéaires verticaux doivent être suivies.

#### 5.2.2.2. Lois fédérales

Au niveau fédéral, les lois suisses (annexe C) fixent des principes et des objectifs ainsi que des valeurs cibles précises pour certaines problématiques.

Sur le plan des objectifs et principes, on peut retenir les éléments suivants :

- Les prélèvements à long terme dans une nappe souterraine doivent être inférieurs à la recharge.
- Il est interdit d'introduire directement ou indirectement des substances de nature à polluer les eaux souterraines.
- Les eaux de drainage des ouvrages souterrains doivent être captées, évacuées et traitées.
- La création de communications permanentes entre les nappes, de nature à les polluer ou à diminuer les réserves en eau est interdite.
- Il est interdit de réduire de manière notable la couverture protectrice des nappes.
- Les concentrations en polluants d'une nappe ne doivent pas augmenter de manière continue.
- La consommation énergétique et en particulier celle des bâtiments doit être rationnelle et le recours aux énergies indigènes et renouvelables (dont la géothermie) est favorisée.
- Le tri des déchets de chantier est obligatoire.
- Il existe une échelle de priorité pour la valorisation des déchets (de la priorité plus forte à la plus faible) : sur le chantier, matériaux de construction, comblement de sites d'extraction, modification de terrains, décharge.
- La restauration de la couche de couverture après l'exploitation des gravières est obligatoire.
- Par principe, il faut limiter au strict nécessaire les travaux à effectuer dans les eaux souterraines. Suivant les cas, ces dernières doivent faire l'objet d'une surveillance avant, pendant et après l'exécution des travaux.

Des valeurs cibles plus précises sont fixées pour les éléments suivants :

- État qualitatif et quantitatif des aquifères : l'état doit être aussi proche que possible de l'état naturel.
- Effet barrage : les ouvrages ne doivent pas réduire la capacité d'écoulement de plus de 10 % pour les eaux utilisées ou utilisables. Dans les secteurs de protection, l'effet barrage doit être nul.
- Concentrations limites de pollution des matériaux d'excavation : deux niveaux sont définis, les valeurs indicatives U et T, telles que si la concentration est inférieure à U, le matériau est non pollué, si elle est comprise entre U et T, il est toléré et si elle est supérieure à T, il est pollué.

- Modifications de la température moyenne des aquifères : elles ne doivent pas dépasser 3°C (en plus ou en moins) à une distance de 100 m des installations.
- Composition chimique des eaux destinées à l'eau de boisson.
- Liste de liquides caloporteurs acceptés pour les circuits géothermiques
- Dans les secteurs Au : limite les excavations de géomatériaux (pour les gravières) à 2 m au dessus du niveau maximum décennal de la nappe ou du niveau effectif des nappes réalimentées (la valeur la plus élevée).

Les tableaux de l'annexe C montrent que tous les conflits ayant un impact sur les eaux souterraines ont une base légale de protection avec des valeurs cibles plus ou moins précises. Pour les eaux utilisées et utilisables, les recommandations à appliquer aux mesures d'organisation du territoire relatives aux eaux souterraines précisent ce cadre.

Les conflits ayant un impact sur les ouvrages construits (exploitation de l'espace ou de la géothermie) ne sont pas spécifiquement pris en compte par les outils légaux fédéraux. Seules les cibles de maintien quantitatif des eaux souterraines permettent de limiter ces impacts.

Le cadre incitatif pour favoriser les synergies entre usages du souterrain reste faible. Les énergies renouvelables et la valorisation des matériaux d'excavation sont encouragées, mais il n'existe pas d'instruments spécifiques pour réaliser les synergies.

#### 5.2.2.3. Normes

Les éléments normatifs, en particulier les normes SIA liées à la construction souterraine, ont été analysés (annexe C). Ces normes fixent les principaux éléments suivants :

- Les impacts des constructions souterraines sur les eaux souterraines doivent être décrits dans les études géologiques, hydrogéologiques et l'éventuelle étude d'impact sur l'environnement.
- Des valeurs cibles de dimensionnement d'étanchéité sont fixées.
- L'analyse structurale des ouvrages doit prendre en compte des états limites et des situations transitoires. Toutefois, une modification importante des niveaux phréatiques (par exemple rebond de la nappe) n'est pas explicitement citée.
- Les risques de corrosion des infrastructures doivent être pris en compte, si nécessaire des mesures techniques doivent être mises en œuvre (par exemple double coque).
- Le dimensionnement des sondes géothermiques est pris en compte par la nouvelle norme SIA 384.
- La documentation D 0190 fixe des principes pour les géostructures énergétiques.

#### 5.2.2.4. Contexte légal et normatif : critique

Le contexte légal suisse permet de traiter les principaux conflits d'usage. En particulier, les eaux souterraines sont protégées de manière importante. Toutefois, les outils mis en place présentent certaines limites.



Les outils d'aménagement du territoire pour la protection des eaux sont développés en plan. Or en-dessous des aquifères, il n'y a généralement pas de risques liés au développement des usages du sous-sol urbain. Aussi, ces volumes ne devraient pas être contraints légalement de la même manière que les volumes aquifères. Par exemple, un tunnel de transport régional est acceptable dans les couches géologiques situées sous un aquifère, si les portails d'accès ne traversent pas l'aquifère. Dans ces situations, il conviendra tout de même de vérifier que les constructions ne génèrent pas de flux hydrogéologiques ascendants (aquifère captif par exemple). Par ailleurs, au-dessus des aquifères, dans les zones de couverture peu perméables, la plupart des usages du sous-sol urbain n'ont pas non plus d'impact si la couche de protection résiduelle est suffisante. La figure 5.4 présente des situations d'ouvrages dans un contexte géologique, illustrant les limites des outils d'aménagement en plan. Aussi, il semblerait plus pertinent de délimiter des volumes de protection. Une telle solution pourrait être rendue possible par les modélisations tridimensionnelles de la géologie et de l'hydrogéologie. Les recommandations de l'OFEV permettent de tenir compte de la nature volumique du sous-sol, en particulier dans les secteurs Au, mais l'évaluation est réalisée à l'échelle du projet et non à celle de la planification.

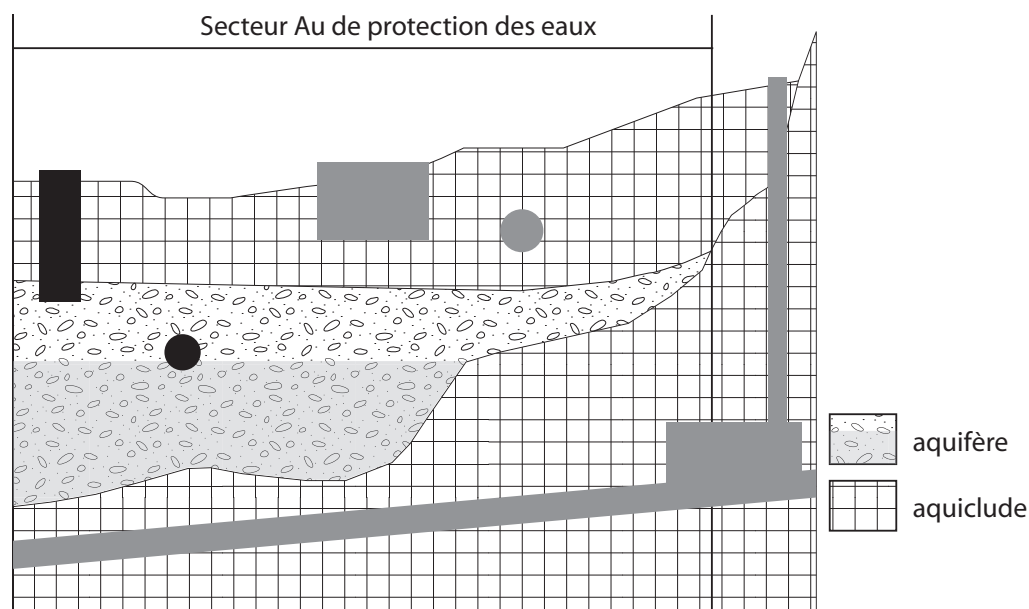


FIGURE 5.4.: Insertion d'ouvrages dans un profil géologique contenant une nappe protégée

Tous les ouvrages se trouvent (au moins en partie) dans un secteur Au de protection des eaux. Les ouvrages présentés en gris ne menacent pas les eaux souterraines alors que les ouvrages en noir présentent un danger.

En zone urbaine, l'objectif qualitatif visant une composition chimique proche de l'état naturel n'est pas toujours possible. En effet, en milieu urbain, on trouve, dans des aquifères superficiels, des nappes libres polluées par les ouvrages existants (réseaux d'égouts, sous-sols de bâtiments, zones préférentielles d'infiltration, etc.). Bien qu'intéressant sur le plan

quantitatif, ces aquifères ne peuvent être exploités, car il n'est pas possible d'assurer leur qualité avec des mesures proportionnées. Ils ne sont généralement pas protégés par les mesures d'aménagement du territoire. Cependant, ils peuvent perturber sensiblement les infrastructures (inondation, modification de la poussée d'Archimède, etc.). Il semble donc pertinent de fixer également des restrictions constructives dans ces aquifères non protégés (par exemple, obligation de construire des ouvrages étanches).

L'objectif de maintien quantitatif du régime d'écoulement naturel n'est pas forcément pertinent en milieu urbain. Il a été vu au chapitre 4.2.1.2 que la remontée comme l'abaissement des niveaux phréatiques avaient des impacts négatifs sur les ouvrages souterrains. Lorsque les niveaux actuels des nappes phréatiques sont sensiblement différents des niveaux naturels et que leur remontée aura des conséquences importantes sur les infrastructures, les objectifs à court et moyen terme pour l'aquifère devraient être essentiellement une protection qualitative. La protection quantitative et le retour au régime naturel seront visés dans le plus long terme (entre autres mesures par des contraintes constructives lors de renouvellements d'ouvrages ou de nouvelles constructions). Il peut ainsi être plus pertinent de fixer une cible techniquement réaliste de niveau phréatique qui soit un compromis entre la conservation à long terme des ressources en eau et le maintien d'infrastructures existantes.

Enfin, le développement d'un cadre incitatif pour mettre en œuvre les synergies entre les usages semble important. Ce cadre incitatif pourrait être réalisé au niveau des outils d'aménagement du territoire (en particulier dans les outils réglementaires par des mesures incitant à l'évaluation systématique des synergies d'usage) en mettant en évidence les régions géographiques où ces synergies peuvent être menées.

### **5.3. Synthèse du chapitre : approche conceptuelle pour une étude de base sur les ressources du sous-sol**

Les objectifs de l'aménagement du territoire et ceux d'une gestion durable du sous-sol sont connexes. À l'heure actuelle, en Suisse (mais aussi dans la plupart des villes étudiées au chapitre 3), il n'existe pourtant pas de prise en compte réelle des ressources du sol dans les outils stratégiques ou réglementaires de planification. Seuls les outils de protection de l'eau et de l'environnement les considèrent, mais à l'échelle territoriale ils restent incomplets, car appliqués en deux dimensions. Le contexte du sous-sol, en particulier géologique et hydrogéologique, est seulement considéré à l'échelle du projet de construction. Une telle situation ne permet pas de prendre en compte l'ensemble des potentialités offertes par les ressources souterraines, ni d'assurer une gestion réellement coordonnée de leur mise en valeur.

Notre proposition centrale est de mettre en œuvre des études de base aux planifications stratégiques qui auront des répercussions sur les outils réglementaires. Ces éléments de base devraient permettre de réaliser un diagnostic de l'état naturel et de l'état d'utilisation du sous-sol, d'évaluer le potentiel de chacune des ressources, mais également leur potentiel d'utilisation multiple (dans le sens de l'hypothèse principale du projet exposée au chapitre 1). Les principales étapes de mise en œuvre d'une telle étude de base sont présentées à la figure 5.5 et font l'objet de développements dans les chapitres 6 et 7. Cette démarche permet de transposer dans la pratique l'approche des

ressources aux besoins : les développements du sous-sol sont formulés dans le projet de territoire, en tenant compte bien sûr des besoins de la ville, mais ce qui est nouveau, en se fondant sur une évaluation globale du contexte du sous-sol et des potentialités qu'il offre.

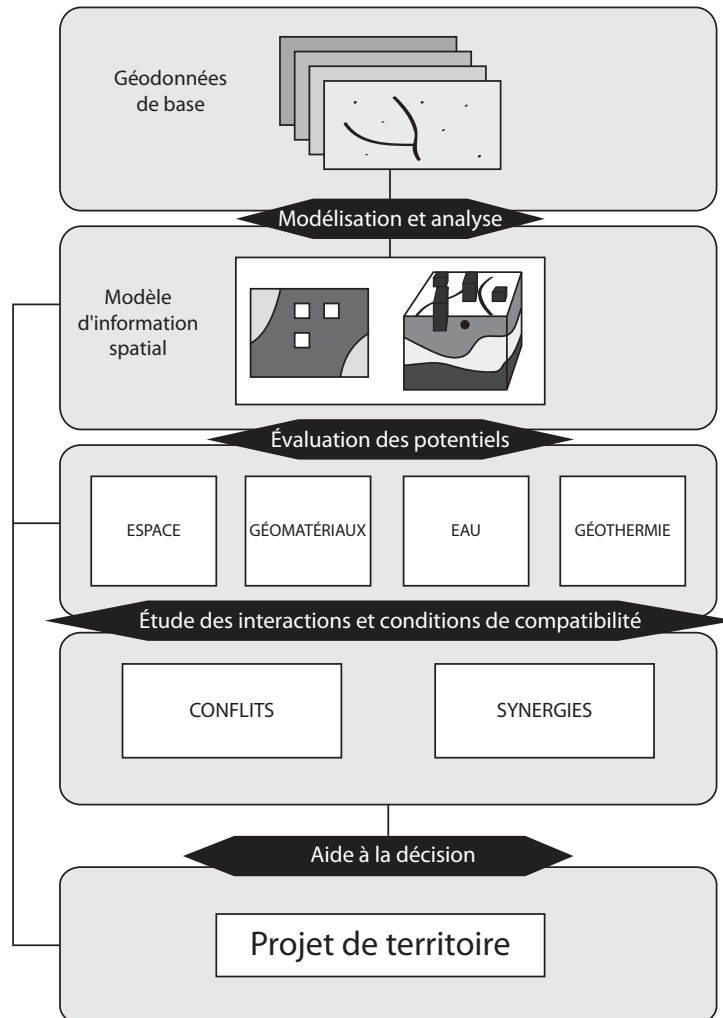


FIGURE 5.5.: Diagnostic et évaluation des potentialités pour le développement des ressources du sous-sol : « des ressources aux besoins »

*Remarque : les autres études de base qui permettent de réaliser le « Projet de territoire » ne sont pas représentées sur ce schéma.*



## *Intégrer et valoriser la connaissance du sous-sol*

### 6.1. Problématique

La connaissance et la représentation du sous-sol sont des clés pour une meilleure utilisation de ses ressources. Souvent, les données existantes sont accessibles essentiellement aux professionnels de la branche (géologues et ingénieurs) et sont dispersées entre plusieurs sources. En Suisse certains cantons ont mis en place une base légale et des processus pour assurer la collecte de ces données par les services techniques. Cette situation n'est toutefois pas généralisée sur l'ensemble du pays. Sur le plan international, on notera que plusieurs villes ayant développé de manière importante leurs ressources du sous-sol ont investi dans la réalisation et l'entretien de bases de données intégrant des données géologiques et géotechniques. C'est le cas par exemple d'Helsinki (Vähäaho *et al.*, 2004), de Tokyo (Ishii *et al.*, 1992) ou de Wigan au Royaume-Uni (Forster *et al.*, 2004).

Pour mieux intégrer le sous-sol dans les stratégies de développement territorial, il apparaît indispensable de transformer ces données en une information synthétique et cohérente qui puisse être accessible à l'ensemble des acteurs. Il ne s'agit toutefois pas de remplacer le rôle des professionnels du sous-sol par un outil ou une base de données, mais plutôt de mieux les intégrer dans les processus d'aménagement. Ce chapitre présente une démarche dans ce sens. Une telle coopération peut s'avérer porteuse pour le développement durable du sous-sol et permettre de réaliser des projets qui prennent en compte le contexte géologique (Paul et Chow, 1999).

Les informations sur l'environnement naturel (géologie et hydrogéologie essentiellement) et celles sur le milieu bâti (usages, infrastructures) ainsi que les contraintes pour le développement du sous-sol (usages de surface, cadre réglementaire, risques naturels et anthropiques) sont considérées. Des approches de standardisation de l'information sont proposées et les outils SIG<sup>1</sup> sont mis en œuvre pour assurer leur représentation et leur gestion.

---

1. Système d'Information Géographique

### Étude de cas

Ce chapitre est illustré par une étude de cas : Genève. La zone d'étude (figure 6.1) s'étend entre les points de coordonnées NO (498'000, 118'500) et SE (504'000, 113'600). Cette zone, de  $29,3 \text{ km}^2$  de surface, a été choisie afin d'intégrer la zone la plus densément construite de l'agglomération, le projet du CEVA<sup>2</sup> et la *nappe du Genevois*. Cette dernière est une nappe d'intérêt public, exploitée pour l'eau potable et située sous la ville. La zone d'étude regroupe ainsi des contextes géologiques, hydrogéologiques et construits variés. À l'intérieur de cette zone (appelée par la suite *zone urbaine genevoise*), trois périmètres appelés *quartiers* ont été identifiés à une échelle plus fine :

- Champel ( $1,3 \text{ km}^2$ ) : ce quartier s'intègre dans la problématique du CEVA. La traversée de l'Arve présente des enjeux du point de vue de la coordination entre deux intérêts publics importants (le CEVA et la nappe du Genevois). Sur le plan urbain, les affectations sont variées : on y trouve la zone 2 (zone urbaine), la zone 3 (région dont la transformation en quartier urbain est avancée), la zone 4a (résidentielle de taille moyenne) et une partie de zone 5 (résidentielle de petite taille).
- Vieille-ville ( $0,6 \text{ km}^2$ ) : c'est un quartier homogène en ce qui concerne l'affectation, il est situé en zone 1 (quartiers de la ville situés dans les anciennes fortifications et destinés aux grandes maisons affectées à l'habitation, au commerce et aux activités du secteur tertiaire). Il présente un intérêt du point de vue de la préservation du patrimoine construit. Enfin, ce quartier n'est pas situé au-dessus d'une nappe d'eau souterraine protégée.
- La Praille : c'est un quartier situé en zone industrielle pour lequel une requalification en zone urbaine mixte est planifiée.

Une acquisition plus détaillée des données a été réalisée sur ces quartiers.

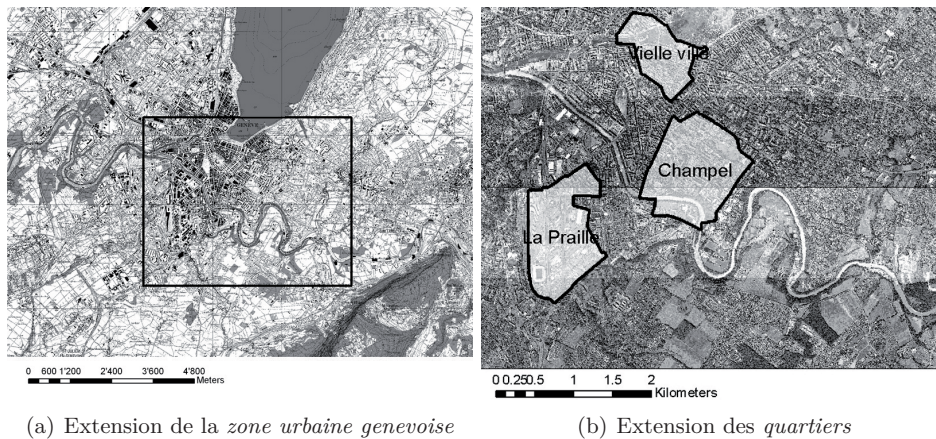


FIGURE 6.1.: Extension de la zone d'étude

Par ailleurs, vu la géologie du Plateau Suisse et les usages du sous-sol en milieu urbain, il a été choisi de développer le modèle géologique jusqu'au toit de la molasse, dans

2. liaison ferroviaire Cornavin - Eaux-Vives - Annemasse

la zone la plus profonde du territoire genevois. La profondeur du modèle est ainsi de 150 m.

## 6.2. Environnement naturel

### 6.2.1. Information géologique

#### 6.2.1.1. Données de base

La nature tridimensionnelle du sous-sol urbain ne peut pas être observée directement. Le géologue dispose de deux sources d'information principales pour comprendre le sous-sol :

- L'affleurement : il permet d'identifier les couches géologiques qui apparaissent à la surface. Leur transposition dans une géomorphologie donnée ainsi que l'observation des pendages des couches permettra de concevoir et consolider un modèle conceptuel de la géologie. En milieu urbain, l'étude des affleurements peut être rendue difficile par l'urbanisation du territoire et les modifications anthropiques telles que la mise en place de remblais.
- Les sondages : ils permettent une observation directe de l'information géologique dans l'axe vertical. En milieu urbain, de nombreux sondages sont réalisés pour des travaux de construction.

En plus de ces observations directes, des informations peuvent aussi être acquises de manière indirecte par les techniques de géophysique, techniques toutefois difficiles à appliquer en ville.

Les observations géologiques sont retranscrites sous deux formes principales :

- La carte géologique : elle est principalement établie à partir des données d'affleurement, mais est consolidée par les sondages existants et par l'interprétation, par son auteur, de l'histoire géologique. Généralement, une carte géologique est réalisée par une même personne, un même groupe de personnes, sur un territoire assez large : typiquement en Suisse, une carte au 1 : 25'000. À l'échelle de la ville, c'est donc une source de données interprétée de manière relativement homogène.
- Le log de sondage : c'est une donnée plus « brute » que la carte géologique. Il correspond au levé de l'information géologique sur le terrain par un observateur, qui peut être un géologue, un géotechnicien, un technicien de forage, un ingénieur, etc. Par ailleurs, la qualité de la donnée dépend de son mode d'acquisition, en particulier du type de sondage : les sondages destructifs (les plus fréquents) fournissent une information moins précise que les sondages carottés. À l'échelle de la ville, c'est une source de données interprétée de manière hétérogène. La densité de sondage conditionne la qualité et la précision de l'interprétation de la géologie et une mutualisation des données est souhaitable dans une optique de gestion du sous-sol à l'échelle urbaine.

En plus de ces données générales, il est important de connaître les propriétés des terrains par l'analyse de paramètres géologiques, géotechniques, pétrographiques et hydrogéologiques. Ces données sont acquises par des tests et des analyses sur le terrain ou en laboratoire.

### 6.2.1.2. Interprétation et modélisation

La cartographie géologique est le document scientifique fondamental pour décrire la « géodiversité » du territoire. Elle représente cependant un niveau d'information qui n'est pas toujours adapté aux besoins pratiques de la gestion du territoire et qui est difficile à interpréter pour les non-spécialistes. Si ces informations sont déterminantes pour la compréhension de l'histoire géologique d'un site et des processus qui transforment la géosphère, les conséquences de cette compréhension pour les applications pratiques ne sont pas toujours explicites pour le profane. Par ailleurs, si au sein d'une même carte géologique, l'information est représentée de manière homogène, il n'est pas rare de disposer de notations différentes d'une carte à l'autre. Brodaric *et al.* (2004) ont mis en évidence en étudiant les données de terrains de plusieurs géologues, que la cartographie géologique dépend de facteurs liés aux données, aux théories d'interprétation, mais aussi à des biais liés à la personnalité de l'observateur et de son environnement. Si cette hétérogénéité n'est pas trop problématique pour le géologue qui dispose des connaissances pour distinguer une différence de représentation d'une différence d'information, elle peut être déroutante pour le profane.

Les logs de sondage sont une source d'information importante en milieu urbain. Ils permettent d'observer la géologie en profondeur, dans sa « dimension invisible » et sont largement utilisés pour caractériser les terrains dans le cadre de travaux de construction. Ils font généralement appel à des descripteurs hétérogènes (pétrographiques, sédimentologiques, lithostratigraphiques, granulométriques, etc.) et présentent une information partielle, si elle n'est pas mise en correspondance avec une échelle d'interprétation plus large. Considérons par exemple deux couches de logs de sondage différentes, décrites toutes les deux comme étant des *graviers bien triés*. Elles auront des propriétés très différentes s'il s'agit de dépôts de delta (stratification oblique et relative homogénéité en plan) ou de dépôts fluviaux (sédiments chenalisés, forte hétérogénéité de granulométrie liée aux phases de crues et décrues).

Il apparaît donc nécessaire de développer une échelle cohérente de l'information géologique, qui se situe entre celle de la carte géologique et celles de la coupe des sondages. La méthode des géotypes (Parriaux et Turberg, 2007) codifie ce processus de conversion. La figure 6.2 présente l'échelle de représentation géotypes parmi d'autres échelles informatives. Les géotypes sont un nombre restreint de grands groupements typiques auxquels peuvent se rapporter les différents terrains rencontrés dans la nature et sur les cartes géologiques. Deux familles de géotypes sont définies : les géotypes des terrains rocheux et ceux des terrains meubles. Les géotypes des terrains rocheux sont classés essentiellement selon un descriptif pétrographique<sup>3</sup>, alors que ceux des terrains meubles le sont selon les conditions génétiques de formation. L'ensemble des géotypes est présenté en annexe D.

À partir de l'échelle de traduction des géotypes, des données de sondage et des cartes géologiques, il est possible de développer une représentation de la géologie dans les trois dimensions. Des méthodes et outils mathématiques ont été développés pour réaliser cette

---

3. On notera que les géotypes des terrains rocheux sont proches de la norme suisse SN 670 009 « Terminologie géologique des terrains meubles » développée initialement pour l'union des professionnels suisses de la route. Cependant, des modifications y ont été apportées pour tenir compte des besoins plus larges de la gestion du territoire.



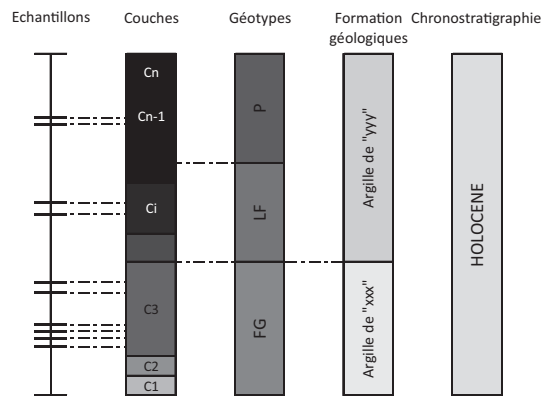


FIGURE 6.2.: Les géotypes parmi les différentes échelles de caractérisation du milieu géologique (Parriaux et Turberg, 2007)

L'échelle des formations géologiques est décrite par un critère lithostratigraphique (par exemple : molasse grise de Lausanne). On trouve aussi régulièrement sur des cartes plus anciennes un descripteur chronostratigraphique pour cette échelle (par exemple : molasse aquitanienne).

modélisation (par exemple: Galera *et al.*, 2003; Mallet, 1997; Mayoraz, 1993; Tacher *et al.*, 1994) et des produits informatiques sont disponibles sur le marché. Une revue de ces outils et méthodes sort du cadre de ce travail. On notera toutefois qu'ils ont souvent été développés en premier lieu pour les besoins de l'industrie pétrolière, c'est-à-dire pour exploiter des données acquises de manière bien coordonnée par un nombre restreint d'acteurs. L'utilisation de ces méthodes pour d'autres besoins nécessite généralement d'utiliser des données de qualité et de quantité relativement hétérogènes, ce qui présente un défi spécifique (Kaufmann et Martin, 2008).

**6.2.1.3. Étude de cas : Genève**

Les données principales de la géologie genevoise proviennent des cartes géologiques et géotechniques au 1 : 5'000 et de la base de sondages géologiques publics du canton. Le canton dispose en effet d'une large base de 12'000 levés de forages numérisés et géolocalisés. La mise en place de cette base de données est rendue possible par la nouvelle loi sur les eaux L 205 du 15 novembre 2002. L'art. 9 al. 2 impose en effet la communication aux autorités des résultats des campagnes de mesures ou de forages.

La ville de Genève est située à l'extrémité ouest du Plateau suisse. Sa géologie est caractérisée par la présence de formations quaternaires de dépôts et de retraits d'origines glaciaire et alluvionnaire sur un soubassement molassique. La séquence stratigraphique du Genevois est la suivante : molasse, moraine rissienne, alluvion ancienne, moraine würmienne, alluvion récente. En surface, on trouve également des formations de colluvionnement et d'éluvionnement ainsi que des remblais anthropiques.

Le bureau d'étude géotechnique Dériaz a développé, pour la géologie genevoise, une classification des terrains qui utilise des descriptifs granulométriques, génétiques et des paramètres de consistance ou de compacité (Deriaz *et al.*, 1997). Ces descripteurs propres au canton de Genève assurent l'homogénéité des levés de forages, mais constituent une échelle de représentation trop fine pour représenter des formations homogènes à l'échelle de la ville (en particulier parce que les variations de granulométrie et de consistance au sein d'une même formation peuvent être grandes). Aussi, ils ont été traduits en géotypes. Le processus de traduction est décrit à l'annexe E. Il est basé sur une analyse de l'occurrence spatiale des divers descripteurs. À partir de cette analyse, un tableau de conversion entre les deux systèmes de classification a été développé. La figure 6.3 présente les géotypes du Genevois au sein des grandes formations géologiques.

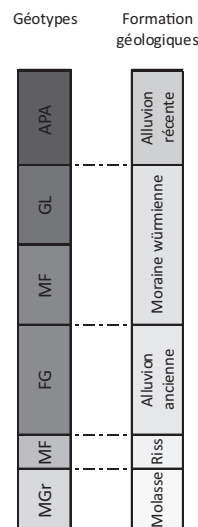


FIGURE 6.3.: Genève : échelle des géotypes et des formations géologiques

Un modèle de type MNA<sup>4</sup> du toit de chacun des géotypes a été développé. Les modèles du GESDEC ont été utilisés pour les toits de trois formations :

- molasse : géotype MGr, marnes avec quelques grès
- riss : géotype MF, moraine de fond
- alluvion ancienne : géotype FG, fluvioglacière

Les MNA des géotypes APA (Alluvions de plaine actuel)<sup>5</sup>, MF (Moraine de fond)<sup>6</sup> et GL (glaciolacustre) ont été modélisés par intégration et interpolation des données de sondage à l'aide du logiciel Geoshape<sup>7</sup>. La figure 6.4 présente le modèle 3D des

4. Modèle Numérique d'Altitude

5. Le MNA du géotype APA a été développé dans le cadre d'une étude sur la nappe du Genevois (Parriaux *et al.*, 2004)

6. Le géotype MF n'est intégré que dans les zones quartiers. En effet, pour le distinguer, il a été nécessaire de transcrire les données depuis les relevés papier. Réaliser ce travail à l'échelle de la ville demanderait des ressources en temps qui dépassent le cadre de cette recherche.

7. Logiciel développé au laboratoire de GÉOLOGIE de l'ingénieur et de l'environnement de l'École Polytechnique fédérale de Lausanne-École Polytechnique Fédérale de Lausanne, non commercialisé

géotypes.

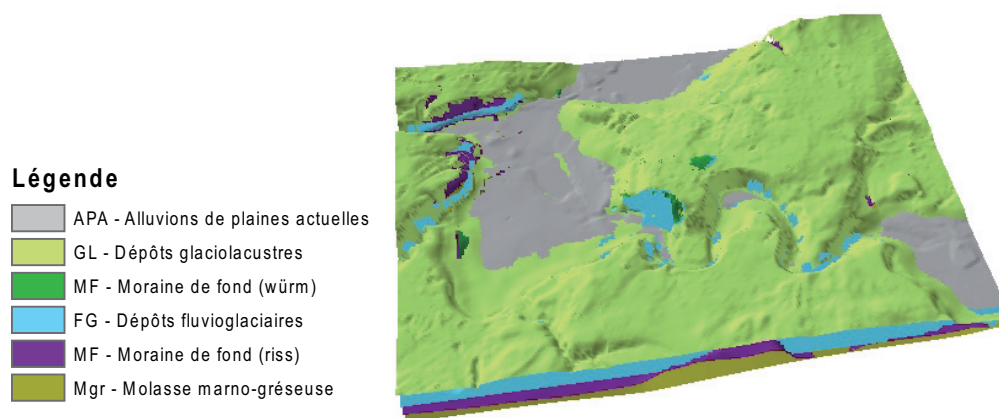


FIGURE 6.4.: Genève : modèle 3D des géotypes  
Exagération verticale = 2

## 6.2.2. Information hydrogéologique

### 6.2.2.1. Données de base

Les conditions hydrogéologiques varient dans les trois dimensions, mais également dans le temps. Les données de base pour le suivi hydrogéologique sont les levés piézométriques. Comme les données de sondage, les données piézométriques sont des observations ponctuelles dans l'espace, qui renseignent la dimension verticale. De plus, elles sont ponctuelles dans le temps. En plus des données fournies par les piézomètres, des informations sur l'hydrogéologie sont obtenues en surface au droit des contacts entre eaux souterraines et eaux de surfaces. C'est le cas par exemple des données de sources, des niveaux dans les rivières ou les lacs lorsque ceux-ci sont en liaison avec les nappes souterraines. Enfin, on peut réaliser des mesures indirectes par géophysique. Les données sur les quantités sont complétées avec des données sur la qualité des eaux par des analyses physico-chimiques et bactériologiques. Les analyses sont menées par mesure directe ou par prélèvement d'échantillon et analyse en laboratoire.

Les données de base hydrogéologiques présentent donc une certaine similarité avec les données géologiques : les observations sont menées à la surface et ponctuellement dans l'axe vertical, la nature tridimensionnelle doit ainsi être interprétée et modélisée. Toutefois, il existe certaines différences notables entre ces deux types de données. Les données hydrogéologiques sont généralement interprétées de manière homogène pour deux raisons :

- Le nombre de paramètres levés est limité et relativement bien déterminé (niveau de saturation, paramètres physicochimiques analysés selon des processus normalisés)

- Le nombre d’observateurs est moins important. Il s’agit presque toujours des hydrogéologues et des services publics.

Par ailleurs, la qualité de l’information hydrogéologique dépend de la densité géographique, mais aussi temporelle des données. Il est nécessaire de disposer de plusieurs données en un même point pour pouvoir interpréter l’évolution des conditions hydrogéologiques dans le temps. Enfin, le suivi hydrogéologique concerne essentiellement les formations aquifères et les formations avec lesquelles elles interagissent.

### 6.2.2.2. Interprétation et modélisation

La construction d’une information hydrogéologique à partir des données de base demande d’interpréter les observations dans leur contexte géologique. Il s’agit d’identifier les grandes formations hydrogéologiques (aquifères, aquitards, etc.), de déterminer le fonctionnement des nappes et leurs échanges. Une fois que l’hydrogéologue a procédé à cette interprétation, qu’il a construit le modèle conceptuel, il peut quantifier les phénomènes par interpolation et modélisation (par exemple construction de cartes d’isopièzes, modélisation numérique des écoulements, etc.).

### 6.2.2.3. Étude de cas : Genève

Les principales nappes du canton sont suivies par le GESDEC qui tient à jour une base de données des levés piézométriques (niveaux d’eau, paramètres physico-chimiques et concentration de certains polluants). Le GESDEC réalise également une interprétation de ses données, présentée dans la carte hydrogéologique du canton. Cette carte représente les principales nappes souterraines, les isopièzes d’une partie des nappes, les courbes de niveau du substratum de l’aquifère, les liaisons connues avec les eaux de surface, les sources et les puits. Les nappes principales de forte épaisseur, les nappes principales d’épaisseur inférieure à 10 m, les nappes superficielles et les nappes temporaires sont distinguées.

Le canton comporte quatre nappes principales : nappe de Montfleury, nappe du Rhône, nappe de l’Allondon et nappe du Genevois (figure 6.5). Dans la *zone urbaine* considérée, deux nappes sont présentes : celle du Genevois et celle du Rhône. Ces nappes se trouvent dans la formation aquifère de l’alluvion ancienne, géotype FG. Dans la typologie présentée à la table 2.1, ces aquifères sont de type Q3u (aquifères des terrains meubles, d’importante conductivité et capacité, exploités ou exploitables pour l’eau de boisson). Les formations d’alluvionnement superficielles (géotype APA) sont également aquifères. Leur perméabilité est importante, mais leur épaisseur et la qualité de leurs eaux sont faibles. Ce sont des aquifères de type Q2.

Les modèles des nappes du géotype APA ont été interpolés à partir des cartes d’isopièzes du canton. Ces données correspondent à une situation de moyennes eaux. Les variations saisonnières ont été évaluées à partir des données piézométriques. Elles sont inférieures à 3 m en tout point et en moyenne inférieures à 50 cm (figure 6.6(a)).

Les nappes principales du géotype FG sont numérisées à partir d’un modèle d’écoulement (Parriaux *et al.*, 2004). Le modèle a permis de simuler une situation de hautes eaux

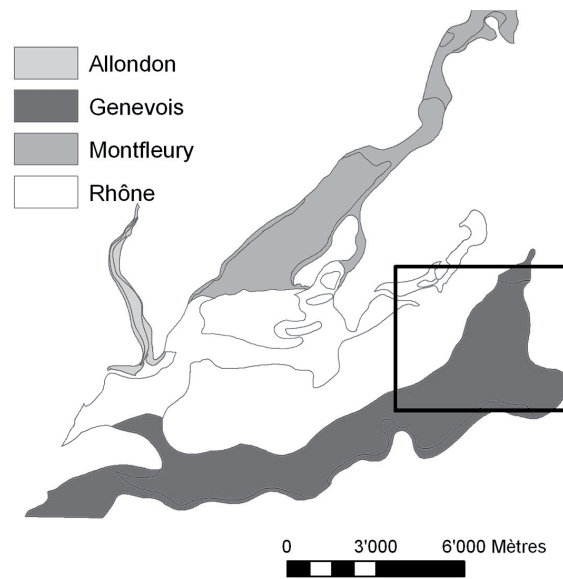


FIGURE 6.5.: Nappes principales du canton de Genève  
Le cadre présente la *zone urbaine*.

et une de basses eaux. La différence de niveau d'eau entre les deux situations est au maximum de 2,2 m et elle est inférieure à 1,5 m sur la plus grande partie du modèle (figure 6.6(b)).

Les nappes sont intégrées en situation de hautes eaux dans le modèle tridimensionnel (figure 6.7). C'est un choix prudent, si l'on considère que les eaux sont généralement une contrainte pour les usages des ressources du sous-sol (chapitre 4).

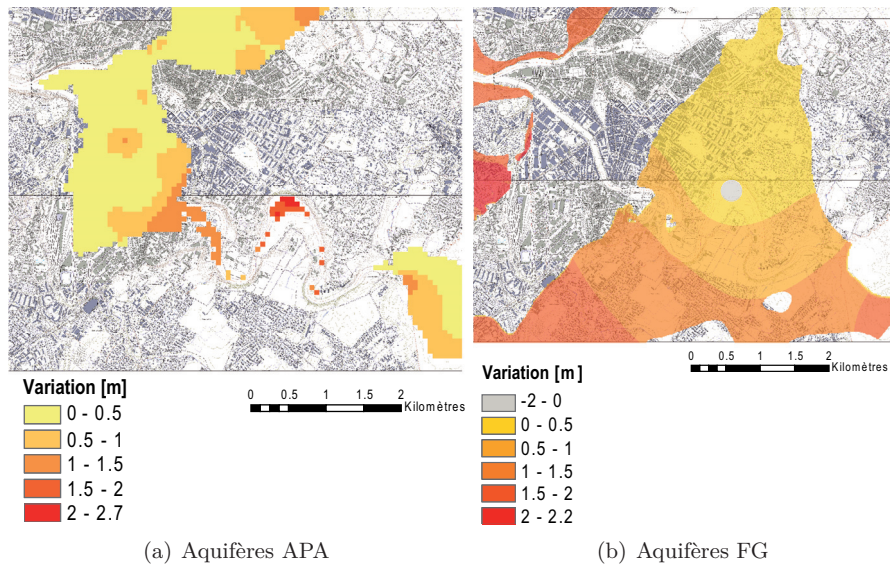


FIGURE 6.6.: Différence du niveau de la nappe entre les situations de hautes eaux et de basses eaux

### Légende

APA - Alluvions de plaines actuelles non saturées
APA - Alluvions de plaine actuelle saturées
GL - Dépôts glaciolacustres
MF - Moraine de fond (würm)
FG - Dépôts fluvioglaciaires non saturés
FG - Dépôts fluvioglaciaires saturés
MF - Moraine de fond (riss)
Mgr - Molasse marno-gréseuse

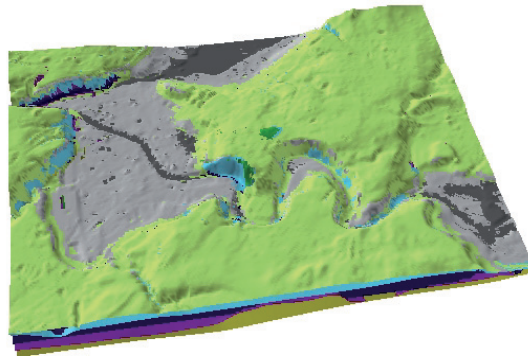


FIGURE 6.7.: Genève : modèle 3D intégrant l'hydrogéologie  
Exagération verticale = 2

## 6.3. Milieu bâti

### 6.3.1. Infrastructures du sous-sol et géodonnées

L'usage actuel du sous-sol urbain et de la surface donne lieu au développement de nombreuses infrastructures dans le sous-sol urbain. Ces infrastructures ont été décrites au chapitre 2.2. Il s'agit d'infrastructures ponctuelles, linéaires verticales ou linéaires horizontales et des infrastructures d'exploitation de l'eau et de la géothermie. Les données concernant ces constructions doivent être intégrées au modèle spatial du sous-sol urbain.

En Suisse, l'emprise des bâtiments, les axes de transport ou les puits par exemple sont levés par les géomètres et représentés dans les données cadastrales. Depuis l'avènement des SIG dans les milieux professionnels et administratifs, un large effort de numérisation des données a été mené. Toutefois, celles-ci sont représentées uniquement dans le plan, en deux dimensions. L'extrapolation de la troisième dimension a fait l'objet de travaux d'acquisition récents. Les techniques de levée par laser ou stéréoscopie ont en effet permis d'acquérir la forme de l'enveloppe des bâtiments et autres objets en 3D. Ces données sont toutefois limitées aux enveloppes en surface. Pour les objets du sous-sol, il n'existe pas de méthode de levé de l'information comparable à celle de l'espace de surface; l'utilisation des méthodes et outils de la géophysique reste pour le moment restreint au domaine de la recherche et à des évaluations locales (par exemple: Jeong et Abraham, 2004/3; Johnson *et al.*, 2008; Lanka *et al.*, 2001). Extrapoler l'emprise en profondeur des infrastructures dépend donc fortement des données attributives des objets en plan (par exemple la profondeur d'un tuyau, le nombre d'étages en sous-sol d'un bâtiment, etc.) et des éventuelles données d'archives pouvant être numérisées (par exemple les données des demandes de permis de construire ou de rénovation).

### 6.3.2. Étude de cas : Genève

À Genève, les données spatiales de base sont acquises par les services techniques de l'État, notamment la DCMO<sup>8</sup> et par différents acteurs parapublics ou privés gérant ou possédant des infrastructures dans le sous-sol (services industriels, opérateurs de télécommunication, etc.). Le SITG<sup>9</sup>, organe interagissant avec les cantons, les communes et les services industriels, assure la gestion de ces données. Les données disponibles, relatives aux infrastructures du sous-sol, sont les suivantes :

- Bâtiments hors-sol et bâtiments sous-sol : les bâtiments sous-sol correspondent en fait aux bâtiments dont l'emprise (dans le plan) de la partie souterraine du bâtiment est plus profonde que l'emprise de sa partie située en surface. Il existe donc aussi des bâtiments dits hors-sol qui ont des étages en souterrains et les bâtiments sous-sol peuvent avoir des étages en surface (figure 6.8). Pour ces objets, un attribut « nombre d'étages en sous-sol » a été ajouté en 2007 par la DCMO. Il sera renseigné lors des demandes de rénovations. Pour le moment, il n'y a pas de données dans la zone d'étude.

---

8. Direction Cantonale de la Mensuration Officielle (Genève)

9. Système d'Information du Territoire à Genève

- Axes routiers : un étage -1 et un étage -2 sont définis comme les axes se trouvant respectivement à un et deux niveaux sous le sol.
- Axes ferroviaires : ils n'ont pas d'attributs de profondeur.
- Cadastre technique du sous-sol : ce cadastre regroupe les principaux objets techniques présents dans le sous-sol. D'une part, les réseaux de fluides et de communication (qui ne sont pas intégrés au projet pour les raisons exposées au chapitre 2.2.1), d'autre part les infrastructures géotechniques des constructions. Cet outil a été mis en place seulement en 2007, aussi toutes les données existantes sont reportées, mais ne concernent pas l'ensemble des ouvrages existants. Les éléments suivants sont d'intérêt :
  - sondes géothermiques (attributs de profondeur maximum et minimum),
  - objets linéaires géotechniques, essentiellement des enceintes de fouilles et les voiles d'injection (attribut de profondeur maximum et minimum),
  - objets ponctuels géotechniques, essentiellement des pieux (attribut de profondeur maximum et minimum),
  - puits (attribut de profondeur maximum).

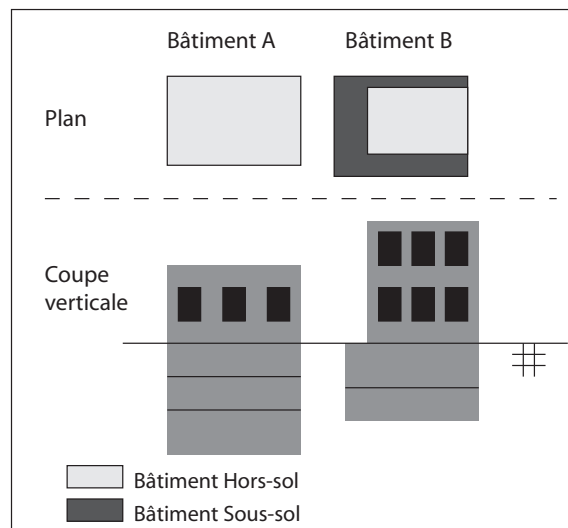


FIGURE 6.8.: Genève : différence entre les *bâtiments hors-sol* et les *bâtiments sous-sol*  
 Les deux bâtiments ont des étages en sous-sol, mais seul le bâtiment B apparaît dans les données de bâtiments sous-sol.

Ces données ont été complétées par analyse croisée. Notamment, pour les bâtiments superposés aux objets géotechniques linéaires ou ponctuels, il a été supposé que le plancher des bâtiments se trouvait à la profondeur du plancher des enceintes de fouilles ou du toit des pieux. Des données spécifiques ont été acquises depuis des documents papier (notamment, certains sous-sols de bâtiments dans les zones quartiers ou le tracé en coupe de la ligne du CEVA). Les données relatives aux infrastructures du sous-sol à Genève sont toutefois partielles. Si elles permettent de développer une image de l'usage du sous-sol (figure 6.9), elles ne permettent pas de réaliser une véritable analyse quantitative des usages ou de mieux appréhender les contraintes portées sur l'environnement souterrain.



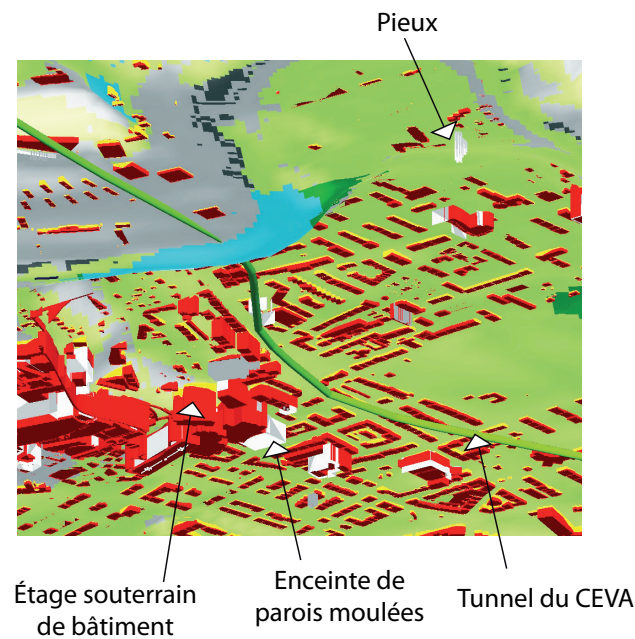


FIGURE 6.9.: Genève : illustration de l'usage du sous-sol au droit de la traversée de l'Arve par le CEVA

Les données utilisées ne représentent pas l'exhaustivité des usages.

## 6.4. Contexte de surface et contraintes

### 6.4.1. Usages de la surface, cadre administratif et légal

Le sous-sol est en liaison intrinsèque avec la surface. Afin d'assurer une gestion du sous-sol en cohérence avec les usages et avec les stratégies développées pour la surface, il est nécessaire d'intégrer au modèle d'information, des données sur les usages de l'espace de surface. Ces données sont les données de base de la gestion territoriale (cadastre, divisions administratives, zonage, etc.). Dans le contexte suisse, elles sont en général acquises avec une grande précision et facilement disponibles sous forme numérique.

Dans l'étude de cas de Genève, les données suivantes ont été considérées :

- Bâtiments de surface
- Axes routiers et ferroviaires
- Cadastre parcellaire et communal
- Zones d'affectation
- Outils d'aménagement du territoire pour la protection des eaux

### 6.4.2. Risques naturels et anthropiques

La prise en compte des risques naturels et anthropiques en lien avec le sous-sol urbain est importante pour trois raisons :

- Les caractéristiques du sous-sol déterminent certains risques pour l’environnement urbain (glissements de terrain, risques sismiques, etc.).
- Le sous-sol a souvent été utilisé pour enfouir les déchets et autres matières indésirables. En milieu urbain, ces sites pollués présentent un risque sanitaire et des contraintes pour la construction.
- Les infrastructures du sous-sol ont une vulnérabilité différente de celles de surface relativement aux risques naturels.

Sterling et Godard (2000) estiment que les espaces souterrains sont d’une manière générale moins vulnérables aux dangers naturels que les espaces de surface. En particulier, ils sont protégés des éléments extérieurs (tornades, tempêtes, vents), sont moins affectés par les séismes que les infrastructures de surface<sup>10</sup>. Du point de vue des inondations, les infrastructures souterraines étanches peuvent généralement résister à des dommages structuraux, en revanche si les eaux peuvent entrer par les portails, elles subissent généralement des dommages fonctionnels importants et sont plus dangereuses pour les utilisateurs.

En fonction du contexte local, il s’agira de prendre en compte ou non les risques sismiques, volcaniques, d’inondations, d’effondrements, de mouvements de terrain, d’avalanches et de liquéfaction des sols. L’évaluation des risques est une problématique d’aménagement du territoire qui présente des enjeux au-delà du sous-sol. Elle est généralement réalisée par une définition du risque comme étant :

$$\text{risque} = \text{aléa} * \text{vulnérabilité}$$

où l’aléa est la probabilité qu’un phénomène se produise (par exemple, le temps de retour d’une crue de débit donné) et la vulnérabilité exprime le dommage causé par le phénomène (par exemple le coût des destructions provoquées par une crue de débit donné). Dans le contexte d’un usage plus important du sous-sol urbain, il serait intéressant d’améliorer l’évaluation de la vulnérabilité des infrastructures souterraines. En attendant, les cartographies existantes de risques et de danger peuvent être utilisées pour appuyer la décision d’installation d’une infrastructure.

À Genève, le principal risque naturel est lié aux inondations, il est décrit par la carte des dangers d’inondations qui représente l’aléa. Les mouvements de terrain sont également cartographiés. Au niveau des dangers anthropiques, le cadastre des sites pollués fournit les informations existantes sur les sites présentant des contaminations.

---

10. Par exemple, lors du tremblement de Terre de Kobé en 1995, les infrastructures souterraines ont été moins endommagées que celles de surface.

## 6.5. Vers un SIG pour le sous-sol urbain

### 6.5.1. SIG et troisième dimension

Les SIG<sup>11</sup>, sont les procédures, les données et les outils qui permettent d'acquérir, de partager et de valoriser l'information spatiale. Dans son sens le plus large, le SIG comprend des logiciels, mais aussi des données, des procédures d'acquisition et d'échange, et des ressources humaines qui interagissent dans le système (Bergeron, 1993; Wade et Sommer, 2006). Selon Prélaz-Droux (1995), les SIG peuvent avoir un rôle *associatif*<sup>12</sup> ou *fédératif*<sup>13</sup>. La fonction fédérative des SIG a gagné en importance dans les collectivités publiques ces dernières décennies (par exemple, le SITG<sup>14</sup> assure une telle fonction à Genève) et ces systèmes jouent un rôle important dans les processus de développement et d'aménagement du territoire (voir par exemple: Lardon *et al.*, 2001; Prélaz-Droux, 1995; Theriault et Prélaz-Droux, 2001).

L'information géographique conjugue des éléments spatiaux (localisation, forme, représentation) et des propriétés non spatiales de l'objet (données attributives : par exemple, le prix d'un bâtiment, le nom de son propriétaire, etc.). Les éléments spatiaux sont représentés à l'aide d'un modèle de données qui est une abstraction de la réalité. Dans les SIG 2D, on distingue deux grandes familles de modèles (figure 6.10) :

- Le modèle vecteur : c'est une représentation discontinue du territoire. L'information est représentée par des objets qui ont une géométrie faisant appel aux trois primitives points, lignes et polygones. Les coordonnées des objets sont stockées de manière explicite dans ce modèle (chaque point étant défini par ses coordonnées dans les systèmes de référence).
- Le modèle raster : c'est une représentation continue du territoire. L'information est représentée par une grille de mailles homogène dont chacune des cellules a une valeur propre (on notera qu'il existe également des modèles de représentation continue faisant appel à des discrétisations hétérogènes, par exemple les modèles de triangulation irrégulière). Les cellules de la grille ayant les mêmes valeurs ou des valeurs proches peuvent représenter les objets géographiques, la notion d'objet n'est toutefois pas explicite dans le modèle raster. Les coordonnées sont stockées de manière implicite par le référencement de la grille dans l'espace.

Les deux modèles de données sont souvent utilisés conjointement, en fonction des phénomènes que l'on souhaite représenter ou des analyses spatiales à réaliser.

L'intégration de la troisième dimension dans les SIG est une problématique relativement récente pour laquelle de nombreux développements sont en cours. En comparaison des possibilités offertes par les SIG 2D, ce n'est actuellement pas une technologie mature pour les besoins de la pratique. L'intégration de la troisième dimension a toutefois permis les acquis suivants :

---

11. Système d'Information Géographique

12. Les partenaires développent des applications de manière indépendante (selon des structures décentralisées) et les échanges d'information ont lieu de manière bilatérale

13. Le SIG est conçu comme un système organisé et mutualisé. Les échanges d'informations entre les partenaires transitent par le système qui est donc aussi l'outil de coordination

14. Système d'Information du Territoire à Genève

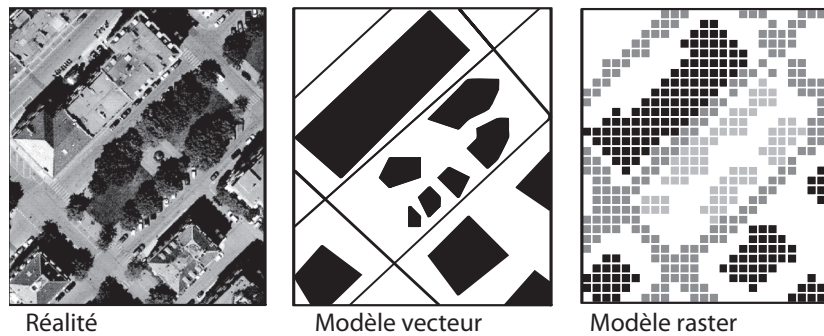


FIGURE 6.10.: Modèles de données des SIG

- Modèle 2,5D : la plupart des outils SIG permettent de gérer des surfaces ayant une projection verticale qui est une fonction bijective, c'est-à-dire de représenter des surfaces pour lesquelles pour chaque point  $(x,y)$  il existe une et une seule coordonnée  $z$  dans l'axe vertical. Les MNA sont une représentation 2,5D.
- De nombreux outils permettent d'extruder les objets de modèle vecteur à l'aide d'une coordonnée  $z$ , généralement stockée sous forme d'attribut, c'est-à-dire de transformer un polygone en un prisme de hauteur  $h$  donnée.

Ces deux fonctionnalités permettent de réaliser des analyses sur les surfaces (pente, zone d'ombres, etc.) et d'établir des représentations virtuelles en trois dimensions. Elles n'offrent toutefois pas de réelle solution pour modéliser la réalité volumique du territoire ou pour mettre en œuvre des fonctions d'analyse spatiale. Pour ceci, il est nécessaire de développer de nouveaux modèles de données complémentaires des modèles vecteurs et raster 2D. Quatre approches de modélisation volumique sont possibles (Stoter et Zlatanova, 2003) :

- Géométrie de construction de solides (Constructive Solid Geometry CSG) : les objets sont reconstruits à partir de primitives géométriques volumiques : des sphères, des cubes et des cylindres. Cette solution dérivée des approches de CAO<sup>15</sup> permet de représenter une multitude d'objets différents. Toutefois la modélisation d'objets réels peut devenir extrêmement complexe (nombre de primitives et de relations d'inclusion ou d'exclusion très élevé).
- Pavage (tessellation) : la réalité est discrétisée en une grille régulière de volumes élémentaires : des voxels. Cette solution est similaire au modèle raster en 2D. Elle se prête bien à la représentation des phénomènes continus dans l'espace (par exemple, la géologie). Cependant, elle demande des capacités de stockage très importantes, ne permet pas de représenter des surfaces lisses et ne dispose pas de notion explicite d'objets. Les relations topologiques (par exemple, adjacence, voisinage, intersection) ne sont pas explicites dans ce modèle.
- Modèle de frontière (boundary model) : les primitives points, ligne, polygones et polyèdres sont utilisées de manière similaire aux primitives du modèle vectoriel en 2D. Ce modèle est bien adapté à la représentation des objets volumiques les plus complexes. Toutefois, il nécessite de fixer des règles très strictes de modélisation. Il peut

15. Conception Assistée par Ordinateur

en effet exister pour un même objet plusieurs représentations obtenues à partir de primitives différentes. Par ailleurs, les relations topologiques deviennent très complexes dans l'espace tridimensionnel. Enfin, ce modèle n'est pas explicitement volumique. Des opérateurs d'analyse volumique ne sont possibles que par une interprétation topologique (intérieur ou extérieur de la frontière).

- Modèles de tétraèdres (Tetrahedral Network Structure TEN) : ce modèle est une discrétisation des données volumiques en volumes élémentaires tétraédriques. Il conjugue les avantages de la représentation de frontières à un modèle volumique réel. Il permet ainsi la représentation explicite d'objets ayant des propriétés volumiques. Toutefois, pour représenter une réalité complexe, le nombre de volumes élémentaires peut devenir important et le maillage difficile à réaliser (un maillage à base de tétraèdre doit être composé d'éléments tétraédriques présentant des facteurs de formes (compacités) satisfaisants). Dans les modèles de TEN, la topologie n'est pas explicite. Des efforts ont toutefois été menés pour proposer des systèmes topologiques adaptés à ce modèle de données (Apel, 2006; Lachance, 2005; Pouliot *et al.*, 2008b).

À l'heure actuelle, ces modèles de données ont principalement été implémentés dans des solutions de modélisation spécialisées (par exemple les modeleurs géologiques) ou de visualisation virtuelle. La transition vers des outils SIG permettant la gestion de l'ensemble du cycle de vie de l'information (figure 6.11) n'est pas complète. De nombreux défis restent ouverts, notamment dans les domaines de la gestion et de l'échange de données ainsi que dans ceux de l'analyse spatiale (Apel, 2004; Bédard, 2006; Pouliot *et al.*, 2006; Stoter et Salzman, 2003; Stoter et Zlatanova, 2003; Zlatanova, 2000).

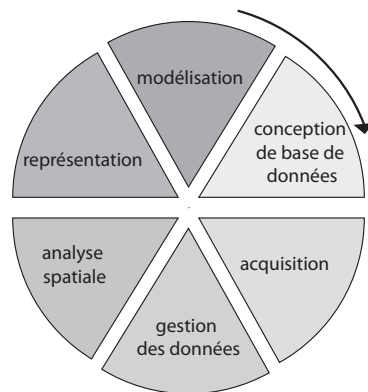


FIGURE 6.11.: Cycle de vie de l'information spatiale (Pointet, 2007, adapté de Worboys et Duckham (2004))

### 6.5.2. SIG par étage : une approche transitoire pragmatique

À l'heure actuelle, le développement d'une méthode de gestion de l'information spatiale réellement tridimensionnelle est limité par les capacités des outils existants ainsi que par les géodonnées disponibles (notamment les données sur les infrastructures). Par ailleurs, le manque de maturité des outils 3D a pour conséquence qu'ils ne sont maîtrisés que par un nombre faible de professionnels (Pouliot *et al.*, 2008a). Devant ce constat, il semble

pragmatique de promouvoir une approche qui reste fondée sur des outils de gestion de l'information 2D et 2,5D bien maîtrisés, tout en anticipant la transition vers la troisième dimension, notamment par l'acquisition et la gestion de données attributives décrivant la géométrie tridimensionnelle des objets.

L'approche développée dans le cas d'étude genevois est synthétisée par la figure 6.12. Les outils 3D sont utilisés pour l'interpolation et la modélisation géologique et hydrogéologique (domaines dans lesquels ils sont particulièrement efficaces). Des données sont générées sous forme de modèles numériques d'altitude hors de ces modèles (données 2,5D). Les données du milieu construit, de surface et des contraintes sont intégrées sous leur forme existante dans les bases de données 2D, les attributs de profondeur sont utilisés lorsqu'ils existent (ces données sont complétées par analyse spatiale lorsque c'est possible). Afin de représenter la troisième dimension, on transforme le territoire en une série de coupes parallèles à la topographie (étages). Ces coupes sont issues des modèles géologiques et hydrogéologiques. Les autres données sont projetées en fonction des éventuels attributs de profondeur (la projection est réalisée par requête attributive pour éviter la redondance des données). Un étage donné a donc une profondeur par rapport à la surface constante et une hauteur sur mer variable. Un étage du modèle mesure 3 m (c'est-à-dire la hauteur moyenne d'un étage de bâtiments) et les coupes sont réalisées tous les 3 m de 0 à 30 m, puis tous les 6 m de 30 à 90 m, puis tous les 10 m de 90 à 150 m. Par la suite, les analyses spatiales (construction d'indicateurs, adéquation du territoire à recevoir certains usages, etc. : voir chapitre 7) sont réalisées en plan dans chacun des étages du modèle.

La figure 6.13 présente l'interface de l'outil implémenté et la figure 6.14 présente deux étages du modèle. Elle met en évidence les différences de contextes géologiques entre les trois quartiers : en subsurface, les quartiers de Vielle-ville et de La Praille sont situés dans les formations d'alluvionnement récentes (APA), respectivement du Rhône et de l'Arve. Celui de Champel est dans les dépôts morainiques glaciolacustres (GL). En profondeur elles se trouvent dans les formations morainiques, alors que le quartier de Champel se trouve dans les alluvions anciennes (FG) de la nappe du Genevois.

Des visualisations en 3D de réalité virtuelle sont réalisées au sein de l'outil SIG généraliste (ArcGIS<sup>16</sup>). En revanche, la gestion de la troisième dimension dans les modèles de données utilisés ne permet pas d'analyse spatiale.

L'approche proposée permet ainsi de représenter et d'analyser le sous-sol urbain à l'aide de méthodes et d'outils bien maîtrisés par les praticiens. À l'heure actuelle, c'est certainement un gage de son applicabilité et de sa reproductibilité. Toutefois, elle présente un certain nombre de désavantages par rapport à une stratégie qui tirerait réellement partie d'un modèle de données volumiques :

- Telle qu'elle a été développée, l'approche présente une certaine lourdeur pour sa mise en œuvre : il est nécessaire de faire appel à des logiciels externes qui demandent un apprentissage spécifique.
- Les modèles de données choisis, en particulier pour l'information géologique et hydrogéologique, ne peuvent être mis à jour de manière dynamique (il est nécessaire de reprendre l'ensemble des étapes du flux de travail pour régénérer les modèles en fonction de nouvelles données ou de nouvelles interprétations des données).

16. C'est l'outil SIG utilisé par l'ensemble des services techniques cantonaux de Genève.

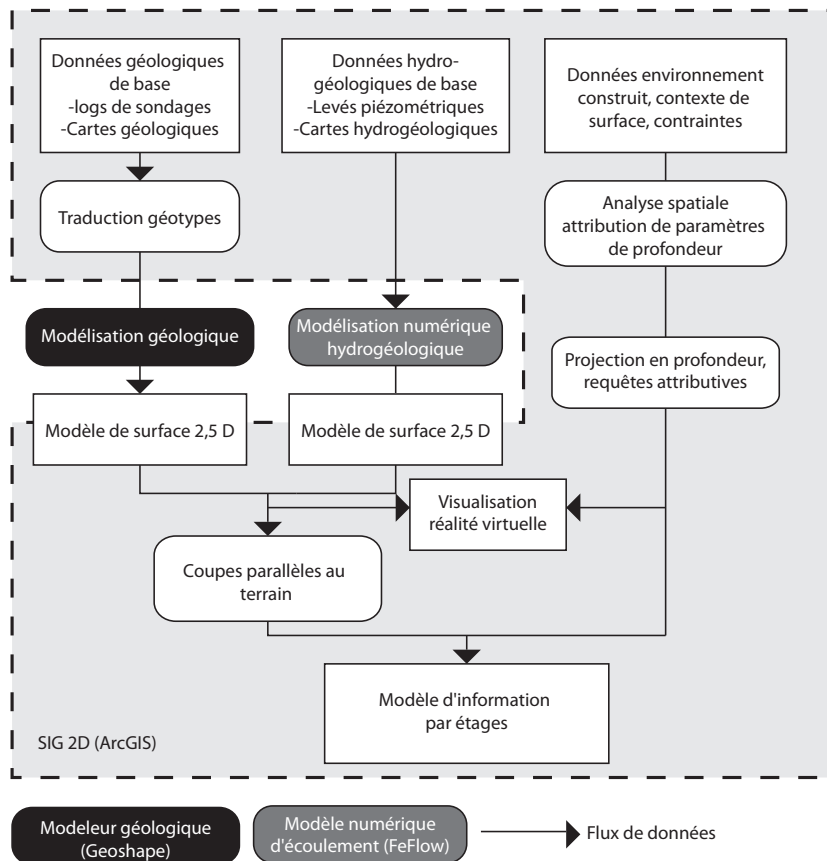


FIGURE 6.12.: Conception du modèle d'information dans le SIG par étages : la figure présente les différentes étapes d'acquisition, d'analyse de modélisation et de représentation des données et des informations spatiales.

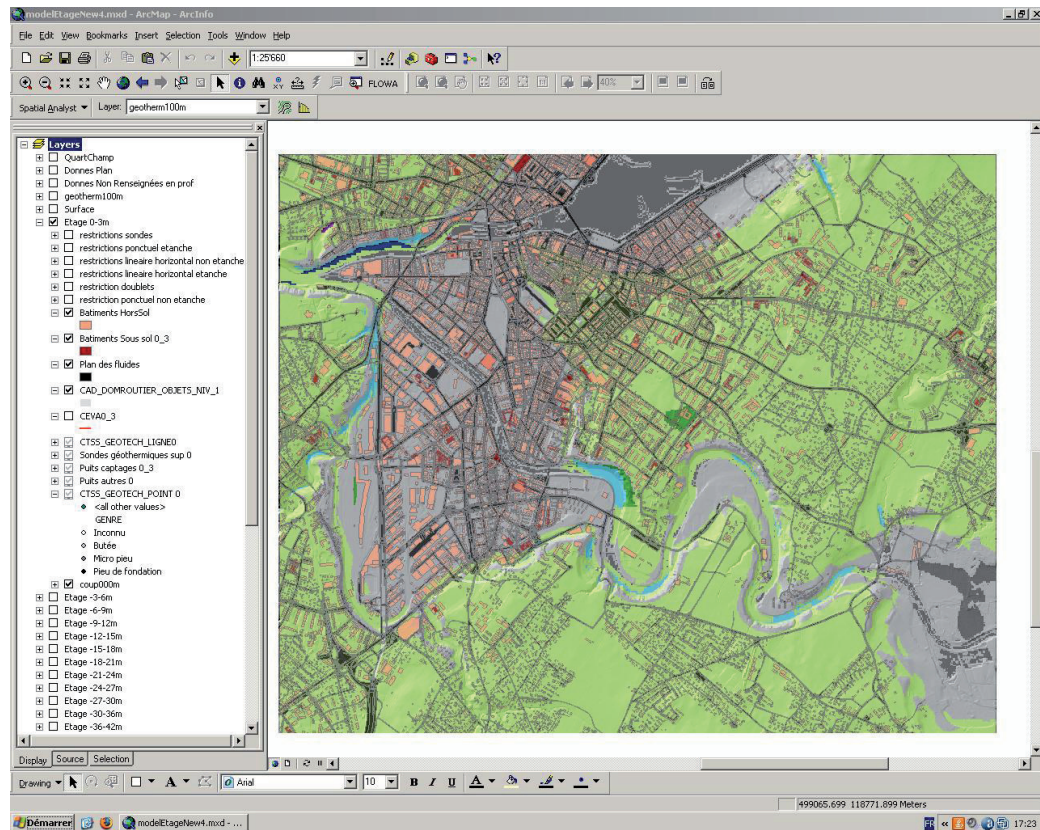
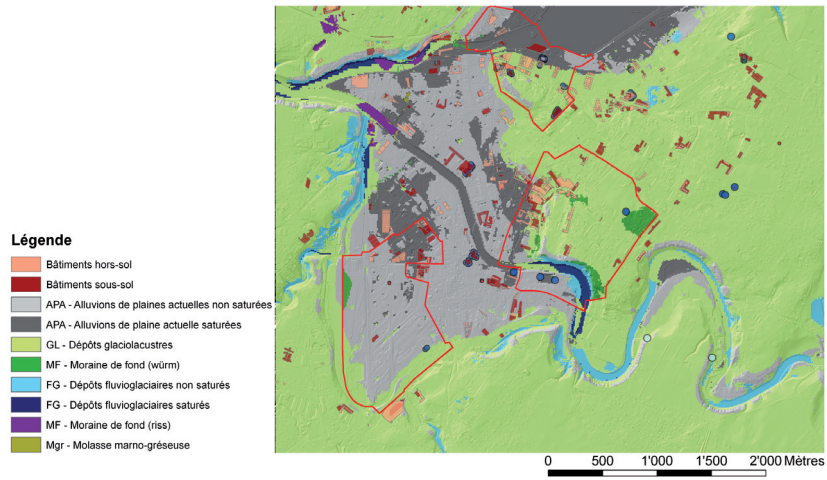


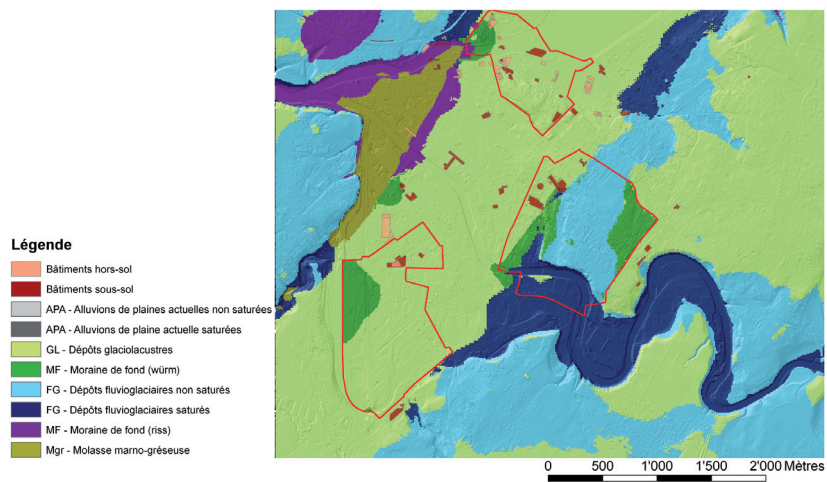
FIGURE 6.13.: SIG de données par étage

Présentation de l'interface du logiciel. La couche 0 à 3 m est visible. La navigation d'un étage à l'autre se fait dans la fenêtre de gauche.





(a) Étage -2 : profondeur de 3 à 6 m



(b) Étage -7 : profondeur de 18 à 21 m

FIGURE 6.14.: Présentation de deux étages de données

- Il existe une redondance de l'information spatiale entre les étages du modèle : les formations géologiques identiques (par exemple un même géotype) étant décrites sur plusieurs étages par des couches de données différentes.

## 6.6. Synthèse du chapitre

La méconnaissance du sous-sol urbain explique en partie le faible intérêt que lui portent les gestionnaires et planificateurs urbains. Les données sur l'environnement géologique, hydrogéologique et construit sont souvent dispersées parmi plusieurs acteurs qui les exploitent selon des stratégies et avec des outils différents. Toutefois, ces données existent et le sous-sol urbain est connu des spécialistes. Pour que cette connaissance soit partagée par l'ensemble des acteurs de la gestion du territoire, il est nécessaire de mettre en œuvre une stratégie de gestion de l'information mieux coordonnée.

En ce qui concerne l'information géologique, une approche de traduction synthétique et standardisée est proposée à l'aide des géotypes. La nature tridimensionnelle du sous-sol est modélisée grâce à des modèles numériques de surface. L'information hydrogéologique est intégrée au modèle géologique. Paradoxalement, l'information relative aux infrastructures est plus lacunaire : malgré la richesse et la qualité des données en plan, il reste difficile d'appréhender leur emprise dans le sous-sol. En l'absence de méthode efficace de levée de l'information sur le terrain, il apparaît nécessaire de promouvoir son acquisition systématique, par exemple lors des demandes de constructions et de rénovations ou lors des processus de recensement.

Les SIG jouent un rôle fédérateur pour la gestion et l'analyse de l'information spatiale. Ils ont un rôle similaire à jouer pour l'information sur le sous-sol. Toutefois, les technologies traduisant réellement la nature volumique des objets spatiaux dans le sous-sol ne sont pas encore suffisamment matures pour les besoins des praticiens, même si les perspectives ouvertes par la recherche sont nombreuses. En attendant que ces technologies deviennent plus accessibles, il est possible de représenter de nombreuses informations dans le plan et à l'aide de coupes. Une méthodologie de gestion de l'information spatiale pour le sous-sol a été construite dans cette optique. Elle s'appuie sur des outils et des techniques bien maîtrisées et est pertinente à mettre en œuvre pour, dès à présent, gérer et analyser l'information spatiale relative au souterrain.

## *Évaluer en pratique le potentiel d'un sous-sol urbain*

Les développements présentés au chapitre 6 ont permis de construire un modèle d'information spatial pour le sous-sol urbain. L'objectif de ce chapitre est de traduire cette information en potentialités d'usages des ressources du sous-sol. Selon l'approche présentée à la figure 5.5, cette traduction comporte deux étapes principales :

- Évaluation des potentiels pour chaque ressource. Dans cette étape, les ressources sont considérées indépendamment. Des indicateurs de potentiel sont développés. Ils reflètent l'efficacité avec laquelle une ressource donnée pourrait être exploitée indépendamment de l'impact positif ou négatif produit sur l'usage des autres ressources. Cette efficacité se traduit de différentes façons selon les ressources considérées (facilité de construction, rendement d'un ouvrage thermique, etc.)
- Évaluation des interactions entre les usages des ressources. Cette deuxième étape permet de cartographier les conditions dans lesquelles les ressources interagissent et de dériver des cartes de restriction ou de possibilité de synergies. Les interactions sont évaluées sur la base de l'analyse présentée au chapitre 4 et du cadre législatif suisse ainsi que des critiques de ce cadre présentées au chapitre 5.2.

Ensuite, l'utilisation des outils d'analyse multicritère pour l'aide à la décision est discutée. Enfin, sont présentés les résultats de l'application de la méthodologie à un projet de développement urbain.

### **7.1. Potentiel brut d'usage des ressources**

#### **7.1.1. Ressource en espace**

##### **7.1.1.1. Évaluation du potentiel**

Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, de nombreuses techniques de construction ont été développées (annexe B), si bien qu'il est actuellement possible de réaliser des ouvrages souterrains

dans des contextes géologiques très variés. Aussi, il semble intéressant d'exprimer le potentiel de la ressource espace, non en termes de possibilité de construire des ouvrages dans le sous-sol, mais plutôt de difficulté à réaliser cette construction ; c'est-à-dire de relier le contexte géologique aux efforts nécessaires pour la construction (soutènement ou étanchement spécial, méthode spécifique d'excavation, etc.). Ces éléments influencent les coûts et les délais de réalisation des infrastructures. Les études menées par Pierrick Maire ont toutefois mis en évidence qu'il est particulièrement difficile de construire une approche basée uniquement sur les coûts de construction : une évaluation statistique demande de disposer de données qui n'existent pas pour les villes suisses (base de données de coût dans des contextes géologiques variés et des contextes urbains homogènes pour pouvoir analyser les corrélations) ; une approche analytique a été mise en œuvre, mais n'a permis de prendre en compte qu'un nombre limité de contextes géologiques et de technologies de construction. Des critères d'évaluations du potentiel de construction d'ouvrages souterrains basés sur des facteurs géotechniques sont proposés dans la littérature. Par exemple la *classification des sols pour le constructeur de tunnels* développée par Terzaghi est utilisée pour la construction souterraine dans les sols grossiers (Bickel *et al.*, 1996). Ces approches sont toutefois valables dans des contextes géologiques homogènes et ne sont pas extrapolables à la variété des contextes géologiques que l'on peut trouver au sein d'une ville. En effet, les paramètres géotechniques descriptifs ne sont pas les mêmes et ne sont pas comparables pour des terrains très différenciés.

La difficulté de construire des ouvrages souterrains dans un contexte géologique donné dépend du comportement mécanique des terrains, de facteurs hydrogéologiques et de facteurs géologiques (par exemple pendage principal des couches, niveau d'altération, hétérogénéité granulométrique, hétérogénéité des formations géologiques). Parmi ces certains peuvent être exprimés de manière quantitative (direction de pendage, paramètres mécaniques, perméabilité, etc.), alors que d'autres sont traduits de manière qualitative ou descriptive. Dans la pratique, l'évaluation des technologies et des moyens à mettre en œuvre pour réaliser les ouvrages est faite à l'échelle du projet par les professionnels (géologues et ingénieurs), sur la base d'études géotechniques et géologiques présentant ces paramètres quantitatifs et qualitatifs, mais aussi sur la base de leur expertise. Aussi, il semble pertinent de pouvoir refléter cette expertise dans l'évaluation du potentiel du sous-sol urbain. Dans ce but, une méthode de construction d'indicateur en deux temps est proposée :

1. Analyse des principales propriétés des différents terrains (traduits en géotypes) caractérisant l'implantation d'ouvrages souterrains :
  - Paramètres quantitatifs géologiques, hydrogéologiques et géotechniques.
  - Description géologique des principaux faciès pour tenir compte des paramètres techniques mal représentés par les résultats des tests géotechniques.
  - Description du contexte hydrogéologique.
2. Construction d'un indicateur synthétique par des professionnels de la construction souterraine familiers du contexte selon la méthode des comparaisons par paire (Saaty, 1980). Cet indicateur est construit en tenant compte des paramètres décrits lors de la première étape.

L'indicateur proposé permet de prendre en compte des facteurs quantitatifs, mais aussi qualitatifs et de pouvoir comparer ensemble des contextes géologiques variés. Lors de son

interprétation, il est important de considérer que les jugements d'experts peuvent refléter des éléments subjectifs (biais liés à l'expérience personnelle, préférences technologiques, biais disciplinaires, etc.) et que l'indicateur étant construit par comparaison d'un nombre de géotypes donnés, les valeurs obtenues ne sont pas absolues. Il n'est ainsi pas possible d'attribuer à un géotype une valeur pour le comparer à un autre qui n'aurait pas été considéré lors de la construction de l'indicateur.

### 7.1.1.2. Application

Dans le cas d'étude genevois, les géotypes décrits au chapitre 6.2.1 ont été pris en compte. Les paramètres géotechniques et granulométriques des faciès du sous-sol genevois ont été étudiés sur la base de statistiques géotechniques (Deriaz *et al.*, 1997) et sont présentés en détail en annexe F. Les principaux paramètres géotechniques retenus pour caractériser le potentiel sont :

- granulométrie
- consistance et plasticité des sols fins
- compacité des sols grossiers

On notera que certains terrains de transition sont décrits par des paramètres pour les sols fins et pour les sols grossiers. La table 7.1 présente les classes de paramètres des différents géotypes selon les normes utilisées en Suisse.

TABLE 7.1.: Synthèse des principaux paramètres géotechniques des terrains meubles

Formation géologique	Géo-type	Granulométrie	Consistance	Plasticité	Compacité
Alluvion ancienne	APA	Graviers			Compact
Moraine würmienne	GL	Limons	Tendre à dure	Plastique à très plastique	
Moraine würmienne	MF	Limons à sables	Ferme à dure	Assez plastique à plastique	
Alluvion ancienne	FG	Graviers			Très compact
Moraine rissienne	MF	Limons et sables	Dure	Assez plastique	Très compact

Ces paramètres ne tiennent pas compte du contexte hydrogéologique. Dans les terrains saturés, les conditions de construction sont sensiblement plus difficiles, l'eau étant « l'ennemie du constructeur de tunnels » (ITA Working group on maintenance and repair of underground structures, 1991) et par extension celle du constructeur d'ouvrages souterrains en général.

Les différents géotypes sont décrits :

- Les terrains les plus propices à la construction d'ouvrages souterrains sont les terrains graveleux non saturés (géotypes FG et APA). Ils ont des caractéristiques de compacité élevées. Cependant, dans la zone saturée, la tenue des fouilles est problématique. En raison d'une surconsolidation plus importante, les terrains du géotype FG sont généralement plus favorables que ceux du géotype APA.
- Les moraines de fond (géotypes MF), généralement bien consolidées, présentent de bonnes aptitudes pour l'excavation, et une bonne tenue en fouille. La consistance est élevée et la plasticité reste contenue. Les moraines du Riss, plus surconsolidées que celles du Würm, sont plus aptes à la construction d'ouvrages souterrains.
- Les fouilles dans la molasse chatienne marno-gréseuse (MGr) présentent un degré de difficulté très variable. Les facteurs qui l'influencent sont, dans l'ordre d'importance :
  - Le pendage des couches : conditions faciles en dessous de 5°, s'aggravant avec le pendage et nécessitant des soutènements par des clous ou des ancrages selon le degré d'instabilité devant des glissements couche sur couche.
  - La proportion de grès et de marnes : dans le Chattien, la part des marnes est souvent importante et cause des problèmes d'instabilité au glissement, voire parfois de gonflement.
  - Le degré d'altération ; décalcification pour les grès, plasticité pour les marnes. Les fouilles sont la plupart du temps dans la zone altérée de la molasse dont l'épaisseur est d'une dizaine de mètres sous la base du Quaternaire.
- Les terrains du géotype glaciolacustre GL sont de mauvais terrains pour la construction d'ouvrages souterrains. Leur consistance est faible et ils présentent une forte plasticité. La tenue en fouille est mauvaise.

À partir de l'ensemble de ces informations, une échelle est construite par comparaison par paires<sup>1</sup> (la méthode de comparaison par paires est décrite en détail en annexe G). Les situations géologiques possibles sont d'abord classées de la plus favorable à la moins favorable, et la préférence d'une situation vis-à-vis d'une autre est qualifiée selon l'échelle décrite en annexe. Les situations sont décrites pour les différents géotypes et le contexte hydrogéologique dans le cas des terrains aquifères. La matrice de comparaison par paires et l'indicateur de potentiel obtenus sont présentés à la table 7.2. Plus la valeur de l'indicateur est élevée, plus le terrain est favorable à la construction souterraine.

---

1. Dans le cadre de ce travail, la matrice est construite par les acteurs du projet de recherche Deep City.

TABLE 7.2.: Matrice de comparaison et indicateur de potentiel pour la construction d'ouvrages souterrains

	FG	AP	MF riss sat	MF würm sat	MGr sat	FG sat	AP sat	GL sat	Indicateur de potentiel pour la construction souterraine
FG	1	2	4	5	6	7	8	9	0.34
AP	1/2	1	3	4	5	7	8	9	0.25
MF riss saturé	1/4	1/3	1	2	4	6	7	8	0.15
MF würm saturé	1/5	1/4	1/2	1	3	5	6	8	0.11
MGr saturé	1/6	1/5	1/4	1/3	1	4	5	7	0.07
FG saturé	1/7	1/7	1/6	1/5	1/4	1	2	6	0.04
AP saturé	1/8	1/8	1/7	1/6	1/5	1/2	1	5	0.03
GL saturé	1/9	1/9	1/8	1/8	1/7	1/6	1/5	1	0.01

## 7.1.2. Ressource en géomatériaux

### 7.1.2.1. Évaluation du potentiel

Lors de la construction d'ouvrages souterrains, du matériel géologique est excavé et doit être intégré au projet de construction ou évacué, pour être utilisé dans d'autres constructions ou mis en décharge. Suivant le devenir du matériel, cette gestion peut être appréhendée comme celle d'une matière première ayant une valeur ou au contraire un déchet ayant un coût. Six types de valorisations ou d'éliminations de ces matériaux ont été décrites au chapitre 4.2.3.1, ces types sont classés du plus avantageux (matériaux de grande valeur nécessitant peu de traitements) au plus désavantageux (déchet nécessitant un traitement avant sa mise en décharge) et sont rappelés à la table 7.3. Le potentiel d'usage des géomatériaux est évalué en associant les géotypes des terrains à ces types de valorisation. En pratique, les types de valorisation ne sont pas dictés uniquement par les caractéristiques du matériel géologique, dans les chantiers, des matériaux qui pourraient être techniquement valorisés (parfois également économiquement en adoptant une approche d'évaluation des coûts sur le cycle de vie) ne le sont pas pour plusieurs raisons :

- Pas d'intérêt économique par rapport au coût des matériaux primaires et des volumes de stockage. Il faut toutefois prendre en compte que les transactions sont généralement gérées de manière cloisonnée, sans coordination entre les maîtres d'ouvrages de chantiers différents, voir entre les acteurs d'un même chantier. Rochat *et al.* (2006) ont évalué qu'une concertation entre les maîtres d'ouvrages ou une coordination assurée par un transporteur modifieraient sensiblement les flux économiques et pouvaient rendre la valorisation plus attractive.
- Manque de structures (par exemple, concertation entre les chantiers) et d'infrastructures (par exemple, place de dépôt provisoire) pour assurer la logistique d'une gestion plus efficiente sur le plan environnemental.
- Absence d'acteurs pour assurer certains processus de traitement.

– Il n'existe pas de demande suffisante pour les types de valorisation envisagés.

Aussi, l'évaluation du devenir du matériel géologique est réalisée dans l'hypothèse d'une gestion améliorée permettant de réduire les besoins en matériaux primaires et en espace de stockage.

TABLE 7.3.: Types de valorisation des matériaux d'excavation

Type 1	Matériaux nobles pouvant être utilisés avec ou sans lavage et tamisage dans l'industrie des géomatériaux : alluvions et débris de roches dures pour les granulats, blocs pour la construction en pierre et la protection contre l'érosion, gypse pur dans l'industrie du plâtre, marnes et calcaires dans l'industrie du ciment.
Type 2	Matériaux qui peuvent être réutilisés sans traitement comme remblais : sols et débris de roches avec une faible teneur en eau et en argiles.
Type 3	Matériaux qui peuvent être réutilisés après traitement sur site ou hors site de construction, essentiellement pour des remblais. Traitement à la chaux et au ciment des matériaux à forte teneur en eau.
Type 4	Matériaux avec une très forte teneur en eau nécessitant un traitement en usine pour être transformés en granulats artificiels (boues minérales).
Type 5	Matériaux pouvant polluer l'environnement pour des raisons géogènes. Ils peuvent être utilisés en remblais confinés ou doivent être éliminés en décharges contrôlées (gypse, anhydrite, roches salines, roches riches en sulfates).
Type 6	Matériaux pouvant polluer l'environnement pour des raisons anthropiques. Ils doivent être traités avant leur réutilisation ou mis en décharge.

Les indicateurs développés dans ce chapitre s'appliquent essentiellement aux terrains meubles. En effet, dans les villes suisses, les principales excavations ont lieu dans les terrains meubles et dans la molasse. La filière principale de valorisation de la molasse reste le remblaiement (type 3), voire la mise en dépôt contrôlé lorsque la molasse est gypseuse (type 5). La valorisation comme matériaux minéraux (type 1) est possible pour la construction en pierre naturelle, mais difficile à évaluer sans données de forage locales (l'altération du matériel géologique étant déterminante). Pour les autres matériaux rocheux (en particulier roches carbonatées et roches cristallines), les modes de valorisation sont discutés dans la littérature technique relative à la valorisation des matériaux d'excavation des tunnels (par exemple: Descoedres *et al.*, 2002).

Dans le cas des terrains meubles, le mode de valorisation des géomatériaux dépend essentiellement de trois paramètres :

- le potentiel pollutif,
- la granulométrie,



- la teneur en eau.

Les problèmes pollutifs sont de deux types :

- Pollution anthropique : les géomatériaux peuvent avoir été pollués par les usages passés ou actuels du territoire, par pollution accidentelle ou par l'enfouissement de déchets. La LPE<sup>2</sup> impose aux cantons d'établir un cadastre des sites pollués. Ce cadastre est établi en plan. Avec les données accessibles au public, il est donc difficile d'établir la profondeur de pollution. Par ailleurs, les cadastres des sites pollués ne donnent pas directement d'information quantitative sur les concentrations de polluants. Aussi, la pollution anthropique n'est pas prise en compte directement comme indicateur du potentiel d'utilisation des géomatériaux, mais elle est indiquée dans l'outil spatial comme une contrainte possible ayant pour conséquence le passage au type de valorisation 6.
- Pollution de l'environnement par des géomatériaux pour des raisons géogènes. En Suisse, les principaux problèmes sont liés aux roches évaporitiques (gypse, anhydrite, roches à chlorures) et aux roches riches en sulfures. Ces roches sont classées en type 5.

La granulométrie et la teneur en eau influencent le comportement technique des géomatériaux et les éventuels traitements à mettre en œuvre pour leur valorisation.

Pour la granulométrie, un organigramme d'aide à la décision a été développé en synthétisant plusieurs normes et travaux (SN 670 120b, Houmard, 2004; OFEFP, 1999; Rochat *et al.*, 2006) (figure 7.1).

La teneur en eau joue un rôle important pour les matériaux avec une teneur en fines élevée, surtout pour distinguer les types 3 des types 4 de valorisation. Aussi, il est proposé d'utiliser l'indice de consistance pour déterminer le type de valorisation à mettre en œuvre. En effet, cet indice permet de bien distinguer l'état hydrique des matériaux moyennement et très argileux (Corte *et al.*, 2000). La norme ISO 14688-2 distingue six classes de consistance :

- liquide :  $IC < 0$
- très mou  $0 < IC < 0.25$
- mou  $0.25 < IC < 0.5$
- ferme  $0.5 < IC < 0.75$
- très ferme  $0.75 < IC < 1$
- dur  $IC > 1$

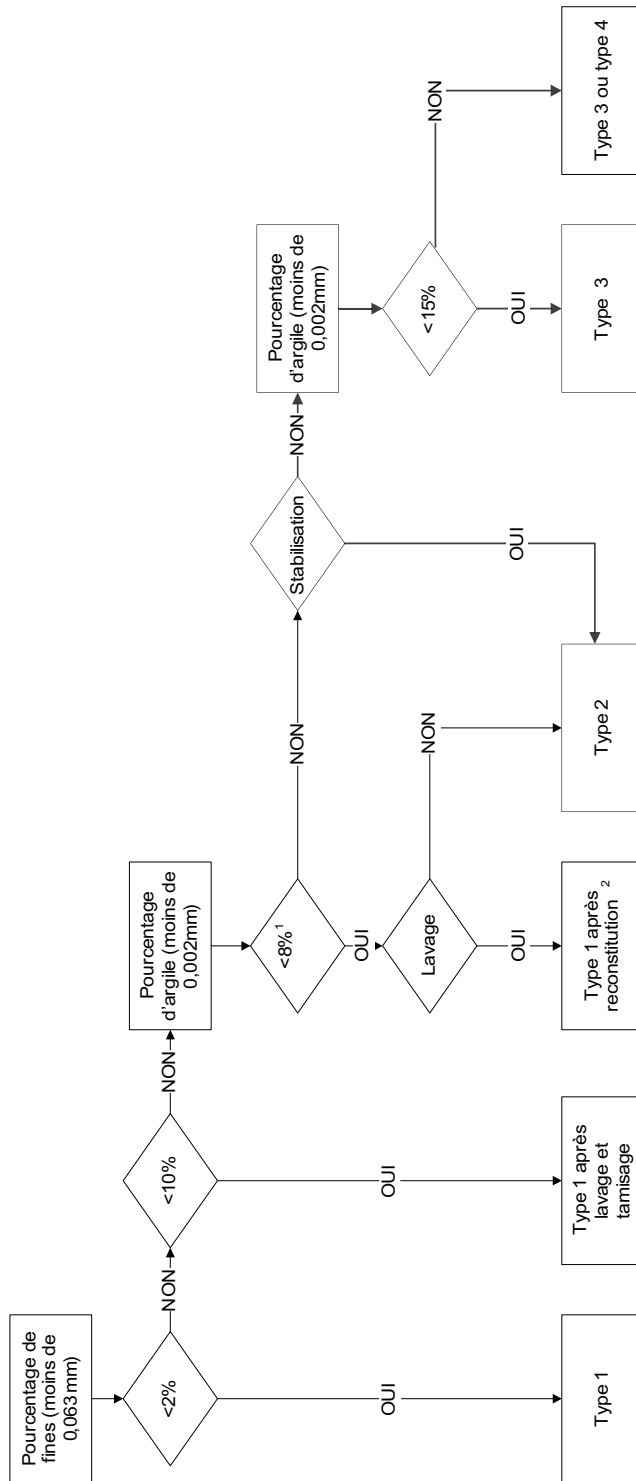
On considérera que pour les sols fins dont la classe de consistance est liquide ou inférieure ( $IC < 0,25$ ), la teneur en eau est telle que les matériaux ne peuvent plus être valorisés comme type 3 et doivent être valorisés comme type 4<sup>3</sup>.

### 7.1.2.2. Application

Les paramètres techniques des géotypes sont évalués sur la base de données statistiques (annexe E) et traduite en type de valorisation à l'aide de l'organigramme 7.1

2. Loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la Protection de l'Environnement

3. Si l'indice de consistance est évalué sur la base de données statistiques, il faut toutefois considérer que la teneur en eau n'étant pas un paramètre intrinsèque des terrains, le contexte hydrogéologique peut être déterminant.



¹ On distingue deux classes : 0-5% lavage approprié, 5-8% lavage encore approprié  
 ² Utilisation dans la réalisation de grave reconstituée ou de grave recyclée reconstituée (en complément de déchets minéraux de construction)

FIGURE 7.1.: Granulométrie et mode de valorisation des géomatériaux

et du critère de consistance. Dans la table 7.4, ces filières de valorisation sont comparées aux filières actuelles décrites par RoCHAT *et al.* (2006).

TABLE 7.4.: Filières de valorisation des différents géotypes de la géologie genevoise

En raison de la consolidation et de la cimentation des horizons plus anciens, APA sera plus facile à valoriser que FG. En raison des teneurs en argile, les moraines de fond MF sont plus faciles à valoriser que GL. L'horizon würmien étant moins consolidé et présentant des faciès moins argileux que le Riss, il sera plus facile de le valoriser.

Géo-type	Fines [%]	Argile [%]	Consistance	Usage actuel	Usage potentiel	Remarques
APA	9.5	0.5		Type 1	Type 1	
GL	85 à 91	22 à 33	Très ferme (6d/e1) Mou (6d/e2)	Mise en décharge	Type 3	
MF würm	33 à 50	6 à 10	Très ferme à dur	Type 2 ou mise en décharge	Type 1 ou type 2	Si valorisation en type 1, production importante de boues de lavage
FG	10	1		Type 1	Type 1	
MF riss	50	10	Très ferme	Type 2 ou mise en décharge	Type 1 ou type 2	Si valorisation en type 1, production importante de boues de lavage
MGr				Type 3 ou type 5	Type 3 ou type 5	Si présence de gypse, type 5

### 7.1.3. Ressource en eau souterraine

#### 7.1.3.1. Évaluation du potentiel

Les possibilités d'utilisation des ressources en eau souterraine dépendent de deux types de facteurs :

- Flux d'eau souterraine (décrit par la perméabilité, l'épaisseur de l'aquifère, le taux de renouvellement des eaux, etc.). Il détermine le débit qui pourra être exploité et la durabilité de cette exploitation.
- Composition physico-chimique et bactériologique. Elle détermine les types d'utilisation possibles. Elle dépend non seulement directement des valeurs des paramètres physico-chimiques, mais aussi de leur évolution et d'une manière plus générale de la vulnérabilité des aquifères.

En Suisse, la LEaux impose aux cantons de déterminer des instruments de protection des eaux. La détermination du potentiel des différents aquifères est un préalable à la mise en place de ces instruments de protection. Aussi, il est décrit de manière synthétique par la carte hydrogéologique et par les instruments d'aménagement du territoire relatifs à la protection des eaux et peut être traduit par la typologie hydrogéologique développée au chapitre 2.1.2 :

- Les aquifères Q3u et R3u sont destinés en priorité à l'eau potable dans le réseau principal de distribution
- Les aquifères Q2u et R2u sont également destinés à l'eau potable, dans le réseau principal de distribution, éventuellement pour des captages individuels.
- Les aquifères Q3 et R3 ainsi que Q2 et R2 sont utilisables pour les autres usages<sup>4</sup> :
  - réseau de distribution secondaire selon les ressources et les besoins de la ville,
  - besoins industriels,
  - géothermie par des systèmes ouverts.

### 7.1.3.2. Application

La transcription dans la typologie du chapitre 2.1.2 a été décrite précédemment (chapitre 6.2.2.3), on distingue :

- Les nappes principales du Genevois et du Rhône de type Q3u. La nappe du Genevois est exploitée pour l'eau potable, celle du Rhône ne fait actuellement pas partie des nappes principales destinées à l'eau de boisson (pour des raisons de besoins). Elle présente cependant un potentiel quantitatif intéressant et est protégée par un secteur B. Ces deux nappes sont des nappes formées dans des terrains fluvioglaciers (géotype FG).
- Les nappes superficielles peu épaisses. Ce sont les nappes de l'alluvion récente, dans le géotype APA (alluvions de plaines actuelles). Elles ne sont pas protégées par les secteurs de protection des eaux. Elles ne sont pas utilisées pour l'eau potable, car elles ont généralement une faible qualité physico-chimique (infiltrations d'eau de ruissellement, lixiviation de sites pollués, échanges avec les eaux de surface) et ont une faible transmissivité. Ces nappes sont du type Q2.

---

4. Pour ces aquifères, les possibilités plus détaillées d'usage dépendent des paramètres physico-chimiques et des usages escomptés (par exemple pour des eaux de process industriel, on peut vouloir éviter les eaux fortement minéralisées pour éviter la détérioration des installations). Cette évaluation de détail doit être réalisée à l'échelle du projet.

#### 7.1.4. Ressource en géothermie

Les systèmes géothermiques ouverts et fermés sont traités séparément. En effet, les premiers dépendent essentiellement du flux thermique advectif, donc des conditions hydrogéologiques alors que les seconds dépendent surtout du flux thermique conductif (chapitre 2.1.3).

##### 7.1.4.1. Systèmes géothermiques ouverts

###### Évaluation du potentiel

Les systèmes géothermiques ouverts nécessitent de pouvoir exploiter un flux d'eau par pompage. La puissance théorique d'une PAC<sup>5</sup> en fonction d'un débit est évaluée par la formule (figure 7.2) :

$$P = \Delta T \cdot Q \cdot \rho_c$$

P [J/s]	Puissance théorique de la PAC
Q [m <sup>3</sup> /s]	Débit pompé
$\Delta T$ [°K]	Différence de température entre l'entrée et la sortie de la PAC
$\rho_c$	Capacité thermique volumique de l'eau $\rho_c = 4,2E^6$ [J/m <sup>3</sup> .K]

Elle dépend ainsi du débit pompé et de la différence de température entre les eaux prélevées et réinjectées. En Suisse, cette différence ne doit pas produire une modification de la température des eaux de plus de 3°C à 100 m de l'installation. Pour une différence de température donnée, il est donc possible de relier le contexte hydrogéologique au potentiel d'utilisation de la ressource.

###### Application

En Suisse, dans les immeubles locatifs à isolation traditionnelle, les puissances de chauffage typiques sont de 50 à 70 [W/m<sup>2</sup>] (OFEN, 2000). À Genève, 50 % des bâtiments ont une surface de plancher comprise<sup>6</sup> entre 50 et 700 m<sup>2</sup>, soit des besoins de chauffage compris entre 2,5 et 50 kW. Ces besoins peuvent être couverts par des pompages compris entre 10 et 350 [l/min] (figure 7.2). Donc dans des aquifères de type Q2 ou Q3 (tables 2.1). Ainsi, les aquifères des géotypes APA et FG peuvent être utilisés pour exploiter les eaux souterraines à l'aide de doublets géothermiques.

---

5. Pompe À Chaleur

6. Surface calculée à l'aide des données du modèle géographique

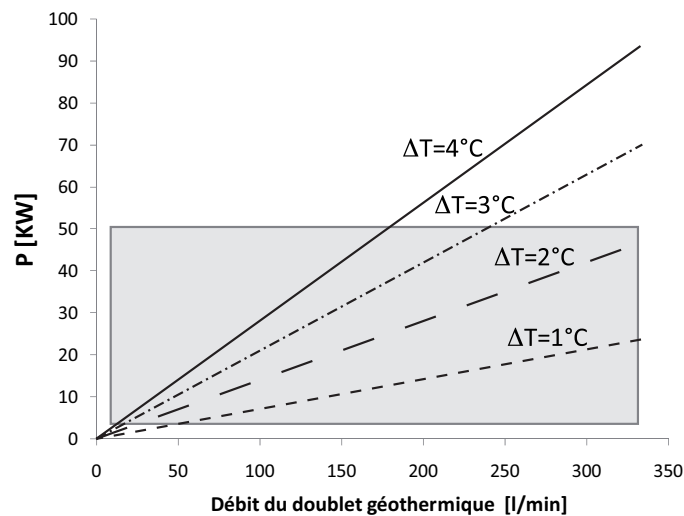


FIGURE 7.2.: Puissance théorique d'une PAC en fonction du débit du doublet géothermique

#### 7.1.4.2. Systèmes géothermiques fermés

##### Évaluation du potentiel

L'évaluation et la cartographie du potentiel d'installation de sondes géothermiques a fait l'objet de plusieurs études récentes (Colliard, 2004; Fujii *et al.*, 2007; Ondreka *et al.*, 2007; Signorelli, 2004). Les principaux indicateurs utilisés pour déterminer ce potentiel sont :

- l'altitude,
- la température à la surface du sol (ground surface temperature),
- la conductivité thermique du matériel géologique.

Signorelli (2004) a montré que la température annuelle moyenne à la surface du sol et la température annuelle moyenne de l'air sont corrélées. Par ailleurs, il existe une corrélation entre cette dernière variable et l'altitude (norme SIA 384/6, à paraître). En vue de ces corrélations, il semble possible de ne conserver qu'un des paramètres. L'altitude est un paramètre facile à cartographier en Suisse vu la couverture et la précision des modèles numériques de terrains. Cependant, à l'échelle urbaine, il existe généralement peu de différence d'altitude. Par exemple à Genève dans la zone urbaine considérée, la différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas est de 130 m, le point le plus bas étant à 365 m, le plus haut à 495 m. Pour une telle différence, la norme SIA 384/6 montre que la correction à apporter au calcul de rendement des ouvrages géothermiques est inférieure à 5 %. Pour cette raison, il semble raisonnable de ne pas retenir l'altitude comme un paramètre déterminant du potentiel géothermique dans des villes présentant peu de différences d'altitude (dans une ville avec une forte déclivité telle que Lausanne en Suisse, ce paramètre peut jouer un rôle plus important).

Vu les corrélations observées dans la littérature, la température de surface du sol n'est pas non plus considérée comme déterminante. On notera toutefois qu'en milieu urbain, l'effet d'îlot de chaleur peut avoir une influence sur ce paramètre. Il peut entraîner une augmentation de l'ordre d'une dizaine de degrés pour la température de l'air et de 3 à 4°C pour celle des eaux souterraines (Allen *et al.*, 2003). Nous ne disposons toutefois pas de données pour démontrer cette hypothèse.

Finalement, seule la conductivité thermique du matériel géologique est considérée comme un paramètre déterminant pour l'évaluation du potentiel des systèmes géothermiques fermés en milieu urbain.

Les ouvrages géothermiques ont une emprise verticale sur le territoire. Ils traversent donc plusieurs couches de terrain présentant des propriétés thermiques différentes. Ces propriétés résultant de la profondeur doivent être projetées en surface sur l'emplacement de la sonde pour évaluer son rendement. La chaleur étant exploitée le long de la sonde géothermique, une conductivité thermique équivalente sur une coupe peut être calculée comme étant la moyenne géométrique des conductivités (figure 7.3). Cette évaluation peut être réalisée pour plusieurs longueurs de sondes ou de géostructures énergétiques.

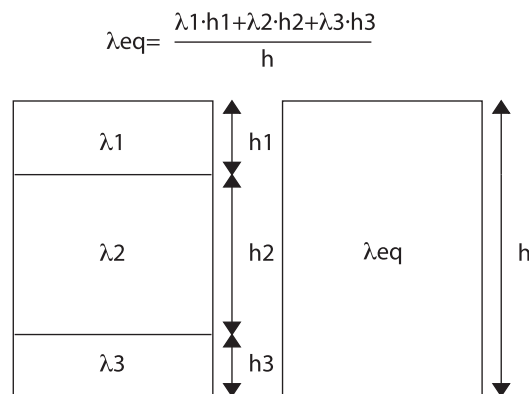


FIGURE 7.3.: Calcul de la conductivité thermique équivalente

Pour l'interprétation de ces valeurs, la norme allemande VDI 4640 distingue les conductivités thermiques :

- faibles  $\lambda < 1,5$  [ $W/m \cdot K$ ],
- normales  $1,5 < \lambda < 3$  [ $W/m \cdot K$ ],
- et élevées  $\lambda > 3$  [ $W/m \cdot K$ ].

Il existe une relation quasi linéaire entre la conductivité thermique et le rendement spécifique des ouvrages. Les abaques de la norme SIA 384/6 montrent que (tous les autres paramètres étant constants) :

- pour une conductivité thermique de 1,5 [ $W/m \cdot K$ ], le rendement spécifique est de 26 [ $W/m$ ],
- pour une conductivité thermique de 3 [ $W/m \cdot K$ ], il est de 43 [ $W/m$ ].

### Application

Les conductivités thermiques des géotypes caractéristiques de la géologie genevoise sont synthétisées à partir de plusieurs normes (SIA 384/6, SIA D025 et VDI 4640). Pour tenir compte de l'effet advectif, les valeurs hautes de conductivité sont retenues dans les terrains grossiers saturés. La table 7.5 présente ces valeurs. Les conductivités thermiques équivalentes sont cartographiées à l'aide du modèle d'information pour des profondeurs de sondes de 50, 100 et 150 m (figure 7.4). Cette cartographie met en évidence que pour les longueurs les plus courtes (donc également pour les géostructures énergétiques), les cibles géologiques les plus intéressantes sont les formations saturées des géotypes APA et FG. Pour des longueurs plus importantes, les ouvrages pénètrent généralement dans la molasse (géotype MGr). Cette dernière présente une forte conductivité thermique et rend intéressante la construction de sondes d'une longueur de 150 m et plus sur l'ensemble de la zone urbaine.

TABLE 7.5.: Conductivité thermique des différents géotypes

Géotype	Conductivité thermique [ $W/m \cdot K$ ]
APA (sec)	0,4
APA (saturé)	2
GL	1,4
FG (sec)	0,4
FG (saturé)	2
MF	1,8
MGr	2,2



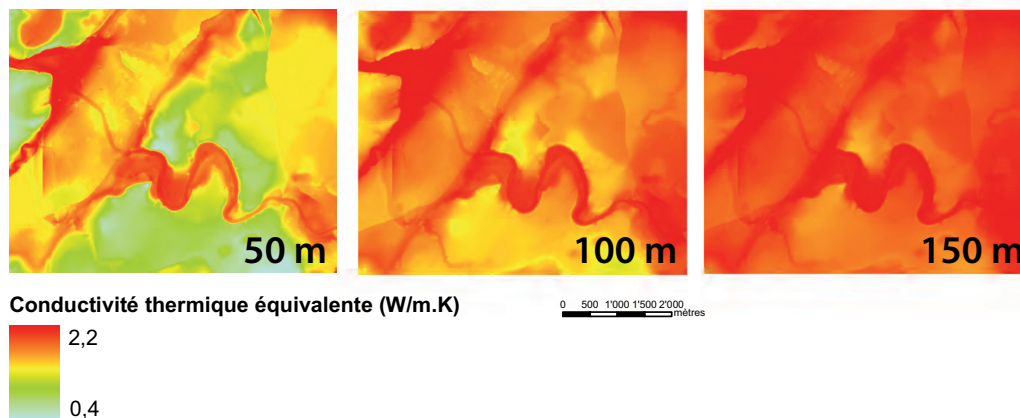


FIGURE 7.4.: Conductivités thermiques équivalentes dans la zone urbaine de Genève  
Cartes pour des sondes de 50, 100 et 150 m

## 7.2. Usages multiples des ressources du sous-sol urbain : conflits et synergies

Les conflits et synergies possibles entre les ressources du sous-sol urbain modifient leur potentiel réel d'utilisation. Les situations de conflits doivent être évitées, alors que l'exploitation des synergies peut rendre le sous-sol urbain plus attractif. L'analyse des interactions entre les usages du sous-sol a fait l'objet du chapitre 4 et les conditions légales, ainsi qu'une critique de ces conditions ont été présentées au chapitre 5.2.2. Dans ce chapitre, l'analyse des interactions et leur cartographie dans un contexte précis sont illustrées par le cas d'étude de Genève.

### 7.2.1. Analyse du contexte

#### 7.2.1.1. Géologie et hydrogéologie

Les usages des ressources du sous-sol et leurs interactions dépendent fortement du contexte, en particulier géologique et hydrogéologique. Le modèle d'information spatial permet d'évaluer ce contexte. Une coupe verticale traversant la zone urbaine et rencontrant l'ensemble des situations géologiques est réalisée et sert de base à l'analyse (figure 7.5 et 7.6).

On reconnaît sur la coupe (figure 7.6), les aquifères Q3u des nappes du Genevois et du Rhône (géotype FG) ainsi que l'aquifère Q2 des nappes superficielles des alluvions récentes (géotype APA). Il existe des zones de superposition des aquifères (indiquées sur la coupe). Des constructions traversant l'aquifère superficiel et la formation morainique de couverture dans ces zones de couverture pourraient entraîner une pollution de l'aquifère.

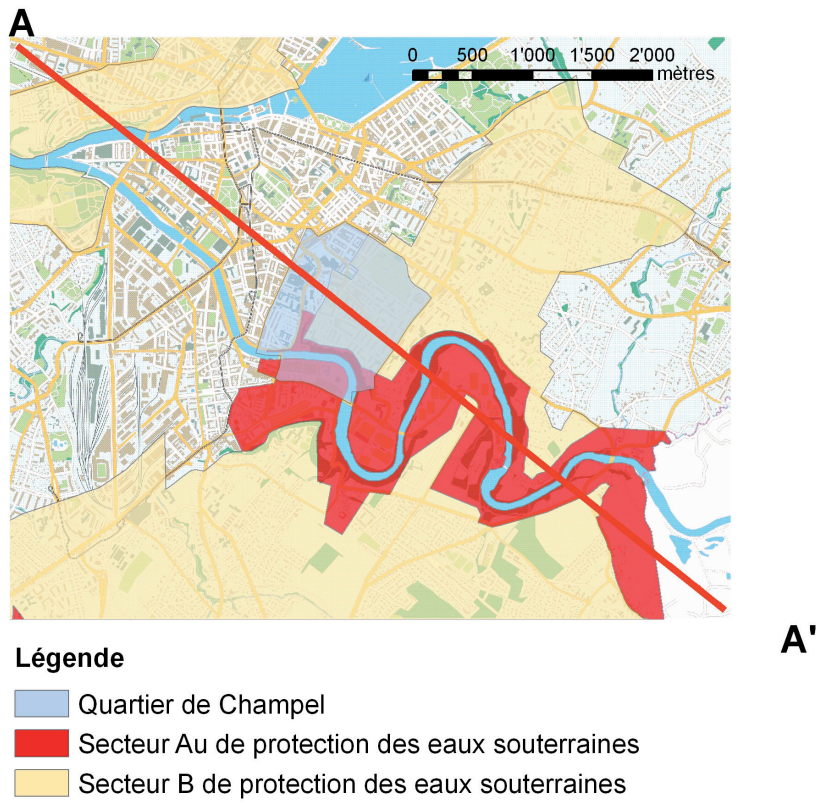


FIGURE 7.5.: Coupe à travers la zone urbaine

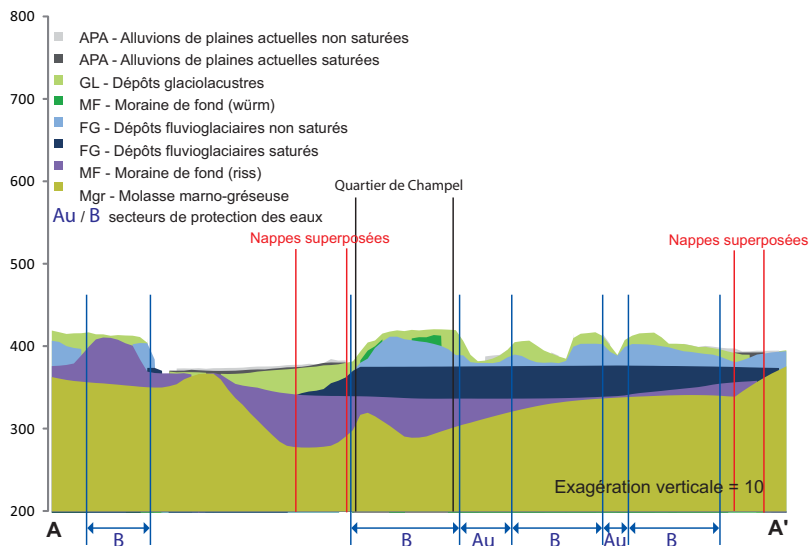


FIGURE 7.6.: Profil géologique selon l'axe AA' (figure 7.5)

Les eaux souterraines de l'aquifère Q3u sont bien protégées par une couverture morainique peu perméable, sauf dans les sillons de l'Arve. Elles sont protégées par un secteur B lorsque la couverture est présente, Au dans le cas contraire.

Ainsi, il existe des enjeux de préservation de la qualité et de la quantité des eaux pour les nappes des aquifères Q3u. Pour celles des aquifères Q2, il s'agit essentiellement de ne pas créer des conditions trop contraignantes pour les ouvrages souterrains (inondation, corrosion, etc.).

### 7.2.1.2. Dynamique des eaux souterraines

La dynamique des nappes phréatiques est un élément important à prendre en compte, la modification des niveaux phréatiques pouvant avoir des impacts importants sur les autres usages, en particulier les infrastructures construites dans les aquifères.

Les nappes des alluvions récentes sont peu épaisses (elles sont inférieures à 5 m sur la plupart du territoire et inférieures à 10 m au plus épais). Cet aquifère n'ayant pas fait l'objet de levés piézométriques suffisamment suivis dans le temps, il est difficile d'en appréhender les modifications sur le long terme. Toutefois, on peut noter que l'aquifère APA est en contact avec les eaux de surface et qu'il n'est pas exploité pour l'eau potable. Enfin, les formations aquifères non saturées sont peu épaisses. Aussi, des variations importantes de niveau sont peu probables dans ces formations.

L'aquifère des formations fluvioglaciales FG est nettement plus épais : son épaisseur moyenne est de 50 m et il dépasse localement les 80 m. La nappe du Genevois est exploitée par plusieurs puits pour l'eau potable. Depuis 1980, l'aquifère est rechargé artificiellement à la station de Vessy par injection d'eau de surface traitée. On dispose de mesures pour un piézomètre au droit du puits de Saconnex d'Arve (piézomètre 51 : 200 m au sud de la zone d'étude), depuis 1940 (figure 7.7). Les données de ce piézomètre font nettement apparaître la diminution des niveaux phréatiques des années quarante à quatre-vingts, puis un rebond et une stabilisation du niveau après la mise en place de la station de recharge en 1980. Le niveau actuel de la nappe est toutefois inférieur d'environ 4 m au niveau antérieur aux pompages.

La dynamique de la nappe du Genevois a également été approchée à l'aide du modèle numérique d'écoulement, afin de développer une vision à l'échelle de l'entier de l'aquifère. Un modèle « naturel » a été développé en supprimant les prélèvements et la recharge artificielle dans le modèle décrit au chapitre 6.2.2.3. Les simulations à l'équilibre (figure 7.8) montrent que dans une telle situation, le niveau augmenterait au maximum de 1,5 m (4,7 m de différence au droit du puits de pompage).

Finalement, on observe qu'actuellement, le niveau de la nappe du Genevois est relativement stabilisé, grâce à la gestion du stock par recharge artificielle. Les niveaux ne sont toutefois pas équivalents aux niveaux naturels. Les données à disposition montrent que cette différence est inférieure à 5 m. Aussi, les impacts liés à un fort rebond des niveaux phréatiques, tels qu'ils ont été observés dans certaines villes post-industrielles, semblent peu probables à Genève.

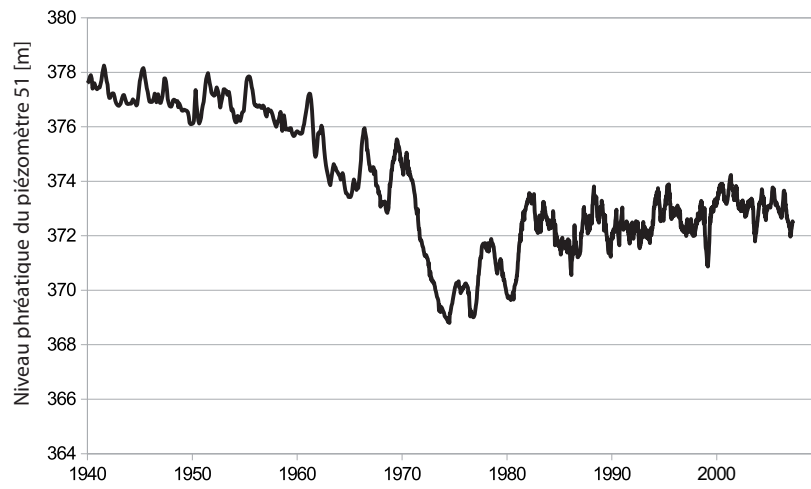
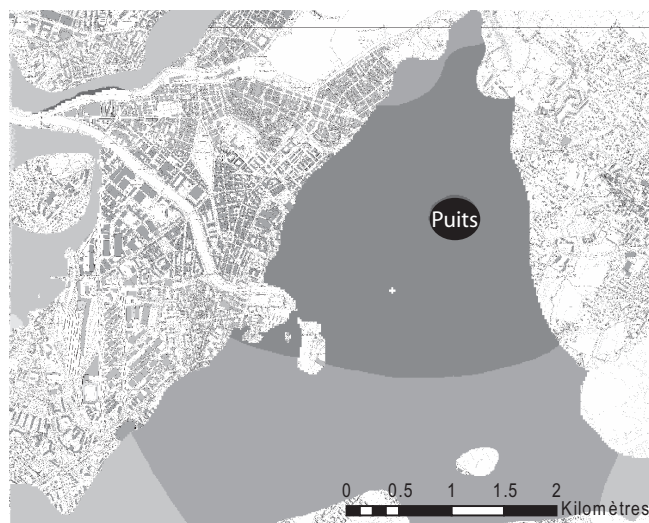


FIGURE 7.7.: Mesures piézométrique de longue durée



**Différence de niveau piézométrique entre le scénario naturel et le scénario anthropique (avec pompage et recharge) [m] - situation de hautes eaux**

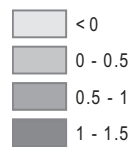


FIGURE 7.8.: Simulation de scénarios naturels et anthropiques

## 7.2.2. Compatibilité des usages

### 7.2.2.1. Conflits

À partir de l'analyse du contexte, de la table 4.10 et des diagrammes présentés en annexe C, des conditions de compatibilité entre les usages sont formulées et cartographiées. Les conflits sont exprimés en termes de niveaux de restriction. Quatre niveaux sont distingués : interdiction, forte restriction, restriction modérée et absence de restriction par analogie avec les recommandations de l'OFEV (voir annexe C). Ils sont présentés à la table 7.6.

TABLE 7.6.: Niveaux de restriction proposés et correspondance avec les recommandations de l'OFEV

Niveau de restriction	Correspondance OFEV
Interdiction	– Interdit
Forte restriction	– <sup>b</sup> Interdit ; l'autorité compétente peut admettre une dérogation, après examen du cas particulier. – <sup>n</sup> Interdit ; l'autorité compétente peut admettre une dérogation après examen du cas particulier, avec les restrictions et conditions signalées dans les notes correspondantes.
Restriction modérée	<i>b<sup>n</sup></i> Admis de cas en cas par l'autorité compétente, avec les restrictions et conditions signalées dans les notes correspondantes ; autorisation nécessaire en vertu de l'art. 32 OEaux. <i>b</i> Admis de cas en cas par l'autorité compétente ; nécessite une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux.
Absence de restriction	+ Sans problème du point de vue hydrogéologique ; ne nécessite pas une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux ; le respect d'autres prescriptions légales reste réservé. + <sup>b</sup> En principe sans problème ; autorisation nécessaire en vertu de l'art. 32 OEaux. + <sup>n</sup> Sans problèmes du point de vue hydrogéologique, avec les restrictions et conditions signalées dans les notes correspondantes ; ne nécessite pas une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux.

Les principales situations conflictuelles à prendre en compte lors de la planification des usages sont :

- interactions espace-eau,
- interactions géothermie-eau.

En effet, il n'existe pas de carrières ou de gravières, donc pas de risques de ce point de vue pour les eaux souterraines. Par ailleurs, les impacts directs de l'usage de la géothermie sur les ouvrages souterrains (modifications thermomécaniques, gel des terrains) sont des effets localisés liés à une gestion inadaptée des ouvrages géothermiques qui doivent être gérés à l'échelle du projet d'infrastructure.

Finalement, ce sont les conditions de compatibilité entre l'eau et l'espace et entre l'eau et la géothermie qui sont déterminées (tables 7.7 et 7.8).

Ces conflits sont ensuite transférés dans le modèle d'information spatial sous forme de cartes de restrictions. À partir de la table 7.7, à chacun des étages du modèle, une carte de compatibilité est dressée pour :

- les ouvrages ponctuels étanches,
- les ouvrages ponctuels non étanches (dans la nappe, ils sont considérés maintenus par pompage),
- les ouvrages linéaires horizontaux étanches,
- les ouvrages linéaires horizontaux non étanches,
- les ouvrages linéaires verticaux.

À partir de la table 7.8, à chacun des étages du modèle, une carte de compatibilité est dressée pour :

- les systèmes géothermiques fermés (sondes et géostructures énergétiques),
- les systèmes géothermiques ouverts.

Par ailleurs, l'implantation des systèmes géothermiques fermés étant réalisée depuis la surface, une carte de synthèse des conditions de compatibilité est dressée (figure 7.9). D'autres exemples des différentes cartes sont reportés en annexe H.

TABLE 7.7.: Conflits espace-eau souterraine : conditions de compatibilité

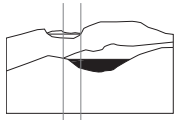
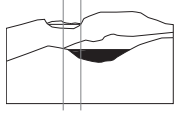
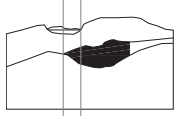
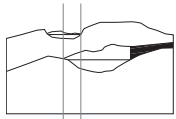
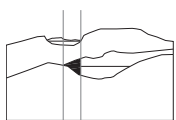
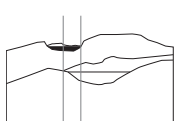
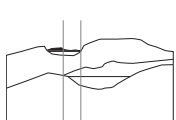
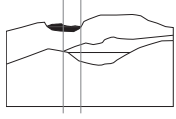
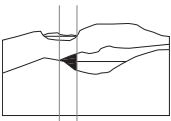
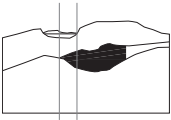
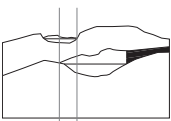
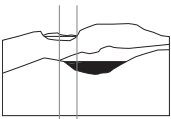
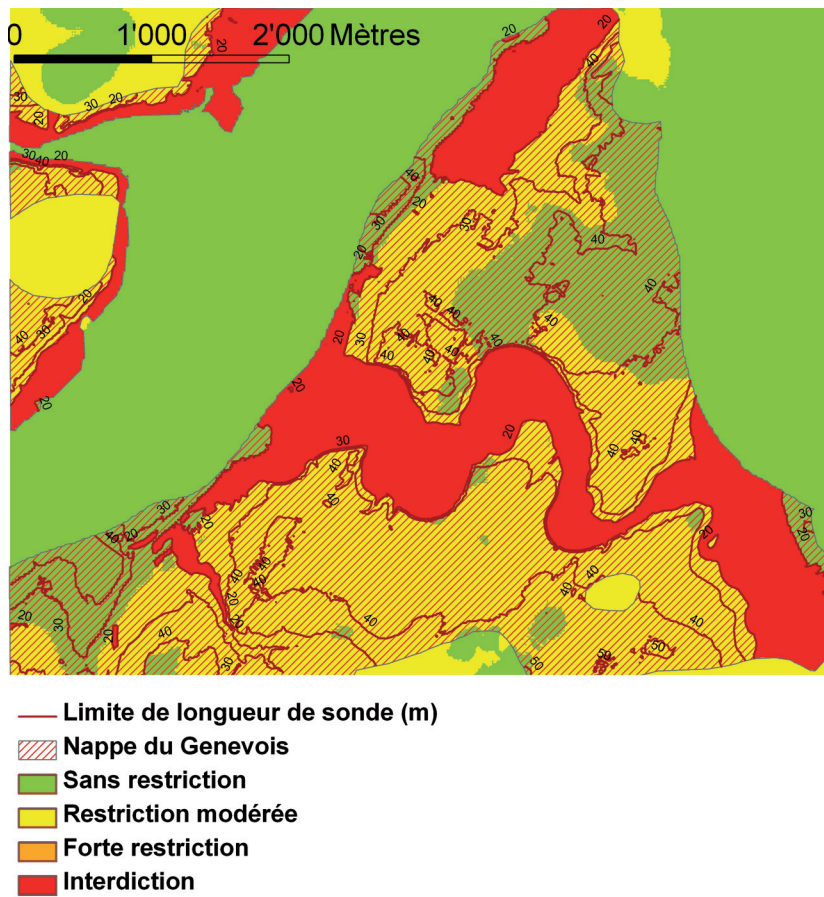
Conditions		Usage de l'espace	Restriction	Justification
Zone saturée de l'aquifère FG		Ouvrages non étanches maintenus par pompage	Interdiction	Risque de concurrence hydrogéologique, mobilisation de polluants
Zone saturée de l'aquifère FG		Ouvrages étanches	Forte	Effet barrage, pollution par les matériaux d'injection
Aquifère FG : nappe et zone superposée		Ouvrages ponctuels et linéaires verticaux	Forte	Infiltration d'eau de ruissellement
Zone non saturée de l'aquifère FG : pourtour de la nappe		Ouvrages ponctuels et linéaires verticaux	Modérée	Infiltration d'eau de ruissellement
Aquifère FG : zone de superposition des nappes		Ouvrages ponctuels et linéaires verticaux	Interdiction	Courts-circuits
Zone saturée de l'aquifère APA		Ouvrages non étanches maintenus par pompage	Modérée	Subsidence
Zone non saturée de l'aquifère APA		Ouvrages non étanches	Modérée	Infiltration dans les ouvrages par remontée de nappe
Aquifère APA		Ouvrages étanches	Modérée	Effet barrage et modification de la poussée d'Archimède

TABLE 7.8.: Conflits géothermie-eau souterraine : conditions de compatibilité

Conditions		Usage de la géothermie	Restriction	Justification
Aquifère FG : zone de superposition des nappes		Sondes et géostructures	Interdiction	Court-circuits
Aquifère FG : nappe et zone superposée		Sondes et géostructures	Interdiction	Risque d'infiltration d'eau de ruissellement, fuite du liquide caloporteur, effet barrage
Zone non saturée de l'aquifère FG : pourtour de la nappe		Sondes et géostructures	Modérée	Infiltration d'eau de ruissellement, fuites du liquide caloporteur
Nappe de l'aquifère FG		Doublets géothermiques	Interdiction	Modification de l'activité biologique et de l'équilibre chimique





### 7.2.2.2. Synergies

Dans la *zone urbaine* de Genève, les principales synergies à mettre en œuvre sont :

- la construction de géostructures énergétiques,
- la valorisation thermique des flux techniques,
- la valorisation des géomatériaux.

Les géostructures énergétiques doivent être réalisées lorsque le potentiel géothermique est normal ou élevé et que des ouvrages souterrains ou des ouvrages fondés en profondeur sont réalisés et sans restrictions trop élevées pour l'un ou l'autre des usages. Le potentiel de réalisation de cette synergie est ainsi obtenu par superposition des cartes de potentiel en espace, en géothermie et des cartes de restrictions.

La valorisation thermique des flux techniques devrait être évaluée lorsque des pompes techniques sont nécessaires. Toutefois, de tels pompes ayant un fort coût énergétique sur le long terme, une telle mesure ne devrait être favorisée que lorsque les pompes sont indispensables.

Le potentiel de valorisation des géomatériaux a été évalué précédemment. Cette synergie doit être mise en œuvre en favorisant la construction souterraine dans les terrains présentant le plus fort potentiel de valorisation des géomatériaux. Cette évaluation est réalisée en superposant le potentiel de construction d'ouvrages à celui de valorisation des géomatériaux.

## 7.3. Aide à la décision pour la planification des usages des ressources du sous-sol

De nombreux indicateurs et de nombreuses cartes ont été développés pour évaluer le potentiel des ressources du sous-sol et les interactions entre les usages. Ils fournissent un appui pour l'aide à la décision territoriale. En effet, l'utilisation de ces cartes et indicateurs permet de réaliser un diagnostic des potentialités offertes par le sous-sol avant le développement d'un projet urbain ou d'un projet d'aménagement. Toutefois, le nombre de critères et d'indicateurs à prendre en compte peut rendre le processus de décision difficile. En particulier lorsque pour un usage et un lieu donné certains paramètres sont optimaux alors que d'autres sont contraignants. Un décideur peut ainsi être amené à répondre à des alternatives du type :

- « Faut-il construire des ouvrages souterrains dans un terrain difficile à excaver, mais présentant de bonnes conditions pour l'exploitation de la géothermie et des géomatériaux ? »
- « Doit-on implanter un métro dans une zone de restriction forte pour les eaux souterraines, mais un terrain facile à construire et offrant des perspectives conjuguées d'exploitation de la géothermie ? »

Ces questions sont typiquement des prises de décision multicritère. Aussi, dans ce chapitre, des outils sont proposés pour appuyer cette analyse.

Un problème de décision multicritère peut être vu mathématiquement comme une optimisation du type :

$$\text{opt}\{g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x) : x \in A\}$$

A est l'ensemble des actions admissibles,  $g_i$  sont les fonctions critères à optimiser.

Toutefois, c'est un problème mathématique mal posé, car d'une part, il n'existe généralement pas d'action meilleure que toutes les autres sur l'ensemble des critères (Chakhar, 2006) et d'autre part, les critères sont généralement non commensurables<sup>7</sup> (Munda, 2004), il n'est ainsi pas possible de réduire objectivement le problème à une optimisation.

Ainsi, le processus d'analyse multicritère ne vise pas à fournir une solution unique et universellement meilleure que les autres au décideur, mais bien à le guider dans le processus de décision, dans l'expression de préférence et dans la réalisation de compromis. C'est une démarche qui permet en quelque sorte d'assumer les éléments subjectifs du processus de décision en les posant objectivement.

Parmi les méthodes multicritères en fonction de l'ensemble des actions A, on opère généralement une distinction entre les méthodes discrètes (le nombre d'actions est réduit à un nombre connu et limité) et les méthodes continues (grand nombre, voire nombre infini d'actions).

On distingue par ailleurs les méthodes par *critère unique de synthèse* des méthodes par *surclassement de synthèse*. Dans le premier cas, le processus d'aide à la décision consiste à transformer l'ensemble des critères en un critère présentant une échelle de mesure unique (rendre les critères commensurables). Le problème est ainsi réduit à la maximisation d'une fonction d'utilité. À l'opposé, les méthodes de surclassement proposent une agrégation à l'aide d'une relation binaire exprimée sous la forme : « si l'action a est au moins aussi bonne que l'action b alors a surclasse b ». Les méthodes de surclassement présentent l'avantage de ne pas nécessiter de transformation des échelles d'évaluation des critères, ces dernières pouvant par ailleurs être cardinales, mais aussi ordinales. En revanche, l'agrégation pouvant être partielle, elles ne produisent pas forcément une compensation complète de l'ensemble des critères. Par exemple, la comparaison d'une action très forte sur le plan économique et très faible sur le plan environnemental à une action très faible sur le plan économique et très forte sur le plan environnemental aboutira forcément à un résultat de préférence ou d'égalité avec une méthode de critère unique de synthèse (comparaison de deux actions moyennes si les critères ont des poids similaires), alors qu'à l'aide d'une méthode de surclassement, elle peut aboutir à considérer les deux actions comme incomparables. De nombreuses méthodes de structuration et d'agrégation de problématiques multicritères tant par synthèse que par surclassement ont été proposées dans la littérature (par exemple: Maystre *et al.*, 1994; Roy et Bouyssou, 1993; Saaty, 1980; Schärliig, 1996).

Les SIG sont de puissants outils pour évaluer les indicateurs permettant de mesurer la performance des différents critères dans les problématiques territoriales, en particulier pour évaluer l'adéquation d'un espace à recevoir certains usages. Leur intégration aux outils d'analyse multicritère a fait l'objet de nombreux travaux récents (Borouhaki et Malczewski, 2008; Joerin *et al.*, 2001; Malczewski, 1999, 2006; Marinoni et Hoppe, 2006; Thill, 1999).

---

7. Il n'existe pas de commune mesure pour les évaluer.

Des méthodes d'agrégation par critère unique de synthèse et par critère de surclassement de synthèse ont été implémentées. Toutefois, les dernières ne sont pas simples à intégrer dans un SIG pour une évaluation d'indicateurs variant de manière continue sur l'ensemble de l'espace. En effet, les méthodes de surclassement nécessitent de disposer d'un nombre restreint d'actions pour poser et évaluer le problème. Travailler sur un territoire discrétisé en de très nombreux éléments (par exemple, à l'aide d'une grille raster) pose ainsi des problèmes d'évaluation des relations de surclassement, mais aussi des problèmes de calcul, chaque action devant être comparée avec les autres (Marinoni, 2006). Ce problème peut être contourné par une agrégation du territoire. Certains auteurs ont ainsi développé des critères d'homogénéité, afin de réduire le nombre d'actions à comparer (Joerin *et al.*, 2001; Marinoni, 2006). Cette solution s'adapte toutefois mal au modèle de données par étage développé dans ce projet. En effet, elle nécessiterait de développer des critères d'homogénéité dans le plan pour chaque étage, mais aussi d'assurer la continuité des zones homogènes dans l'axe vertical. Une telle problématique serait vraisemblablement plus facilement mise en œuvre en utilisant un vrai modèle de données volumique (par exemple des voxels) qui permet d'assurer la continuité des données dans les trois dimensions.

Afin d'illustrer l'utilisation d'une démarche multicritère pour la valorisation des ressources du sous-sol, un exemple d'application est présenté à l'annexe I. Cette exemple fait appel à la méthode AHP<sup>8</sup>-OWA<sup>9</sup> selon l'implémentation proposée par Boroushaki et Malczewski (2008).

## 7.4. Du potentiel au projet urbain

La méthodologie d'évaluation des potentialités développée a fait l'objet d'une application dans le cadre d'un projet urbain en cours à Genève<sup>10</sup> : le réaménagement et le développement du périmètre Praille Acacias Vernets PAV. L'étude a été menée sur la base d'un Masterplan établi par le bureau Ernst Nicklaus Fausch et d'une étude synthétique des contraintes liées au sous-sol (étude du bureau BG Ingénieurs-conseils).

Le projet PAV consiste à transformer un quartier de 2  $km^2$  à vocation essentiellement industrielle en un « quartier central et contemporain, mélangeant emploi et logement et doté d'un environnement de qualité, notamment en matière de mobilité, d'espaces verts et d'équipements publics » (site internet du département du territoire de Genève, mars 2009). Un masterplan a été établi sur la base de cet objectif et propose de nombreuses interventions, les plus marquantes étant la construction de bâtiments de grande hauteur. Sur le plan géologique et hydrogéologique, le site est situé essentiellement sur des terrains morainiques de type glaciolacustres (GL) et est couvert d'un aquifère peu épais dans les formations des alluvions de plaines (APA) (figure 7.10).

Le sous-sol de la ville est relativement contraignant et ses qualités techniques pourraient compromettre la réalisation de certaines interventions. Toutefois, malgré ces contraintes,

---

8. Analytic Hierarchy Process

9. Order Weighted Average

10. Étude menée sous mandat du bureau BG Ingénieurs-conseils pour le GESDEC (référence: Blunier *et al.*, 2008)

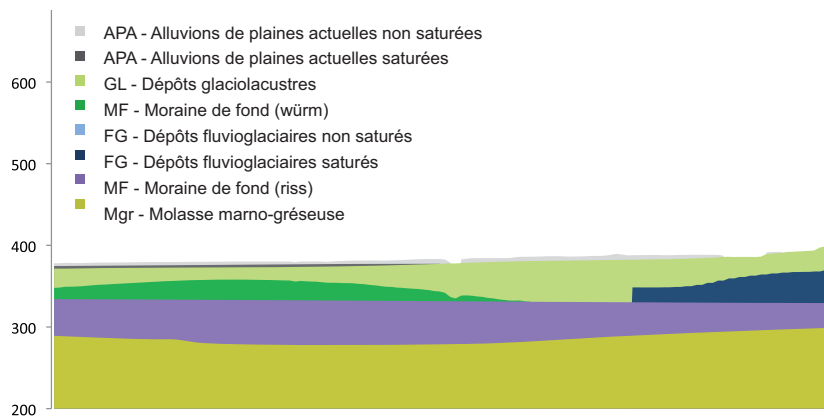


FIGURE 7.10.: Coupe géologique du PAV dans l'axe Nord Sud

l'analyse de l'ensemble des ressources et de leurs interactions a permis de faire apparaître des potentialités de développement et de mettre en évidence certains risques liés à l'interaction entre les ressources du sous-sol reportées ci-dessous de manière succincte :

- Espace : sur le plan géologique et géotechnique, on constate une prédominance de formations présentant une faible tenue des fouilles et demandant des mesures constructives spéciales, telles que la construction de blindages étanches. Malgré cela, il est très vraisemblable que plusieurs bâtiments du périmètre (en particulier ceux de grande hauteur) comporteront de nombreux étages en sous-sol pour des raisons de systèmes de fondation. Il existe un réel intérêt urbanistique et fonctionnel à relier ces étages en sous-sol (par exemple par une ou des galeries piétonnes). Une telle solution offrirait une opportunité intéressante de mise en place du concept de mixité fonctionnelle verticale et permettrait de relier des pôles d'échanges (une gare du CEVA et un important parking relais) ayant une emprise en souterrain.
- Géomatériaux : les développements du quartier devraient essentiellement produire deux grandes familles de matériaux : des matériaux graveleux valorisables en granulats et des matériaux morainiques et molassiques valorisables en remblais. Pour des raisons économiques et environnementales, un plan de gestion des matériaux d'excavation devrait être réalisé à l'échelle du quartier et en tenant compte de l'ensemble des possibilités de valorisation dans le canton.
- Eau souterraine : il existe une nappe superficielle de faible épaisseur. Cette nappe non protégée et proche de la surface ne peut pas être exploitée pour l'eau potable. Elle peut toutefois présenter un potentiel modeste pour les activités industrielles et pour l'exploitation thermique si des pompages sont rendus nécessaires pour des raisons techniques. Il est possible qu'au sud, le périmètre soit superposé à la nappe du Genevois, nappe du domaine public destinée à l'eau potable. Si tel est le cas, il conviendra de s'assurer que les développements de la ressource espace et géothermie n'altèrent pas la qualité ou le bilan hydrogéologique de la nappe.
- Géothermie : les conditions du secteur sont favorables à l'exploitation de la géothermie pour l'implantation de sondes et de géostructures énergétiques. Sur le périmètre PAV,

il est probable que plusieurs bâtiments feront appel à des fondations profondes. Pour ces derniers, la solution des géostructures énergétiques devrait être systématiquement évaluée. Enfin, si des pompages techniques doivent être réalisés (par exemple pour des questions géotechniques), il conviendra d'évaluer la pertinence d'en exploiter le flux thermique.

Cette application de la méthodologie développée a permis de mettre en évidence l'intérêt des ressources du sous-sol pour des projets urbains. Elle montre également la nécessité d'appréhender les ressources du sous-sol, leurs potentialités et leurs contraintes comme préalable au projet urbain. Même s'il ne présente à priori pas de fort développement en sous-sol, le projet de développement territorial peut bénéficier d'opportunités pour mettre en œuvre des synergies d'usage ou exploiter des ressources locales au lieu de les importer, mais il peut également se trouver fortement contraint par le contexte du sous-sol (conditions géologiques et hydrogéologiques, pollution des sites, etc.).

## 7.5. Synthèse du chapitre

La traduction de l'information spatiale, en particulier les modèles numériques d'altitude géologiques et hydrogéologiques, en cartes et indicateurs de potentialité, permet de réaliser un diagnostic des ressources du sous-sol pour le développement territorial et de fournir des données de base aux planificateurs et gestionnaires urbains. Une approche en deux étapes a été développée :

- Analyse du potentiel ressource par ressource sur la base d'indicateurs spécifiques et sans tenir compte des autres usages. Le potentiel en espace est décrit à partir de paramètres géotechniques et géologiques selon une approche de pondération par des experts. Celui des géomatériaux est traduit en classes de valorisations en fonction essentiellement de la granulométrie et de la teneur en eau. La cartographie hydrogéologique est transcrite en potentiel à l'aide de la typologie exposée au chapitre 2.1.2. Enfin, le potentiel géothermique est exprimé à partir du contexte hydrogéologique (systèmes ouverts) et de la conductivité thermique du matériel géologique (systèmes fermés).
- Analyse des usages multiples. Les interactions analysées au chapitre 4 sont traduites en conditions de restriction et de synergies en se basant sur les contraintes légales, lorsqu'elles existent (chapitre 5.2.2). Elles sont ensuite cartographiées dans le contexte de la ville étudiée.

Les indicateurs et critères développés aident la prise de décision pour la mise en valeur des ressources du sous-sol en milieu urbain. Ces processus de décision sont typiquement des processus multicritères. Aussi, une approche combinant les outils multicritères et les SIG est proposée et testée.

La démarche développée dans ce projet a pu être appliquée à un projet de développement territorial dans le canton de Genève. Cette application met en évidence les potentialités offertes par les ressources du sous-sol pour des projets qui, à priori, n'en planifiaient pas la mise en valeur. Elle traduit aussi la nécessité de réaliser un diagnostic des ressources du sous-sol en préalable au projet territorial et d'intégrer les professionnels (géologues et

ingénieurs) aux échelles fonctionnelles urbaines et non plus seulement à l'échelle du projet de construction. Une telle intégration permet en effet de faire apparaître de nouvelles possibilités pour le développement de la ville et d'éviter de planifier des projets qui ne sont pas compatibles avec les conditions physiques du sous-sol.





## *Conclusion et perspectives*

### **8.1. Synthèse générale**

Ce projet de recherche est fondé sur une vision originale du sous-sol comme réservoir de quatre grandes familles de ressources dont les usages interagissent.

Les itinéraires de développement de cinq villes ayant intensément exploité les ressources de leur sous-sol, Mexico, Paris, Helsinki, Tokyo et Montréal ont été décrits et analysés. Ils mettent en évidence le rôle important des ressources du sous-sol dans le métabolisme des villes. Ces ressources ont permis aux villes étudiées d'assurer leur croissance et ont offert des solutions à la densification et à la modernisation du tissu urbain. Toutefois, l'absence de coordination et la prédominance de l'approche sectorielle (une approche qui tient compte uniquement des besoins pour une ressource à un moment donné) ont eu pour conséquence de nombreux conflits d'usage et un gaspillage de ressources sur le long terme.

À partir de ce constat, il nous apparaît nécessaire de prendre en compte le sous-sol comme un système au sein duquel les ressources interagissent. Les interactions ont été étudiées par couples de ressources dans un cadre d'analyse systémique. Elles sont souvent conflictuelles et leur prise en compte est indispensable pour éviter les incompatibilités d'usage. Les interactions impliquant l'eau souterraine sont particulièrement importantes : d'une part en effet cette ressource est très vulnérable, d'autre part, en raison de la dynamique des eaux, les échelles spatiales et temporelles des impacts négatifs peuvent largement dépasser celles des interventions. Il existe aussi entre les ressources des synergies d'usage dont une meilleure mise en valeur permettrait de rendre les usages du sous-sol plus efficaces sur le plan environnemental comme sur le plan économique.

Les processus d'aménagement du territoire visent à organiser la répartition des activités humaines en conciliant les intérêts des trois pôles du développement durable. Ils s'appuient sur des processus stratégiques permettant de développer une vision du développement territorial souhaité et traduisent cette vision dans des plans et des outils réglementaires. À l'heure actuelle, les ressources du sous-sol sont peu intégrées dans ces processus. Par cette recherche, nous formulons une proposition pour tenir compte de ces ressources dès la phase de diagnostic. Elle permet d'inverser le paradigme actuel qui

procède des besoins aux ressources. En effet, aujourd'hui le potentiel des ressources du sous-sol n'est évalué que sectoriellement pour un besoin donné, à l'échelle du projet de construction. Une évaluation menée dans le cadre des projets de développement territorial permettra de prendre en compte l'ensemble des possibilités offertes par le sous-sol, d'éviter les conflits et de mettre en valeur les synergies.

Il a été développé une démarche pratique pour appuyer la planification territoriale. Le sous-sol est connu des spécialistes que sont les géologues et les ingénieurs, mais cette connaissance est mal transférée auprès d'autres acteurs et souffre d'un fractionnement des informations. Aussi, notre démarche s'appuie sur un outil de type Système d'Information Géographique et des approches de modélisation 3D de la géologie et de l'hydrogéologie. Des processus de transformation des données de base en informations cohérentes et synthétiques sont proposés. Les informations spatiales sont exploitées pour développer des indicateurs reflétant le potentiel de chaque ressource, mais également les conflits et synergies possibles entre les usages. L'ensemble des cartes et indicateurs développés permet ainsi d'appuyer la prise de décision pour la valorisation des ressources du sous-sol dans le cadre du développement urbain.

Notre démarche permet de mieux intégrer le sous-sol urbain dès le début des projets territoriaux. Elle impose d'adopter une approche pluridisciplinaire et d'intégrer les professionnels du sous-sol plus tôt dans les processus d'aménagement. Le test de la méthodologie sur la ville de Genève, en particulier pour un projet de rénovation urbaine dans le quartier Praille-Acacias-Vernets, a montré qu'elle est applicable avec des données et des outils existants et maîtrisés par les milieux professionnels. Il met aussi en évidence la pertinence qu'il y a à tenir compte du sous-sol dès l'étape de diagnostic du territoire. Il est ainsi possible de faire apparaître de nouvelles potentialités, d'éviter les conflits d'usage et de concevoir des projets urbains cohérents avec les conditions physiques du sous-sol.

## 8.2. Discussion et conclusion

Au terme de ce projet, l'intérêt des ressources du sous-sol pour le développement de la ville semble évident. Elles participent à son métabolisme et lui offrent de nouveaux « horizons » de développement pour assurer une densification qualifiée du tissu urbain. Le paradigme des *ressources multiples* exprimé en introduction et développé tout au long de cette recherche est un nouveau cadre pour analyser les expériences passées, mais surtout pour mettre en valeur les ressources du sous-sol d'une manière plus durable. Une telle mise en valeur ne demande pas tant de développer de nouvelles connaissances ou de nouveaux outils, que de construire des projets urbains réellement transdisciplinaires dans lesquels les spécialistes de l'aménagement et du développement territorial et ceux du sous-sol échangent et construisent ensemble. De nombreux choix sont en effet posés dans la construction des stratégies d'aménagement. Cela permettra de remédier à la situation actuelle où les spécialistes des domaines techniques sont souvent appelés uniquement à commenter et éventuellement valider les stratégies, mais pas à les construire.

Cette recherche a été menée selon une démarche empirique : les hypothèses et le cadrage théorique, largement dérivés de la systémique, ont été confrontés aux expériences menées

dans plusieurs villes. Cette démarche a mis en évidence la pertinence d'adopter une vision transversale du sous-sol qui prend en compte l'ensemble de ses ressources. À ce titre, il a été montré que les conflits entre les usages jouent un rôle déterminant dans les possibilités de valorisation durable du potentiel du sous-sol et que les synergies peuvent offrir des occasions d'augmenter le bénéfice tiré de ces ressources, occasions trop rarement saisies. Dans la dernière partie de la recherche, une démarche pour établir un diagnostic du potentiel ressource du sous-sol est développée. Cette démarche est inspirée et validée par un même cas d'étude : Genève. Ce choix méthodologique est motivé par la volonté d'approfondir l'analyse d'un cas extrêmement riche par son contexte géologique et urbain dans un cadre temporel restreint. Il n'en demeure pas moins une limite dans la validation de la démarche. Toutefois, sans pouvoir strictement le démontrer, on peut affirmer que notre méthodologie présente un potentiel important de reproductibilité. En effet :

- L'analyse s'appuie sur un cadre théorique validé par des expériences dans de nombreuses villes.
- La ville de Genève présente des contextes géologiques et urbains variés. En particulier toutes les ressources sont présentes et exploitées, cette situation permet de disposer d'une palette de situations (déterminantes notamment pour évaluer les conditions d'interactions) très importante. Enfin, sur le plan géologique, le contexte est typique du Plateau, dans lequel se trouvent la plupart des grandes villes suisses.
- La méthodologie est fondée sur des outils et des données existants et maîtrisés, ce qui en assure l'applicabilité.
- La démarche proposée a été soumise à l'expertise de pairs et de spécialistes. En particulier, lors de l'étude du projet PAV, la méthodologie a été confrontée aux expériences de praticiens et a bénéficié de leur validation. Par ailleurs, cette confrontation a mis en évidence un parallélisme important entre notre méthodologie et les nouvelles démarches développées par ces praticiens pour répondre aux enjeux environnementaux du développement territorial.

Par ailleurs, notre démarche ouvre un renversement de paradigme fort, en proposant de procéder des ressources aux besoins et non plus l'inverse. La mise en application de ce changement est toutefois moins linéaire et tranchée que n'en laisse paraître l'énoncé (notamment, les potentialités des ressources sont évaluées en fonction de leurs usages, donc des besoins auxquels elles répondent). Cependant, la volonté de procéder à un diagnostic du contexte et des potentialités offertes par le sous-sol, en préalable à la mobilisation de ces ressources pour le développement territorial, est une proposition nouvelle qui demande un réel changement de philosophie tant dans la manière de considérer et d'exploiter les richesses du sous-sol urbain que dans celle de développer les projets d'aménagement du territoire.

La transdisciplinarité a été recherchée tout au long du projet Deep City et de cette recherche doctorale. Elle s'est exprimée dans la construction d'un comité de projet regroupant des aménagistes, des techniciens et des spécialistes des sciences humaines. Elle s'est poursuivie dans des échanges multiples avec des professionnels. Ces échanges ont fait germer de nouvelles pistes de recherches au travers des connaissances et des expériences des interlocuteurs rencontrés. Généralement, l'intérêt porté à notre démarche et les attentes manifestées ont été un fort encouragement. Certains échanges ont également été l'occasion de remise en question. Parmi celles-ci, une question nous semble

particulièrement intéressante à commenter :

Existe-t-il un réel besoin de mieux prendre en compte le sous-sol dans le contexte des villes suisses ?

Cette remise en question s'appuie essentiellement sur le fait que la Suisse est composée de petites villes en comparaison internationale et qu'actuellement leur sous-sol reste peu exploité. Même si ces deux affirmations sont globalement vraies, notre réponse reste manifestement positive.

D'une part, le tissu urbain change. Les villes suisses sont petites, mais elles sont relativement denses et appelées à le devenir encore plus dans le cadre des politiques territoriales contemporaines. Par ailleurs, l'augmentation de la pression en direction du sous-sol est manifeste. Les transports publics urbains qui représentent un défi important du développement territorial se tournent de plus en plus vers le sous-sol. À Zurich, le réseau de U-Bahn a connu un fort développement ces dernières décennies, Lausanne est l'une des plus petites villes du monde à disposer d'un métro souterrain et Genève avec le CEVA disposera aussi d'un transport en commun souterrain de grande capacité. Si la pression actuelle sur l'espace souterrain n'est pas aussi forte que dans d'autres grandes villes, elle est croissante et les villes étudiées montrent que le développement d'un réseau souterrain fort peut avoir lieu dans de courtes périodes de temps. Aussi, il semble particulièrement important d'anticiper ces développements. Le fait que l'espace souterrain ait été relativement peu utilisé jusqu'à nos jours est un atout. Cette situation permet de construire des projets en accord avec le développement durable en évitant les contraintes et conflits d'usage du passé. Par ailleurs, le sous-sol offre des alternatives pour développer la ville tout en préservant les richesses du territoire suisse, en particulier son paysage.

Enfin, l'espace souterrain n'est pas la seule ressource du sous-sol. Avec la taille et la forme des villes que nous connaissons aujourd'hui en Suisse, les autres ressources jouent un rôle important pour le fonctionnement de la ville et ce rôle s'accroîtra à l'avenir. Les enjeux énergétiques actuels montrent que le modèle de métabolisme linéaire dans lequel la ville importe l'essentiel de ses ressources et exporte l'essentiel de ses déchets n'a pas d'avenir. Il est nécessaire de repenser nos consommations de ressource en réduisant, réutilisant et recyclant ce qui peut l'être. Les projets urbains modernes, tels que les écoquartiers sont une illustration de ces possibilités. Une meilleure connaissance et une gestion coordonnée des possibilités offertes par le sous-sol est un appui important pour mettre en œuvre ces nouvelles solutions urbaines.

Le travail mené en collaboration avec l'ARE pour intégrer le sous-sol dans la nouvelle Loi fédérale sur le Développement Territorial offre de nouvelles perspectives pour le développement du sous-sol en Suisse. Le document en consultation au moment de la rédaction de ce travail introduit pour la première fois le sous-sol (ainsi que l'approche des *usages multiples* citée dans le rapport d'accompagnement), dans l'aménagement du territoire suisse. Les richesses du sous-sol offrent de nouvelles perspectives pour développer des usages originaux et de nouvelles formes urbaines permettant d'évoluer vers un développement durable.

## 8.3. Perspectives et recommandations

### 8.3.1. Pour la pratique

La méthodologie développée et testée montre que le transfert vers les milieux professionnels est possible et souhaitable dès aujourd'hui. Dans cette perspective, nous formulons les recommandations suivantes :

**Mieux intégrer les problématiques du sous-sol et leurs spécialistes aux processus de développement territorial dès la phase de conception des stratégies.** Cette recommandation a été abondamment commentée ci-dessus.

**Améliorer la connaissance et la diffusion des informations sur les ressources du sous-sol.** Les géodonnées de base sur la géologie, l'hydrogéologie et le milieu construit sont et resteront vraisemblablement acquises, surtout dans le cadre de projets de construction. Leur mise en commun permet de développer une information qui dépasse l'échelle du projet et s'avère très précieuse pour l'aménagement du territoire. À Genève, l'existence d'une importante base de données de forages a été un atout majeur pour développer et appliquer notre démarche. La collecte et la mutualisation de ces données assurées par les autorités (ou d'autres acteurs à même de les prendre en charge) devraient être systématisées et devraient intégrer de plus en plus d'informations sur la géométrie tridimensionnelle du milieu naturel, mais aussi construit. C'est une étape nécessaire pour mettre en œuvre la démarche proposée et assurer le transfert vers une gestion volumique de l'information spatiale, mais aussi du territoire.

**Promouvoir les synergies d'usage.** Les usages combinés de plusieurs ressources au sein d'un même projet (par exemple espace et géothermie) offrent des possibilités nouvelles pour développer des projets plus respectueux de l'environnement et plus efficaces sur le plan économique. Les bases légales suisses ne permettent pas de systématiser leur prise en compte. Aussi, un cadre incitatif devrait être mis en place. Il peut s'appuyer sur des outils réglementaires, économiques et sur une meilleure information sur les possibilités techniques d'usages combinés.

### 8.3.2. Pour la recherche

Ce projet a couvert une problématique large et transdisciplinaire. Il ouvre de nouvelles pistes de connaissance et de réflexion et fait apparaître des besoins pour développer des méthodologies et des outils qui permettent une gestion plus efficace du sous-sol. Aussi, les perspectives de recherche sont très nombreuses. Quatre d'entre elles nous semblent particulièrement porteuses :

**Améliorer la gestion volumique de l'information spatiale.** La notion de volume est en plein développement dans les sciences de l'information spatiale. Les modèles de données qui sont proposés peuvent faciliter la gestion des ressources du sous-sol. Si les possibilités actuelles restent limitées pour la pratique, celles que l'on peut entrevoir pour le futur sont riches. Un modèle de données 3D permettrait de mieux collecter, représenter et visualiser les informations géologiques, hydrogéologiques et construites, d'éviter la redondance des données et d'offrir des possibilités d'analyse spatiale beaucoup plus larges. À moyen terme, l'utilisation de tels outils par les praticiens peut faire apparaître de nouvelles options de gestion du territoire et aider à sortir d'une approche de plans et d'aires de gestion ou d'affectation, pour aller vers des outils tridimensionnels tels que des volumes d'affectation par exemple.

**Mieux comprendre les processus d'échelle.** Cette perspective de recherche est double :

D'une part, il apparaît intéressant de mieux appréhender les possibilités et contraintes qu'offrent les ressources du sous-sol à des échelles urbaines différentes des grandes villes suisses. De futures études pourraient porter sur des villes plus grandes, en particulier les mégapoles, comme sur des villes plus petites, par exemple les villes secondaires.

D'autre part, afin de quantifier les impacts des interactions entre les usages, il serait intéressant de mieux quantifier les phénomènes de multiplications des interventions. En effet, certains impacts sont acceptables lorsqu'ils sont exceptionnels (par exemple la construction d'un tunnel dans une zone non saturée d'aquifère), mais peuvent devenir critiques lorsqu'ils sont multipliés (de nombreux ouvrages dans la même zone non saturée). Améliorer cette connaissance permettrait de fixer des valeurs cibles d'interaction plus précises et aiderait les décideurs à arbitrer les différents usages possibles.

**Quantifier le métabolisme du sous-sol urbain.** Les ressources du sous-sol répondent aux besoins de la ville. En surface, la quantification de ce métabolisme est un sujet important de recherche. Les données sur le souterrain restent souvent lacunaires. Mieux quantifier ces flux de matière, d'eau, d'énergie et d'espace permettrait d'identifier les sources et les usages et de développer des approches de gestion plus efficaces. Enfin, une telle connaissance permettrait de fournir les données de base pour réaliser les modèles de dynamique des systèmes, dont l'utilisation a été introduite dans ce travail.

**Recenser et analyser les expériences d'usage des ressources du sous-sol.** Les projets d'exploitation des ressources du sous-sol sont souvent originaux par les technologies qu'ils mettent en œuvre, les possibilités d'usages combinés ou les contraintes qu'ils font apparaître. Recenser et analyser ces projets permettrait d'améliorer les connaissances et de diagnostiquer les « bonnes » ou « mauvaises » pratiques de gestion et ainsi inspirer de futurs projets urbains. Un observatoire du sous-sol urbain comprenant des chercheurs, des praticiens et des décideurs pourrait assumer ce rôle et encourager des démarches pilotes.

## Bibliographie

- ALLEN, A., MILENIC, D. et SIKORA, P. : Shallow gravel aquifers and the urban heat island effect : a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics*, 32(4-6):569–578, 2003.
- ALLEN, D., GHOMSHEI, M., SADLER-BROWN, T., DAKIN, A. et D., H. : The current status of geothermal exploration and development in Canada. *In Proceedings World Geothermal Congress*, Kyushu - Tohoku, Japan, 2000.
- ANTTIKOSKI, U. V., NIINI, T., YLINEN, J. et RUOPPA, A. : Bedrock resources and their use in Helsinki. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9(3):365–372, 1994.
- ANTTIKOSKI, U. V. et RAUDASMAA, P. J. : Geotechnical maps of Helsinki and their use in tunnel planning. *Underground Space*, 8(4):282–285, 1984.
- APEL, M. : *A 3D geoscience information system framework*. Thèse de doctorat, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Geotechnik und Bergbau, 2004.
- APEL, M. : From 3D geomodelling systems towards 3D geoscience information systems : data model, query functionality, and data management. *Computers & Geosciences*, 32(2):222–229, 2006.
- AVELINE, N. : Tokyo, métropole japonaise en mouvement perpétuel. *Géoconfluences*, 2006.
- BARBIER, E. : Geothermal energy technology and current status : an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2):3–65, 2002.
- BARKER, J. A. et LAWRENCE, A. R. : A simple model of leakage induced by deep pumping and its application to pollution beneath a city in Thailand. *Hydrogeology Journal*, 16(3):407–417, 2008.
- BARLES, S. : Urban metabolism and river systems : An historical perspective - Paris and the Seine, 1790-1970. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(3):1845–1878, 2007.
- BARLES, S. : Underground space and urban planning. *In 6th conference on Underground Space and Urban Planning*, Paris, 1995.
- BARLES, S. : City planning and underground space in 20th and 21th century France. *In Going underground, excavating the subterranean city*, Manchester, 2006. Unpublished draft version.
- BARLES, S. et JARDEL, S. : L'urbanisme souterrain : étude comparée exploratoire. Rapport de recherche, 2005.

- BATESON, G. : *La nouvelle communication*. Seuil, Paris, 1981.
- BÉDARD, K. : La construction de modèles géologiques 3D à l'ère de la normalisation. Mémoire de D.E.A., Université Laval, Québec, 2006.
- BERGERON, M. : Vocabulaire de la géomatique. Cahier de l'office de la langue française, 1993.
- BESNER, J. : Génèse de la ville intérieure de Montréal. Rapport de recherche, 1997.
- BESNER, J. : The sustainable usage of the underground space in metropolitan area. *In Conference of the Associated research Centers for Urban Underground Space*, Torino, 2002.
- BICKEL, J. O., KUESEL, T. R. et KING, E. H. : *Tunnel engineering handbook*. Chapman & Hall, New York, 1996.
- BIRKLE, P., RODRÍGUEZ, V. T. et PARTIDA, E. G. : The water balance for the basin of the valley of Mexico and implications for future water consumption. *Hydrogeology Journal*, 6(4):500–517, 1998.
- BLUNIER, P., TACHER, L. et PARRIAUX, A. : Systemic approach of urban underground resources exploitation. *In 11th ACUUS conference*, Athens, 2007.
- BLUNIER, P., PIGUET, P. et PARRIAUX, A. : Praille Acacias Vernets - Étude synthétique des contraintes liées au sous-sol - Rapport préliminaire Deep City. Rapport technique, EPFL et BG Ingénieurs conseils, 2008.
- BOISVERT, M. : L'impact du projet quartier international de Montréal sur la ville intérieure : un premier examen. 2001.
- BOISVERT, M. : Le développement de la ville intérieure et la révision en cours du plan d'urbanisme (Montréal). Synthèse de séminaires, 2004.
- BONOMI, T. et ELLIS, B. : *Groundwater level evolution in the Milan area : natural and human issues*, pages 195–202. International Association of Hydrological Sciences, Birmingham, United Kingdom, 1999.
- BOROUSHAKI, S. et MALCZEWSKI, J. : Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Computers and Geosciences*, 34(4):399–410, 2008.
- BOTKIN, D. B. et BEVERIDGE, C. E. : Cities as environments. *Urban Ecosystems*, 1(1):3–19, 03 1997.
- BOUVARD-LECOANET, A., COLOMBET, G. et ESTEULLE, F. : *Ouvrages souterrains - Conception, réalisation, entretien*. Presses de l'ENPC, Paris, 1992.
- BRADBURY, J. P. : Paleolimnology of Lake Texcoco, Mexico. Evidence from diatoms. *Limnology and Oceanography*, 16(2):180–200, 1971.
- BREHENY, M. : Urban compaction : Feasible and acceptable? *Cities*, 14(4):209–217, 1997.
- BRETHAUT, D. et PARRIAUX, A. : Interaction entre la géothermie peu profonde et les ressources en eaux souterraines de la région de Gingins. Analyse de risques et recommandations. Rapport technique, EPFL, Lausanne, 2008.
- BRODARIC, B., GAHEGAN, M. et HARRAP, R. : The art and science of mapping : computing geological categories from field data. *Computers & Geosciences*, 30(7):719–740, 2004.
- BURGER, A., RECORDON, E., BOVET, D., COTTON, L. et SAUGY, B. : *Thermique des*



- nappes souterraines*. Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 1985.
- BURTON, E., JENKS, M. et WILLIAMS, K. : *The Compact City*. Routledge, 1996.
- CAPELLI, G., FUNICIELLO, R., IORIO, D. et SALVATI, R. : Loss of groundwater resources following major quarrying activity in urban areas : the Galeria-Magliana quarry basin (Rome, Italy). In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the urban environment - Selected city profiles*, pages 169–175, Rotterdam, 1999. Balkema.
- CARMODY, J. et STERLING, R. L. : *Underground Space Design - A guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- CASTAGNY, G. : *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod, Paris, 1982.
- CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, U. : *The world factbook*, 2005.
- CERVERA, G. et BARRAS, A. : Injections d'encagement et d'imprégnation - Cellule d'essai à la gravière du champ du puits (gravière Losinger à Satigny) - Rapport de suivi hydrogéologique. Rapport technique, Géotechnique appliquée Dériaz S.A., Genève, 2006.
- CESANO, D. et OLOFSSON, B. : Impact of groundwater level when tunnelling in urban areas. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 597–602, Rotterdam, 1997.
- CHAE, G. T., YUN, S. T., CHOI, B. Y., YU, S. Y., JO, H. Y., MAYER, B., KIM, Y. J. et LEE, J. Y. : Hydrochemistry of urban groundwater, Seoul, Korea : The impact of subway tunnels on groundwater quality. *Journal of Contaminant Hydrology*, 101 (1-4):42–52, 2008.
- CHAKHAR, S. : *Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique*. Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine, 2006.
- CHEN, C. T., HU, J. C., LU, C. Y., LEE, J. C. et CHAN, Y. C. : Thirty-year land elevation change from subsidence to uplift following the termination of groundwater pumping and its geological implications in the metropolitan Taipei basin, northern Taiwan. *Engineering Geology*, 95(1-2):30–47, 2007.
- CHILTON, J. : Groundwater in the urban environment - problems, processes and management. In *XXVII congress of International Association of Hydrogeologists*, volume 1, page 682, Nottingham, United Kingdom, 1997. Balkema.
- CHRISTOZOV, D. : Montreal underground : a case for indoor city planning. In *Conference of the Associated research Centers for Urban Underground Space*, Montreal, 1997.
- CLARK, T. : Montreal area. Rapport technique 152, Ministère des richesses naturelles, gouvernement du Québec, 1972.
- CLÉMENT, A. : *Atlas du Paris souterrain*. Parigramme, Paris, 2001.
- COLLIARD, B. : Outil de décision et de quantification du potentiel géothermique pour l'implantation de sondes géothermiques verticales - Région d'étude Bulle - La Tour de Trême - Guin - Tavel. Mémoire de D.E.A., CHYN, Neuchâtel, 2004.
- CONNOLLY, P. : *Mexico City : our common future ?*, pages 53–78. avril 1999.
- CORTE, J. F., FEVRE, A., HAVARD, H., JOUBERT, J. P., KERGOET, M., MOREL, G., PERROT, A., QUIBEL, A., SCHAEFFNER, M. et VEYSSET, J. : Réalisation des remblais et des couches de forme. Rapport technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, 2000.

- COWEN, R. : Exploiting the earth. Electronic draft under redaction, 2008.
- CUSTODIO, E. : Groundwater quantity and quality changes related to land and water management around urban areas : blessings and misfortunes. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 597–602, Rotterdam, 1997.
- DAVERTON, A. : *Assainissement des villes et égouts de Paris*. Dunod, Paris, 1922.
- DE ROSNAY, J. : *Le macroscopie : vers une vision globale*. Seuil, Paris, 1975.
- DECKER, E. H., ELLIOTT, S., SMITH, F. A., BLAKE, D. R. et ROWLAND, F. S. : Energy and material flow through the urban ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25:685–740, 2000.
- DEMATTEIS, A., HESSKE, S., PARRIAUX, A. et TACHER, L. : Wichtige grundwasserleiter, typologie des aquifères de la Suisse. *Atlas hydrologique de la Suisse*, feuille n°8.4, 1997.
- DERCOURT, J. et PAQUET, J. : *Géologie. Objets et méthodes*. 11<sup>e</sup> édition. Dunod, Paris, 2002.
- DERIAZ, C., FONTANA, A. et HTELLIER, J. F. : Sols genevois - Étude statistique des sols de la cuvette genevoise - Rapport de synthèse. Rapport technique, Geotechnique Appliquée Deriaz S.A., Carouge, 1997.
- DESCARTES, R. : *Le discours de la méthode*. 1637.
- DESCOEUDRES, F., DUMONTA, A. G., PARRIAUX, A., VUILLET, L., DYSLI, M., ROBYR, P., FONTANA, M. et FRANCIOSI, G. : Utilisation des matériaux d'excavation de tunnels dans le domaine routier. 2002.
- DESSARGUES, A. : Groundwater modelling to predict the impact of a tunnel on the behavior of a water table aquifer urban conditions. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 225–230, Rotterdam, 1997. Balkema.
- DEVEUGHELE, M., COJEAN, R. et MARVY, J. : Intérêt et difficultés de l'étude des nappes phréatiques en milieu urbain (exemple de la nappe alluviale de Paris). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (28):213–219, 1983.
- DIFFRE, P. et POMEROL, C. : *Paris et environs - Les roches l'eau et les hommes*. Guides géologiques régionaux. Masson, Paris, 1979.
- DUFFAUT, P. et LABBÉ, M. : From underground road traffic to underground city planning. In *Conference of the Associated research Centers for Urban Underground Space*, Torino, 2002.
- DUFFAUT, P. et MARIN, G. : Quels ouvrages souterrains pour le 21<sup>e</sup> siècle? *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2(2):155–164, 1987.
- DUFFAUT, P. : Past and future of the use of underground space in France and Europe. *Underground Space*, 5:86–91, 1980.
- DUFFAUT, P. et MÉGNIN, C. : Paris souterrain. *Géochronique*, (53):18–27, 1995.
- EISWIRTH, M., WOLF, L. et HOLTZL, H. : Balancing the contaminant input into urban water resources. *Environmental Geology*, 46(2):246–256, 2004.
- EISWIRTH, M., OHLENBUSCH, R., SCHNELL, K. et ELLIS, B. : *Impact of chemical grout injection on urban groundwater*, pages 125–132. International Association of Hydrological Sciences, Birmingham, United Kingdom, 1999.
- ELLIS, B. J. : Groundwater pollution from infiltration of urban stormwater runoff. In

- CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Process and Management*, pages 131–136, Rotterdam, 1997.
- ENDO, T. : Confined groundwater system in Tokyo. *Environmental Geology and Water Sciences*, 20(1):21–34, 1992.
- EPTING, J., HUGGENBERGER, P. et RAUBER, M. : Integrated methods and scenario development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction : a case study of urban hydrogeology in the city of Basel, Switzerland. *Hydrogeology Journal*, pages 1–17, 2007.
- ERKMAN, S. : Ecologie industrielle à Genève - Premiers résultats et perspectives. Rapport technique, Genève, 2005.
- FEB, PRICE, M. et REED, D. W. : The influence of mains leakage and urban drainage on ground water levels beneath conurbations in the UK, 1989. 31-39.
- FORD, A. : *Modeling the environment An introduction to system dynamics modeling of environmental systems*. Washington, 1999.
- FORRESTER, J. : *Industrial Dynamics*. Cambridge, 1961.
- FORSTER, A., LAWRENCE, D. J. D., HIGHLEY, D. E., CHENEY, C. S. et ARRICK, A. : Applied geological mapping for planning and development : An example from Wigan, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37(4):301–315, 2004.
- FOSTER, S. S. D., MORRIS, B. L. et CHILTON, P. J. : Groundwater in urban development - a review of linkages and concerns. *IAHS-AISH Publication*, (259):3–12, 1999.
- FOX, D. J. : Man-water relationships in metropolitan Mexico. *Geographical review*, 55(4):523–545, 1965.
- FUJII, H., INATOMI, T., ITOI, R. et UCHIDA, Y. : Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models. *Geothermics*, 36(5):459–472, 2007.
- GALERA, C., BENNIS, C., MORETTI, I. et MALLET, J. L. : Construction of coherent 3D geological blocks. *Computers and Geosciences*, 29(8):971–984, 2003.
- GANDY, M. : The Paris sewers and the rationalization of urban space. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 24(1):23–44, 1999.
- GEOTECHNICAL OFFICE HELSINKI : Does your city stand safely. Helsinki, 1978.
- GILLI, E., MANGAN, C. et MUDRY, J. : *Hydrogéologie - Objets, méthodes, applications*, volume Dunod. Paris, 2004.
- GODARD, J. P. et STERLING, R. L. : General considerations in assessing the advantages of using underground space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(3):287–297, 1995.
- GOMEZ GALVARRIATO FREER, M. : L'architecture et la gestion soutenable de l'eau, un cas d'étude à « Colonia Del Valle » Mexico. Mémoire de D.E.A., EPFL, 2005.
- GONZÁLEZ-MORÁN, T., RODRÍGUEZ, R. et CORTES, S. A. : The basin of Mexico and its metropolitan area : Water abstraction and related environmental problems. *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6):607–613, 1999.
- GORDON, P. et RICHARDSON, H. W. : Are compact cities a desirable planning goal ? *Journal of the American Planning Association*, 63(1):95–106, 1997.
- GRAF, A. et PARRIAUX, A. : Risques de contamination du sous-sol par les sondes géothermiques. Rapport technique, BEW, Berne, 1996.

- GUERRA, S. Z. : Severe soils deformations, leveling and protection at the metropolitan cathedral in Mexico City. *APT Bulletin*, 24(1/2):28–35, 1992.
- GUILLERME, A. : L'urbanisme souterrain au Japon. Rapport technique, Association pour la recherche et le développement en urbanisme, Paris, 1992.
- HADDAD, E. S. : The Cutzamala water supply system serves the growing needs of Mexico City's metropolitan area. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 6(1):93–96, 1991.
- HEATHCOTE, J. et CROMPTON, D. : Managing the impact of urban groundwater rise. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 597–602, Rotterdam, 1997.
- HENARD, E. : *Études sur les transformations de Paris et autres écrits sur l'urbanisme*. Collection Formes urbaines. Editions L'Équerre, 1903.
- HÉRICAT DE THURY, L. : *Description des catacombes de Paris*. Bosserge et Masson, Paris, 1815.
- HOKKANEN, V., FORSSÉN, I., NIVA, M., SORJONEN, K. et OF, D. L. I. : Four examples of subsurface uses in Finland. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 9(3):385–393, 1994.
- HOLOPAINEN, P. : Communication personnelle. Directeur du service des roches à la division géotechnique de la ville d'Helsinki, 2008.
- HOSONO, Y. : The water table in the Tokyo district. *Environmental Geology*, 21(1-2):22–36, 1993.
- HOSSEINI, M. : Géologie locale de Montréal avec études de cas en relation avec les constructions souterraines en milieu urbain. In *Conference of the Associated research Centers for Urban Underground Space*, Montreal, 1997.
- HOUMARD, J.-F. : Grave naturelle, grave recyclée, matériaux d'excavation : modélisation et perspectives pour le canton de Genève. Mémoire de D.E.A., ETHZ, 2004. Master.
- HUNT, S. : Quest for water. Rapport technique, IDRC, 1990.
- ISHII, M., ISHIMURA, K. et NAKAYAMA, T. : Management and application of geotechnical data : the geotechnical data information system of the Tokyo metropolitan government. *Environmental Geology and Water Sciences*, 19(3):169–178, 1992.
- ITA WORKING GROUP 4 : Planning and mapping of underground space - an overview. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 15(3):271–286, 2000.
- ITA WORKING GROUP ON MAINTENANCE AND REPAIR OF UNDERGROUND STRUCTURES : Report on the damaging effects of water on tunnels during their working life. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless*, 6(1):11–76, 1991.
- JELINSKI, L. W., GRAEDEL, T. E., LAUDISE, R. A., MCCALL, D. W. et PATEL, C. K. N. : Industrial ecology : Concepts and approaches. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89(3):793–797, 1992.
- JEONG, H. S. et ABRAHAM, D. M. : A decision tool for the selection of imaging technologies to detect underground infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(2):175–191, 2004/3.
- JIAO, J., WANG, X. et NANDY, S. : Preliminary assessment of the impacts of deep foundations and land reclamation on groundwater flow in a coastal area in Hong Kong, China. *Hydrogeology Journal*, 14(1 - 2):100–114, 2006.

- JOERIN, F., THERIALULT, M. et MUSY, A. : Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, 15(2):153–174, 2001.
- JOHNSON, C. R., MCKENZIE, G. L. et PRICE, Harry, R. : Geophysical tools for underground utility and infrastructure assessment. *In No-Dig Conference*, Dallas, 2008. North American Society for Trenchless Technology.
- JOLIVIN, P. : *Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques - Méthodologie de détermination des zones potentielles*. Thèse de doctorat, EPFL, 2002. Master of Advanced Studies in Engineering Geology.
- KAMON, M., HARTLÉN, J. et KATSUMI, T. : Reuse of waste and its environmental impact. 2000.
- KASANKO, M., BARREDO, J. I., LAVALLE, C., MCCORMICK, N., DEMICHELI, L., SAGRIS, V. et BREZGER, A. : Are european cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 european urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 77(1-2):111–130, 2006.
- KAUFMANN, O. et MARTIN, T. : 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*, 34(3):278–290, 2008.
- KELLER, O. : *La consolidation des anciennes carrières souterraines de Paris*. Annales des Mines, Paris, 1895.
- KENNEDY, C., CUDDIHY, J. et ENGEL-YAN, J. : The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2):43–59, 2007.
- KOCH, P. : Travaux 18bis, direction générale des services techniques de la ville de Paris. Rapport technique, Direction technique des eaux et de l'assainissement, Paris, 1949.
- KONDOH, A. et NISHIYAMA, J. : Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo metropolitan area, Japan. *Advances in Space Research*, 26(7):1173–1176, 2000.
- KUSTER, J. et HANS-RUDOLF, M. : Monitoring de l'espace urbain, étude thématique A1 : l'évolution des villes et des agglomérations suisses, document de synthèse. Rapport technique, Office fédéral du développement territorial (ARE), 2003.
- LABIOUSE, V. : Travaux de fondations. Notes et documents de cours, 2006.
- LACHANCE, B. : Développement d'une structure topologique de données 3D pour l'analyse de modèles géologiques. Master, Université Laval, Montréal, 2005.
- LALOUI, L., MORENI, M. et VULLIET, L. : Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur. *Canadian geotechnical journal*, 40(2):388–402, 2003.
- LANKA, M., BUTLER, A. et STERLING, R. : Use of approximate reasoning techniques for locating underground utilities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16 (Supplement 1):13–31, 2001.
- LAPLAIGE, P., JAUDIN, F., DESPLAN, A. et DEMANGE, J. : The french geothermal experience review and perspectives. 2000.
- LAPLAIGE, P., LEMALE, J., DECOTTEGNE, S., DESPLAN, A., GOYENECHÉ, O. et DELOBELLE, G. : Geothermal resources in France - current situation and prospects. *In Proceeding European Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 2005.
- LARDON, S., MAUREL, P. et PIVETEAU, V. : *Représentations spatiales et développement territorial*. Hermès Science, 2001.

- LARDON, S. et PIVETEAU, V. : Méthodologie de diagnostic pour le projet de territoire : une approche par les modèles spatiaux. *Géocarrefour*, 80(2):75–90, 2005.
- LE MOIGNE, J. : *La théorie du système général. Théorie et modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris, 1977.
- LEFEBURE DE FOURCY, M. : *Note sur les anciennes carrières sous Paris*. Annales des Mines, Paris, 1854.
- LEMOINE, M. : *Geological Atlas of Alpine Europe and Adjoining Alpine Areas*. Elsevier scientific publishing company, 1978.
- LERNER, D. N. : Too much or too little : recharge in urban areas. In et al. EDITORS, C., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Process and Management*, pages 41–47, Rotterdam, 1997.
- LERNER, D. N. : Identifying and quantifying urban recharge : A review. *Hydrogeology Journal*, 10(1):143–152, 2002.
- LERNER, D. N. et BARRETT, M. H. : Urban ground water issues in the United Kingdom. *Hydrogeology Journal*, 4(1):80–89, 1996.
- LUND, J. W. et FREESTON, D. H. : World-wide direct uses of geothermal energy 2000. *Geothermics*, 30(1):29–68, 2001.
- MALCZEWSKI, J. : *GIS and multicriteria decision making*. John Wiley & sons, Inc, New York, 1999.
- MALCZEWSKI, J. : GIS-based multicriteria decision analysis : A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7):703–726, 2006.
- MALLET, J. L. : Discrete modeling for natural objects. *Mathematical Geology*, 29(2):199–219, 1997.
- MARINONI, O. : A discussion on the computational limitations of outranking methods for land-use suitability assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1):69–87, 2006.
- MARINONI, O. et HOPPE, A. : Using the analytical hierarchy process to support sustainable use of geo-resources in metropolitan areas. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 15(2):154–164, 2006.
- MARINOS, P. G. et KAVVADAS, M. J. : Effects of shallow tunnels on the groundwater table levels. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (56):61–64, 1997.
- MARTIN, F. et SAÏTTA, A. : *Mécanique des roches et travaux souterrains. Cours et exercices corrigés*. 2009.
- MAVROULIDOU, M. et WOODS, R. : Modelling falling and rising groundwater levels in cities. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 597–602, Rotterdam, 1997.
- MAYORAZ, R. : *Modélisation et visualisation infographiques tridimensionnelles de structures et propriétés géologiques*. Thèse de doctorat, EPFL GEOLEP, 1993.
- MAYSTRE, L. Y., PICTET, J. et SIMOS, J. : *Méthodes multicritères ELECTRE*. PPUR, Lausanne, 1994.
- MEADOWS, D. H., MEADOWS, D., RANDERS, J. et BEHRENS, W. : *Limits to Growth*. Universe Books, 1972.
- MERRICK, N. P. : Modelling of the groundwater impacts of a new underground railway

- through an urban area. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 249–254, Rotterdam, 1997.
- MIKI, H., IWABUCHI, J. et CHIDA, S. : New soil treatment methods in Japan. 2005.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT : Captage et distribution de l'eau. Directive n°001, 1984.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT : Portrait régional de l'eau - Montréal région administrative 06. <http://www.mddep.gouv.qc.ca>, 2000.
- MIYAKE, N. et DENDA, A. : Utilization of underground spaces in urban areas : Urban geo-grid plan. *Engineering Geology*, 35(3-4):175–181, 1993.
- MOFFATT, S. et KOHLER, N. : Conceptualizing the built environment as a social-ecological system. *Building Research and Information*, 36(3):248–268, 2008.
- MOLÉ, S. : Propositions pour une gestion intégrée des commerces sur rue et hors rue à Montréal. In *Conference of the Associated research Centers for Urban Underground Space*, Montreal, 1997.
- MONNIER, G. : Évaluation de l'impact de l'urbanisation sur la réalimentation des nappes d'eau souterraines au nord-est de Paris (France). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59(4):329–342, 2001.
- MONNIKHOF, R., EDELENBOS, J. et van der KROGT, R. : How to determine the necessity for using underground space : an integral assessment method for strategic decision-making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(2):167–172, 1998.
- MORRIS, B. L., LAWRENCE, A. R. et FOSTER, S. S. : Sustainable groundwater management for fast-growing cities : Mission achievable or mission impossible. In et al. EDITORS, C., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 55–66, Rotterdam, 1997. Balkema.
- MOUREY, V. et VERNOUX, J. : Les risques pesant sur les nappes d'eau souterraine d'Ile-de-France. *Annales des mines*, 2000.
- MUNARI, S. et BEETSCHEN, J. : Systèmes d'information des organisations. Polycopié de cours, HEC Lausanne, 2002.
- MUNDA, G. : Social multi-criteria evaluation : Methodological foundations and operational consequences. *European Journal of Operational Research*, 158(3):662–677, 11 2004.
- MUSY, A. et SOUTTER, M. : *Physique du Sol*. Collection gérer l'environnement. PPUR, Lausanne, 1991.
- NAKAYAMA, T., WATANABE, M., TANJI, K. et MORIOKA, T. : Effect of underground urban structures on eutrophic coastal environment. *Science of the Total Environment*, 373(1):270–288, 2007.
- NARVI, S. et BARLES, S. : Town planning of underground spaces in Helsinki. In *Underground space and urban planning*, Paris, 1995.
- NARVI, S., VIHAVAINEN, U., KORPI, J. et HAVUKAINEN, J. : Legal, administrative and planning issues for subsurface development in Helsinki. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9(3):379–384, 1994.
- NEWMAN, P. W. G. : Sustainability and cities : Extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning*, 44(4):219–226, 1999.
- NORIN, M., HULTÉN, A. M. et SVENSSON, C. : Groundwater studies conducted in

- Göteborg, Sweden. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the urban environment - Selected city profiles*, pages 209–216, Rotterdam, 1999. Balkema.
- OFEFP : Instructions pour l'application de la protection des eaux souterraines aux ouvrages souterrains. Rapport technique, Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Zurich, 1998.
- OFEFP : Directive sur la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais. Rapport technique, Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Bern, 1999.
- OFEFP : Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Rapport technique, Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Bern, 2004.
- OFEN : Dimensionnement des pompes à chaleur. Rapport technique, 2000.
- OFEV : Wärmenutzung aus boden und untergrund. Rapport technique, OFEV, Bern, 2007.
- OLSON, S. : Downwind, downstream, downtown : The environmental legacy in Baltimore and Montreal. *Environmental History*, 12(4):845–866, 2007.
- ONDREKA, J., RUSGEN, M. I., STOBER, I. et CZURDA, K. : GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany-Possibilities and limitations. *Renewable Energy*, 32(13):2186–2200, 2007.
- OTAKI, Y., OTAKI, M. et SAKURA, O. : Water systems and urban sanitation : A historical comparison of Tokyo and Singapore. *Journal of Water and Health*, 5(2):259–265, 2007.
- PAHUD, D. et HUBBUCH, M. : Measured thermal performances of the energy pile system of the dock Midfield at Zürich airport. In *Proceeding European Geothermal Congress*, Unterhaching, 2007.
- PARRIAUX, A. : *Géologie - Bases pour l'ingénieur*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2006.
- PARRIAUX, A., TACHER, L., KAUFMANN, V. et BLUNIER, P. : Underground resources and sustainable development in urban areas. 2006.
- PARRIAUX, A. : Impact de la construction souterraine. In PIERRE VON MEISS, F. R., éditeur : *Vingt mille lieux sous les terres - Espaces publics souterrains*, pages 116–123. PPUR, Lausanne, 2004.
- PARRIAUX, A., TACHER, L., GROSJEAN, G. et PHILIPPE, É. : La nappe du Genevois - illustration de son fonctionnement et de son intérêt vital pour Genève et sa région. Rapport technique, EPFL, Lausanne, 2004.
- PARRIAUX, A. et TURBERG, P. : Les géotypes, pour une représentation géologique du territoire. *Tracés*, 133(15/16):11–17, 2007.
- PAUL, T. et CHOW, F. : Availability and use of geotechnical information for urban planning. In *COST C7 Workshop*, Thessaloniki, 1999.
- PIGUET, P., PARRIAUX, A. et BENSIMON, M. : The diffuse infiltration of road runoff : An environmental improvement. *Science of the Total Environment*, 397(1-3):13–23, 2008.
- POINTET, A. : *Rencontre de la science de l'information géographique et de l'anthropologie culturelle : Modélisation spatiale et représentation de phénomènes culturels*. Thèse de doctorat, EPFL, 2007.
- POULIOT, J., BADARD, T. et DANIEL, S. : La 3D en lien avec le métier de géomaticien :



- état des lieux. *Baliz-media.com*, 2008a.
- POULIOT, J., BÉDARD, K., KIRKWOOD, D. et LACHANCE, B. : Reasoning about geological space : Coupling 3D geomodels and topological queries as an aid to spatial data selection. *Computers and Geosciences*, 34(5):529–541, 2008b.
- POULIOT, J., DESGAGNÉ, E., BADARD, T. et BÉDARD, K. : SIG 3D : Où en sommes-nous et quelles sont les avenues de développement ? *In Conférence Géomatique 2006 de l'association canadienne des sciences géomatiques*, Montréal, 2006.
- POUX, A. : Construire en souterrain : une solution avantageuse pour l'environnement ? consommation énergétique et analyse du cycle de vie de variantes de construction pour un bâtiment commercial. Mémoire de master, École centrale Nantes, 2008.
- PRÉLAZ-DROUX, R. : *Conception d'un système d'information à référence spatiale pour l'aménagement du territoire. Approche systémique et procédure de réalisation*. Thèse de doctorat, EPFL, 1995.
- PRUNIER-LEPARMENTIER, A. M. : Évolution de la nappe phréatique depuis un siècle dans Paris et niveaux connus en 1990. *Revue Française de Géotechnique*, (56):67–75, 1991.
- QUIJANO-LEÓN, J. L. et GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L. C. : Geothermal production and development plans in Mexico. *In World Geothermal Congress*, Kyushu - Tohoku, Japan, 2000.
- ROCHAT, D., ERKMAN, S. et CHAMBAZ, D. : Le recyclage des matériaux de construction à Genève. Rapport technique, Genève, 2006.
- RÖNKÄ, K., RITOLA, J. et BARLES, S. : Underground planning in Finland : classification methods and guidelines for subsurface planning. *In Underground Space and Urban Planning*, Paris, 1995.
- RÖNKÄ, K., RITOLA, J. et RAUHALA, K. : Underground space in land-use planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(1):39–49, 1998.
- ROSSI, L. : *Qualité des eaux de ruissellement urbaines*. Thèse de doctorat, EPFL, 1998.
- ROY, B. et BOUYSSOU, D. : *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Economica, Paris, 1993.
- RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT, M. : Guide techniques pour les souscripteurs (les caissons, les parois moulées dans le sol, fouilles en terrains aquifères). 2003, 2004.
- SAATY, T. L. : *The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York, 1980.
- SAATY, T. L. : How to make a decision : The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1):9–26, 1990.
- SCHÄRLIG, A. : *Pratiquer Electre et Prométhée*. PPUR, Lausanne, 1996.
- SEKIOKA, M. et YOSHII, M. : Country update report of geothermal direct uses in Japan. *In 1990 International Symposium on Geothermal Energy*, volume 14 de *1990 International Symposium on Geothermal Energy*, Kailua-Kona, HI, USA, 1990. Publ by Geothermal Resources Council.
- SENTENAC, F. : Science et industrie : service de la direction générale des travaux de Paris. Rapport technique, Service technique des eaux et de l'assainissement, Paris, 1928.
- SIA : SIA D 0190 utilisation de la chaleur du sous-sol par des ouvrages de fondation et

- de soutènement en béton - guide pour la conception, la réalisation et la maintenance, 2005.
- SIGNORELLI, S. : *Geoscientific Investigations for the use of shallow low-enthalpy systems*. Thèse de doctorat, ETHZ, 2004. PhD.
- SIGNORELLI, S., SONNENFROH, F., KOHL, T. et RYBACH, L. : Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz - Ausgabe 2007. Rapport technique, GEOWATT AG, Zurich, 2008.
- SIJPKES, P. et BROWN, D. : Montreal's indoor city - 35 years of development. In *Conference of the Associated research Centers for Urban Underground Space*, Montreal, 1997.
- SMUTS, J. : *Holism and Evolution*. Macmillan, London, 1926.
- STATISTICS BUREAU - MINISTRY OF INTERNAL AFFAIRS AND COMMUNICATIONS : Population census. 2005.
- STERLING, R. L. et GODARD, J. : Geoengineering considerations in the optimum use of underground space. 2000.
- STIPHO, A. : Evaluation of potential geotechnical problems associated with rising groundwater level in Riyadh city, Saudi Arabia. In CHILTON, J., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 597–602, Rotterdam, 1997.
- STOTER, J. et SALZMANN, M. : Towards a 3D cadastre : Where do cadastral needs and technical possibilities meet? *Computers, Environment and Urban Systems*, 27 (4):395–410, 2003.
- STOTER, J. et ZLATANOVA, S. : 3D GIS, where are we standing? *ISPRS Joint Workshop on "Spatial, Temporal and Multi-dimensional Data Modelling and Analysis"*, 2003.
- TACHER, L. : Modélisation mathématique de l'impact de pompes à chaleur du type eau-eau dans l'aquifère superficiel de la vallée du Rhône dans la région de Sion (Suisse). Rapport technique, GEOLEP, 1999.
- TACHER, L., MAYORAZ, R. et PARRIAUX, A. : Modélisation tridimensionnelle de structures géologiques complexes appliquée aux ouvrages souterrains. *Bulletin de la SIA*, 8:114–117, 1994.
- TACHER, L. : Écoulements souterrains. Polycopiés de cours : cycle postgrade en géologie de l'ingénieur et de l'environnement, 2005.
- TAKASAKI, H., CHIKAHISA, H. et YUASA, Y. : Planning and mapping of subsurface space in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3):287–301, 2000.
- THERIAULT, M. et PRELAZ-DROUX, R. : Utilisation des SIG en aménagement du territoire. *Revue Internationale de Géomatique*, 2001.
- THILL, J. C. : *Spatial multicriteria decision making and analysis - a geographic information sciences approach*. Ashgate publishing Ltd, Aldershot, 1999.
- THURSTONE, L. : A law of comparative judgement. *Psychological Review*, 34:278–286, 1927.
- TORTAJADA, C. : Water management in Mexico City metropolitan area. *International Journal of Water Resources Development*, 22(2):353–376, 2006.
- TOURNIER, M. et DOUBLET, M. : *Éole : une épopée souterraine*. Editions du Layeur, Paris, 1996.

- UN CENTRE FOR HUMANS SETTLEMENTS : *An Urbanising World : Global Review of Human Settlements*. Habitat, Nairobi, 1996.
- UN HABITAT : State of the world's cities 2008/2009 - harmonious cities. Rapport technique, United Nations Settlements Programme, 2008.
- UN WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT : *Our common future*. Oxford University Press, 1987.
- UNTERBERGER, W., HOFINGER, H., MARKIEWICZ, R. et ADAM, D. : Running hot and cold in Vienna. *Tunnels and Tunnelling International*, 37(2):36–39, 2005.
- UTUDJIAN, E. : *Architecture et urbanisme souterrains*. Collection « Construire le monde ». [Laffont], 1952.
- UTUDJIAN, E. et de FRANCE, P. U. : *L'urbanisme souterrain*. Que sais-je ? Paris, 1952.
- VÄHÄÄHO, I., KORPI, J. et ANTTIKOSKI, U. : Use of underground space and geoinformation in Helsinki. 2004.
- VAITTINEN, T., RAUDASMAA, P. J., VUOPIO, J. A. et AND, J. K. : Three dimensional modelling of the groundwater flow in the centre of Helsinki. Rapport technique, Real estate department VTT communities and infrastructure, Helsinki.
- VÁZQUEZ-SUÑE, E., SÁNCHEZ-VILA, X., CARRERA, J. et MARIZZA, M. : Rising groundwater levels in Barcelona : Evolution and effects on urban structures. In et AL., C., éditeur : *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*, pages 267–271, Rotterdam, 1997. Balkema.
- VÁZQUEZ-SUÑE, E., SÁNCHEZ-VILA, X. et ELLIS, B. : *Groundwater modelling in urban areas as a tool for local authority management : Barcelona case study (Spain)*, pages 65–72. International Association of Hydrological Sciences, Birmingham, United Kingdom, 1999.
- VÁZQUEZ-SUNE, E., SÁNCHEZ-VILA, X. et CARRERA, J. : Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13(3):522–533, 2005.
- VÁZQUEZ-SUNE, E. et SÁNCHEZ-VILLA, X. : *Urban groundwater. Barcelona city case study*. Thèse de doctorat, Universitat Politècnica de Catalunya, Department d'Enginyeria del Terreni, Cartogràfica i Geofísica, 2003.
- VERA, A. V., GONZALEZ, G. M., GONZALEZ, L. B. R., GOMEZ, A. S. et VARA, J. M. M. : Twenty-five years of subway construction in Mexico City. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(1):65–77, 1995.
- VILLA, E. S., SHELLEY, E. O., MOOSER, F. et PLATA, E. L. : Síntesis geotécnica de la cuenca del valle de México. Rapport technique, Mexico City, 2005.
- VON BERTALANFFY, L. : *Perspectives on General System Theory*. George Braziller, New York, 1974.
- WADE, T. et SOMMER, S. : *A to Z GIS - An illustrated dictionary of geographic information systems*. 2006.
- WISE, D. : *Geology of the West Island : Pride of place*, 2003.
- WOLF, L., KLINGER, J., SCHRAGE, C., MOHRLOCK, U., EISWIRTH, M., HÖLTZL, H., BURN, S., DESILVA, D., COOK, S., DIAPER, C., CORREL, R., VANDERZALM, J., RUEEDI, J., CRONIN, A., MORRIS, B., MANSOUR, M., SOUVENT, P., CENCUR-CURK, B., VIZINTIN, G., VOETT, U., ARRAS, A., HÖRING, K. et REHM-BERBENNI, C. : Assessing and improving sustainability of urban water resources and systems. Rapport

- technique, Eu-Project, Karlsruhe, 2005.
- WOLF, L., MORRIS, B. et BURN, S. : *Urban water resources toolbox - Integrating groundwater into urban water management*. IWA publishing, London, 2006.
- WORBOYS, M. et DUCKHAM, M. : *GIS : a computing perspective*, volume 2nd edition. CRC press, 2004.
- YAGER, R. R. : Ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18(1):183–190, 1988.
- YAGI, O. : Could the groundwater and soil contamination in urban area be dissolved. *Sustainable Urban Regeneration*, 1, 2004.
- YASUFUKU, M., NEGISHI, T. et BARLES, S. : Role of the master plan for underground utilization. In *Underground Space Urban Planning*, Paris, 1995.
- YATCHINOVSKY, A. : *L'approche systémique, pour gérer l'incertitude et la complexité*. ESF, 2000.
- ZERBI, S. : Construction en pierre massive en Suisse. le cas des Tre Valli au canton du Tessin. In *6th Swiss Geoscience Meeting*, Lugano, 2008.
- ZHAO, J., ROJAS, R., SANDRONE, F. et KOLYMBAS, D. : Underground space and underground technology. notes et documents de cours <http://lmr.epfl.ch>, 2008.
- ZLATANOVA, S. : *3D GIS for urban development*. Thèse de doctorat, Graz University of Technology, Austria, 2000.

# **Annexes**



# Annexe **A**

## *Physique des écoulements souterrains et thermique du sous-sol*

### **A.1. Eau souterraine**

Les principes ci-dessous s'appliquent aux aquifères à porosité intergranulaire. Pour les aquifères à porosité de fracturation ou les aquifères karstiques, les équations doivent être adaptées ou d'autres modèles doivent être utilisés.

Un aquifère est défini par deux paramètres importants :

- Sa porosité, qui est le rapport entre le volume des vides et le volume total du sol.  
 $\phi = \frac{V_v}{V_t} [-]$ .
- Sa perméabilité (ou conductivité hydraulique)  $K$  exprimée en  $[\frac{m}{s}]$ .

La nappe d'eau souterraine contenue dans un aquifère peut être caractérisée en un point quelconque par son potentiel hydraulique. Ce potentiel est défini par l'équation de Bernoulli (équation A.1). Cependant, en hydrogéologie, les vitesses sont faibles et le terme d'inertie  $\frac{v^2}{2.g}$  peut être négligé. Aussi, le potentiel hydraulique est égal à la hauteur d'eau dans un piézomètre, on parle souvent indifféremment de niveau piézométrique. Le potentiel d'une nappe libre est ainsi égal au niveau de saturation en tout point, alors qu'il est supérieur à ce niveau dans les nappes captives.

$$h = \frac{v^2}{2.g} + z + \frac{p}{\rho.g} \quad (\text{A.1})$$

$h$  est le potentiel hydraulique  $[m]$

$p$  est la pression du fluide au point  $[\frac{N}{m^2}]$

$\rho$  est la masse volumique du fluide  $[\frac{kg}{m^3}]$

$v$  est la vitesse du fluide au point  $[\frac{m}{s}]$

$g$  est l'accélération de la pesanteur  $[\frac{m}{s^2}]$

$z$  est l'altitude du point par rapport à un référentiel  $[m]$

L'écoulement des eaux souterraines est un phénomène de transport par diffusion. Il associe un flux à une différence de potentiel, dans un milieu caractéristique. Le transport par diffusion se présente ainsi mathématiquement comme (Tacher, 2005) :

$$\text{Flux (chose transportée)} = -K.\text{grad (chose engendrant le transport)}$$

$K$  est un paramètre caractéristique du milieu.

En hydrogéologie, la « chose transportée » est de l'eau souterraine de flux  $q$  en  $[\frac{m^3}{s.m^2}]$ . La « chose engendrant le transport » est le potentiel hydraulique  $h$  en  $[m]$ .  $K$  est le coefficient hydraulique ou perméabilité. Le flux est toujours dans le sens des potentiels décroissants. Ainsi, l'écoulement en milieu poreux saturé est décrit par la loi de Darcy :

$$q = -K.\text{grad}(h)$$

## A.2. Chaleur

Le transport de chaleur est également un phénomène diffusif. Un corps est défini par deux constantes relatives au transport de chaleur :

- La capacité calorifique volumique  $C_v$   $[\frac{J}{m^3.K}]$  exprime la capacité du corps à stocker de la chaleur par unité de volume.
- Sa conductivité thermique  $\lambda$   $[\frac{W}{m.K}]$  exprime la capacité du corps à transmettre de la chaleur.

La « chose transportée » est de la chaleur  $\varphi$  exprimé en  $[\frac{W}{m^2}]$ ; la « chose engendrant le transport » est le potentiel thermique (température) exprimé en  $[K]$ . Et le transport de chaleur est décrit par la loi de Fourier :

$$\varphi = -\lambda.\text{grad}(T)$$



## Annexe **B**

# *Techniques de construction d'ouvrages souterrains*

Le but de cette annexe est de présenter les principales stratégies et techniques de construction d'ouvrages souterrains. Cette thématique est très vaste, chaque chantier d'une certaine ampleur demandant d'adapter les techniques de construction au contexte géologique et urbain. Aussi, l'objectif n'est pas de dresser une liste exhaustive de ces technologies, mais de fournir les clés de compréhension pour le lecteur non familier des travaux de génie civil. Le lecteur qui voudrait aller plus loin peut se référer à la bibliographie (Bickel *et al.*, 1996; Bouvard-Lecoanet *et al.*, 1992; Labiouse, 2006; Martin et Saïtta, 2009; Rückversicherungs-Gesellschaft, 2003, 2004; Zhao *et al.*, 2008)

Remarque : les illustrations présentées sont schématiques et destinées à la compréhension. Elles peuvent ne pas respecter l'échelle et l'ensemble des détails de la réalité.

### **B.1. Construction depuis la surface**

La construction d'ouvrages souterrains est généralement réalisée depuis la surface lorsque la réalisation de fouilles est possible temporairement sans impact majeur sur les infrastructures existantes (bruit, vibrations, perturbation du trafic, etc.) ou sur l'environnement. Ces techniques sont en effet généralement plus économiques que la construction souterraine stricto-sensu.

La construction depuis la surface consiste à réaliser une fouille dans laquelle l'ouvrage est construit ou inséré (cas des ouvrages préfabriqués), la fouille étant finalement remblayée sur l'ouvrage.

#### **B.1.1. Construction en fouille**

Lors de la construction en fouille, la séquence de construction est la suivante :

- réalisation de la fouille, son soutènement étant réalisé à l'avancement ou avant l'excavation,
- réalisation de l'ouvrage,
- remblaiement de la fouille.

### B.1.1.1. Fouille talutée

La fouille talutée est le mode de construction le plus simple. Elle est possible lorsque les propriétés du terrain sont telles qu'un soutènement de la fouille n'est pas nécessaire. Elle est généralement possible seulement aux faibles profondeurs de fouilles et dans les terrains non saturés. Les angles de talutage doivent être inférieurs à  $45^\circ$  en terrains meubles sans cohésion et inférieurs à  $60^\circ$  avec cohésion. En rocher, ils dépendent essentiellement de l'orientation des discontinuités. La fouille talutée demande une emprise du chantier supérieure à l'emprise définitive de l'ouvrage (figure B.1).

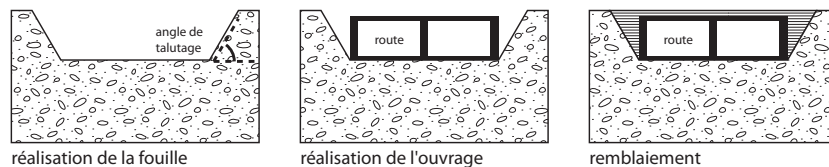


FIGURE B.1.: Construction en fouille talutée

### B.1.1.2. Fouille blindée

Lorsque la réalisation de talus n'est pas possible pour des raisons d'espace ou de terrain, la fouille est réalisée avec des parois soutenues artificiellement ; les mesures de soutènement sont des enceintes de blindage et l'on parle de fouilles blindées.

**Enceinte réalisée à l'avancement** Lorsque l'enceinte est réalisée à l'avancement, les travaux de mise en place du parement sont réalisés au sein de la fouille, soit dans un espace dégagé. Toutefois, cette technique impose de réaliser plusieurs séquences de construction – excavation – blindage – étayage.

**Parois épinglées** La réalisation de blindage étant entièrement réalisée après l'excavation, la fouille doit être talutée. La construction de fouille à parois clouées suit la séquence suivante (Figure B.2) :

- excavation,
- mise en place du parement,
- épinglage du sol.

Le parement est réalisé en béton projeté, coffré sur place ou préfabriqué. Les ancrages peuvent être passifs ou actifs. Les ancrages passifs sont des ancrages sellés sur toute leur longueur sans précontrainte. Les ancrages actifs sont sellés à leur extrémité et peuvent être précontraints.

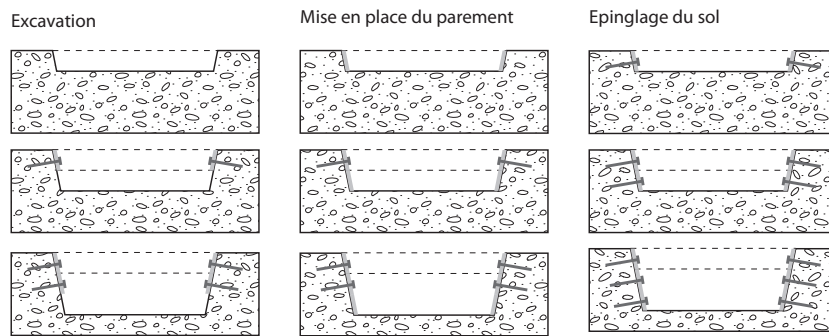


FIGURE B.2.: Fouille à parois épinglées

La présence d'ancrages implique une emprise plus importante que l'emprise de l'ouvrage dans le sous-sol. Cette emprise peut être problématique sur le plan juridique si elle s'étend sur un fonds voisin. C'est particulièrement important lorsque les ancrages sont utilisés comme mesure définitive d'étaisage de l'ouvrage.

**Parois berlinoises** L'exécution de fouilles blindées à l'aide de parois berlinoises est similaire à la méthode des fouilles épinglées, si ce n'est que le parement repose sur des appuis profondés. La séquence de construction est donc la suivante (figure B.3 :

- construction des appuis,
- excavation,
- mise en place du parement,
- épinglage ou étaisage de la paroi.

Les fouilles soutenues par des parois berlinoises sont verticales, l'emprise du chantier est donc moins importante que pour les fouilles talutées ou à parois clouées. Les appuis profondés peuvent être des profilés métalliques ou des pieux en béton armé. La construction des pieux est détaillée au chapitre B.3. Le parement est un madrier en bois, une plaque de béton préfabriqué, un mur de béton armé coffré sur place ou un mur de béton projeté sur treillis. L'enceinte de blindage est utilisée comme coffrage perdu pour l'ouvrage souterrain (essentiellement si l'on utilise des madriers en bois comme parement) ou comme son mur extérieur. L'étaisage de la paroi peut être réalisé par des ancrages comme indiqué sur le schéma, par la mise en place d'étais provisoires dans la fouille ou en utilisant les dalles de l'ouvrage.

**Enceintes fichées et moulées** Une enceinte fichée ou moulée est réalisée depuis la surface et permet de n'avoir qu'une phase d'excavation au sein même de l'enceinte. Elle est donc indispensable pour les terrains ayant de faibles tenues ou en présence de nappe phréatique. La fouille est réalisée avec des parois verticales.

**Rideau de palplanches** Les palplanches sont des éléments fichés dans le sol par battage ou vibrofonçage. Il s'agit généralement de profilés métalliques emboîtés avec un

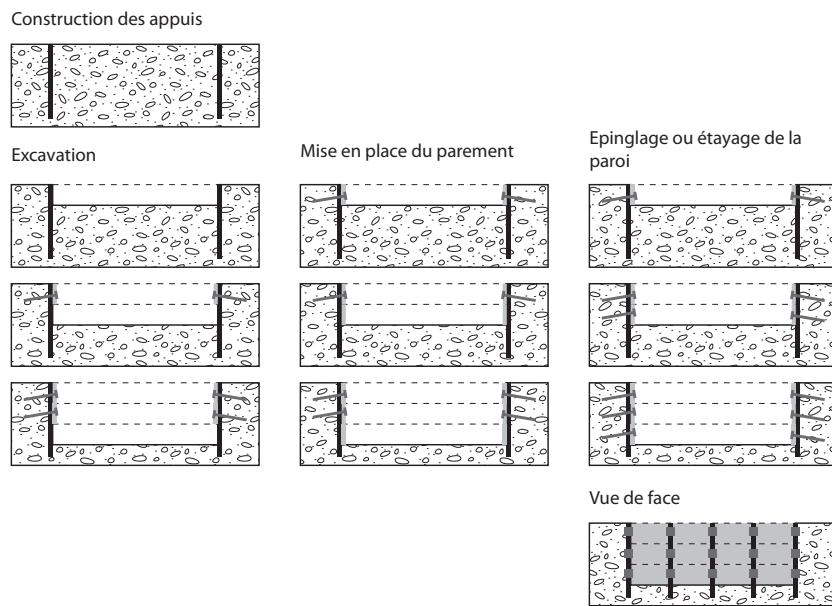


FIGURE B.3.: Fouille à parois berlinoises

joint étanche (figure B.4) . Plus rarement, les palplanches sont en bois ou en PVC. Elles peuvent être laissées en place définitivement ou sont fréquemment retirées du terrain après les travaux de construction.



FIGURE B.4.: Rideau de palplanches avec des profilés métalliques de type Larssen

Généralement, les palplanches sont mises en place de manière alternée : une planche sur deux est mise en place dans un premier temps, puis les palplanches intermédiaires sont fichées (méthode en touche de piano figure B.5).

L'utilisation de palplanches est bien adaptée aux travaux en sites lacustres et fluviaux et pour la réalisation de batardeaux. Les longueurs de palplanches sont limitées entre 20 et 30 mètres. Le fichage des palplanches n'est pas possible en présence de blocs dans le sol. Par ailleurs, en site urbain la mise en place de palplanche peut être délicate en raison des nuisances liées au bruit et aux vibrations.

**Parois moulées** Les parois moulées sont des éléments de béton armé coulés directement dans le sol, dans une tranchée étroite. Les parois moulées peuvent être réalisées jusqu'à des profondeurs d'environ 30 m. Elles sont généralement réalisées par sections de 3 à 5 m de large et ont une épaisseur typique de l'ordre de 80 cm. Les parois moulées

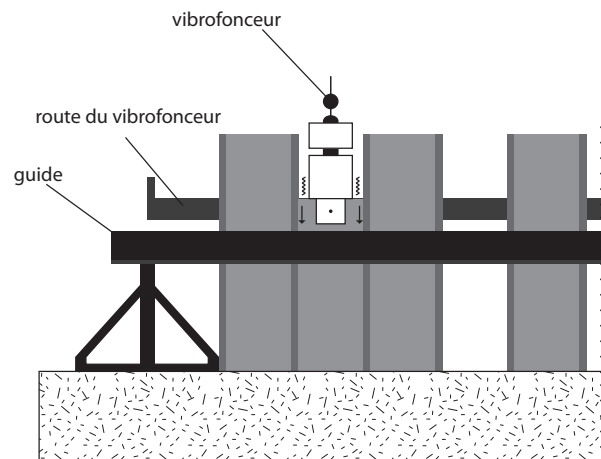


FIGURE B.5.: Mise en place d'un rideau de palplanches par vibrofonçage de manière alternée

sont utilisées à la fois comme blindage de la fouille et comme élément structurel définitif de l'ouvrage construit.

Les étapes de construction d'une paroi moulée sont les suivantes (figure B.6) :

Construction d'une avant-tranchée peu profonde et de murets guides,

- excavation de la tranchée au moyen d'une benne et simultanément injection bentonite (boue minérale) pour assurer le soutènement de la tranchée,
- mise en place de tubes joints si plusieurs sections sont construites,
- mise en place des cages d'armature,
- bétonnage du panneau et refoulement de la bentonite,
- arrachage des tubes joints avant la prise du béton.

Lorsque plusieurs sections de parois moulées sont conçues, elles sont mises en place alternativement une sur deux comme pour les palplanches.

Bien que coûteuses à construire, les parois moulées présentent plusieurs avantages en site urbain :

- Elles peuvent être construites à proximité immédiate d'autres bâtiments.
- Elles peuvent être réalisées dans des terrains de faible tenue ou saturés.
- Le chantier nécessaire à leur mise en place provoque peu de nuisances, de bruits, ou de vibrations.

**Parois préfabriquées** La réalisation de blindage en parois préfabriquées est similaire à celle des parois moulées, sauf qu'au lieu de couler la paroi sur place, on insère dans la tranchée des éléments sécants en béton préfabriqué.

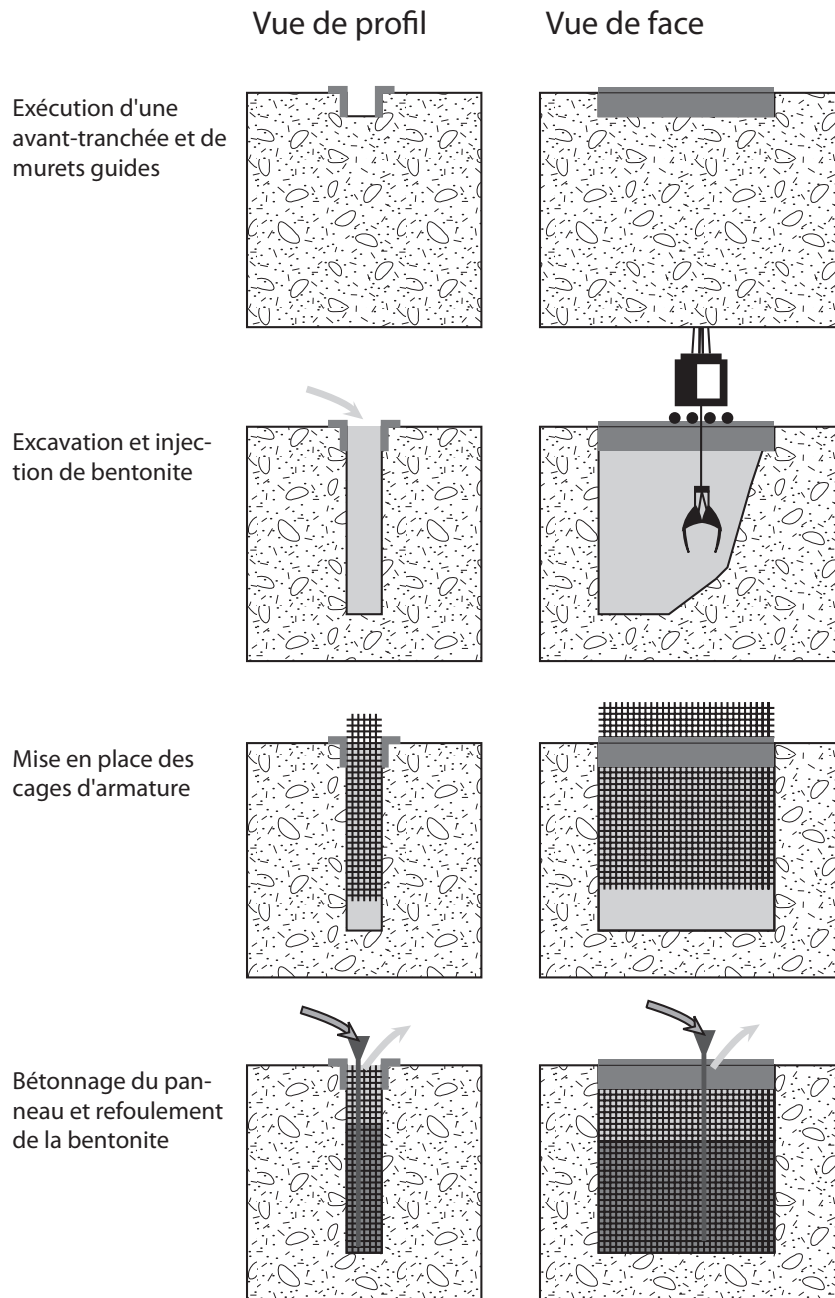


FIGURE B.6.: Réalisation de parois moulées

**Rideau de pieux** Des pieux peuvent également être utilisés pour construire un blindage. On utilise essentiellement pour cela les pieux forés tubés (voir chapitre B.3). Le blindage est construit soit à l'aide de pieux sécants, soit à l'aide de pieux jointifs. Les pieux sont construits de manière alternée (figure B.7).

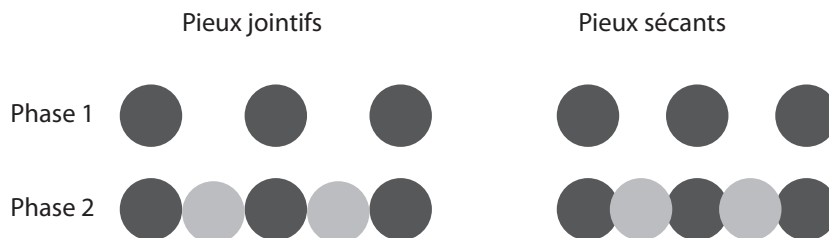


FIGURE B.7.: Rideaux de pieux jointifs et sécants

### B.1.2. Construction en taupe

Le but de la construction en taupe est de limiter le temps pendant lequel la fouille est ouverte. Plusieurs raisons peuvent le justifier, par exemple si la circulation routière ou des activités économiques sont perturbées par l'ouvrage, mais aussi lorsque pour un bâtiment on souhaite construire simultanément les étages sous-sol et les étages hors-sol.

Le principe de la construction en taupe est de construire la dalle de couverture avant les travaux d'excavation puis de les réaliser sous couvert. Si cette option permet de réduire les nuisances, elle est contraignante pour les travaux d'excavation et le transport des déblais. La figure B.8 montre la réalisation en taupe d'une galerie à deux étages au-dessous d'un axe routier.

### B.1.3. Construction en caisson

La construction en caisson consiste à préfabriquer l'ouvrage en surface et à le descendre par havage : au fur et à mesure de l'excavation, l'ouvrage prend appui sur des couteaux et s'enfonce par gravité dans le sous-sol. On fait généralement appel à une lubrification à l'aide de boue minérale pour faciliter le havage. La construction en caisson est surtout intéressante pour les travaux dans les eaux souterraines ou de surface. On distingue essentiellement deux types de caissons (figure B.9) :

- Le caisson ouvert dont la partie supérieure est laissée ouverte. L'excavation a en général lieu en eau.
- Le caisson à air comprimé pour lequel l'excavation a lieu sous une cloche d'air comprimée, ce qui permet de travailler hors eau. Dans ce cas, les mouvements de matériaux effectués par des sas prennent beaucoup de temps par rapport aux autres techniques d'excavation et la mise sous pression du compartiment de travail implique des mesures particulières pour les ouvriers (temps de travail, paliers de dépressurisation, etc.)

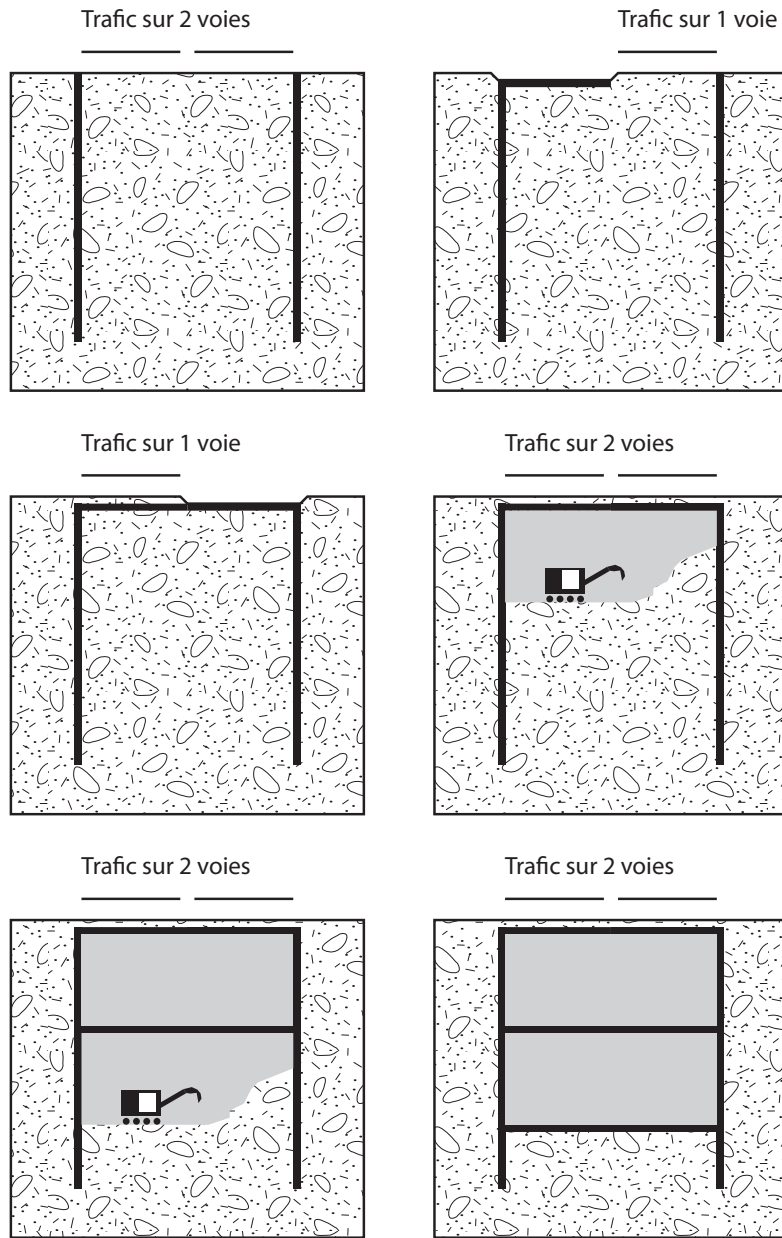


FIGURE B.8.: Construction en taube



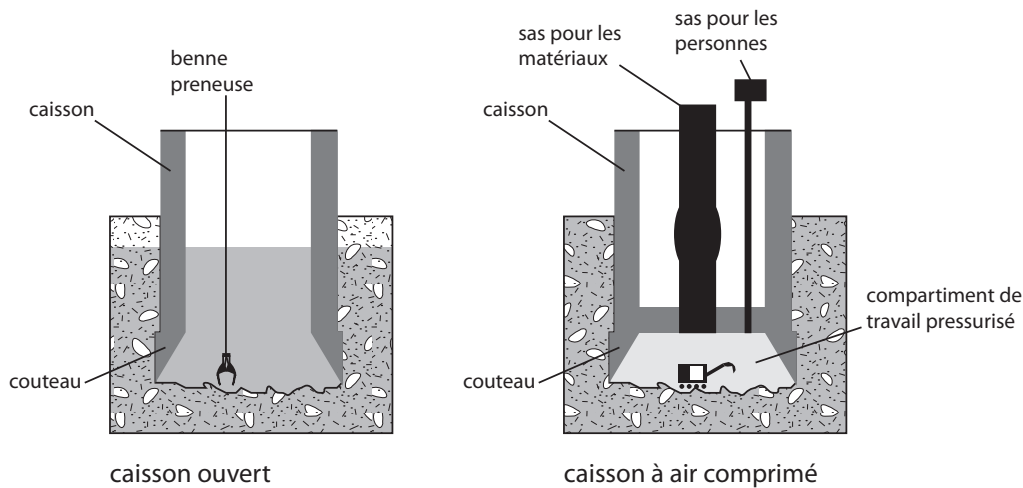


FIGURE B.9.: Construction en caisson

#### B.1.4. Construction en sous-œuvre

La construction en sous-œuvre est la construction d'ouvrages souterrains sous des ouvrages existants. Les principaux enjeux sont la reprise des charges de ces derniers, les systèmes de fondation devant être provisoirement ou définitivement prolongés et étayés. Le mode de construction est pour le reste similaire à la construction en taupé.

#### B.1.5. Techniques de construction en nappe

La construction de fouilles dans les zones saturées des terrains aquifères est souvent problématique. Les terrains saturés présentent en effet en général une faible cohésion et sont de nature bouillante. Par ailleurs, il faut à tout prix éviter un débouillage du terrain, c'est-à-dire la rupture brusque des terrains sous forts gradients hydrauliques.

##### B.1.5.1. Rabattement de la nappe phréatique

La méthode la plus simple de réalisation de fouilles en terrains saturés est le rabattement de la nappe par pompage. En rabattant la nappe, il est en effet possible de réaliser la fouille dans des conditions identiques à celle que l'on trouve hors nappe. Cependant, le rabattement de la nappe entre en conflit avec la protection des eaux souterraines et des captages et provoque des tassements différentiels qui peuvent avoir d'importantes conséquences. Aussi, en milieu urbain, la mise en œuvre de pompage est souvent impossible.

La nappe est rabattue par des puits filtrants verticaux jusqu'au niveau planifié du fond de fouille. L'excavation est réalisée en fouille talutée ou en fouille blindée à l'avancement (blindage non étanche). La figure B.10 présente une telle fouille.

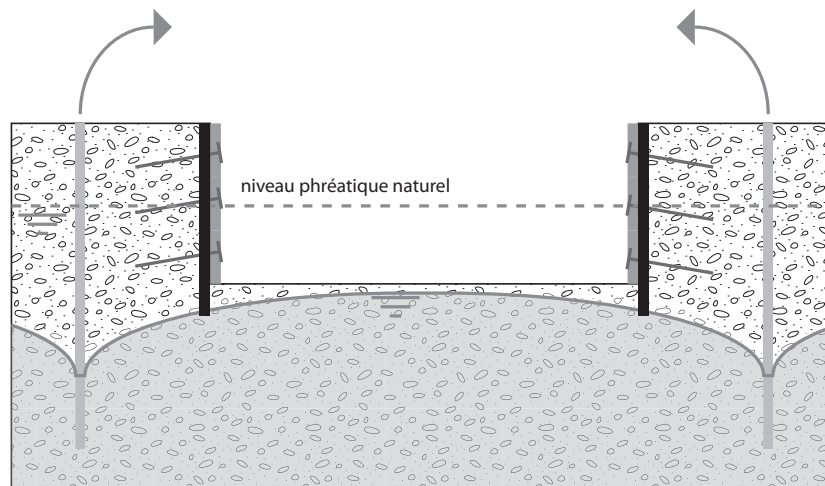


FIGURE B.10.: Fouille en terrain aquifère réalisée par rabattement de la nappe. La fouille est réalisée avec une enceinte non étanche de parois berlinoises

#### B.1.5.2. Sans rabattement de la nappe phréatique

Lorsque pour protéger les eaux ou les ouvrages avoisinants, il n'est pas possible de réaliser un rabattement de la nappe, l'ouvrage est construit au sein d'une enceinte entièrement étanche (parois et radier). Dans les terrains peu perméables, il est possible d'avoir un étanchement naturel du fond de fouille :

- les parois sont construites étanches selon une des méthodes de construction d'enceintes fichées ou moulées,
- la nappe est rabattue à l'intérieur de la fouille,
- les terrains sont excavés.

Si les conditions géologiques ne permettent pas un étanchement naturel, un radier doit être réalisé. Il peut l'être par bétonnage immergé ou par injection. L'excavation est alors réalisée en eau. La figure B.11 présente une telle fouille.

Une autre technique en présence de terrains saturés est la congélation du terrain (chapitre B.4.3). Une paroi de terrain gelé est formée autour de la fouille. L'excavation est menée dans cette enceinte étanche, sans venues d'eau.

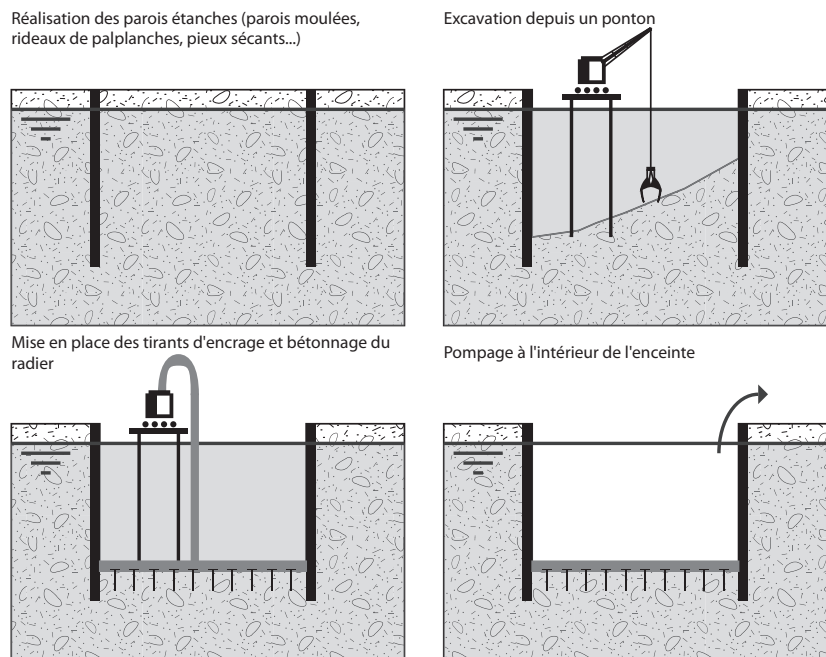


FIGURE B.11.: Technique de fouille en terrain saturé sans rabattement de la nappe. Exemple avec réalisation d'un radier bétonné immergé

## B.2. Construction souterraine

Les techniques de construction souterraine sont essentiellement développées pour les tunnels. Toutefois, il peut arriver que des ouvrages à emprise ponctuelle soient construits en technique souterraine ; on parle dans ce cas de cavernes. Ces cavernes sont en général construites sous la forme de petites cavités reliées progressivement entre elles.

La construction souterraine commence par la construction de portails ou d'éventuelles galeries d'accès à l'aide de techniques de construction depuis la surface. Ensuite, la construction souterraine de l'ouvrage débute depuis un ou plusieurs fronts d'attaque. Elle comporte cinq étapes principales :

- abattage du terrain,
- excavation des matériaux (marinage),
- soutènement,
- drainage ou étanchement de mise en charge,
- mise en place du revêtement définitif.

### B.2.1. Méthode conventionnelle

Lors de construction souterraine par méthode conventionnelle, les différentes étapes de construction sont bien séparées et font appel à des techniques et des outils différenciés.

### B.2.1.1. Abatage

Le tunnel est creusé à l'aide de machines à attaque ponctuelle telles que pelle mécanique, marteau-piqueur, haveuse, etc. ; ou par minage. L'avancement du tunnel peut être réalisé en pleine section ou en section partielle si la stabilité du terrain est mauvaise.

### B.2.1.2. Marinage

Les matériaux excavés sont chargés au front d'abatage et transportés vers l'extérieur par des engins de chargement sur pneus, chenille ou rail ou par tapis roulant le long de l'axe du tunnel. Dans les travaux à l'explosif en milieu rocheux, le chargement est précédé d'une phase de purge de la voûte et du front.

### B.2.1.3. Soutènement

L'avancement par méthode conventionnelle impose généralement des mesures de soutènement. Autrefois, le soutènement était provisoire et était retiré après le revêtement de l'ouvrage. Aujourd'hui, il est de plus en plus souvent définitif et il participe à la reprise des charges à long terme.

Les principaux types de soutènement sont les suivants :

- Boulonnage : des boulons d'ancrage sont posés de manière radiale sur la voûte et frontale sur le front de taille. Ils permettent de reporter les efforts dans la partie intacte du terrain (en milieu rocheux).
- Béton projeté : le béton projeté joue un rôle de protection et un rôle structural. Il est fréquemment utilisé en combinaison avec un treillis métallique ou chargé de fibres. Son épaisseur est typiquement d'environ 10 cm.
- Nouvelle méthode autrichienne (boulonnage + béton projeté).
- Voûte parapluie : il s'agit d'un renforcement de la voûte par injection de béton ou de tubes métalliques.
- Mise en place de cintres rigides ou déformables : lorsque les autres mesures de soutènement ne sont pas suffisantes, des cintres en métal ou béton doivent être mis en place.
- Les techniques d'injection, de jet grouting et de congélation (chapitre B.4) du terrain sont aussi utilisées pour en améliorer la tenue.

Le soutènement peut être exécuté à l'avancement du tunnel ou avant la phase d'abatage dans les terrains de faible tenue. Dans ce cas, on parle de présoutènement.

### B.2.1.4. Drainage

En zone non saturée, la voûte est protégée des eaux de percolation par une géomembrane synthétique, ces eaux sont drainées vers l'extérieur du tunnel. Lorsque le tunnel pénètre dans la zone saturée, deux solutions peuvent être mises en place (figure B.12) :

- Tunnel drainant : les eaux sont drainées sur la voûte et transférées par des drains des collecteurs vers l'extérieur du tunnel. Une telle solution peut entraîner d'importantes modifications du bilan hydrogéologique.
- Tunnel étanche : l'ensemble de la structure est rendu étanche, par des membranes capables de résister à de fortes pressions. Cette solution peut également perturber les écoulements par effet de barrage hydraulique.

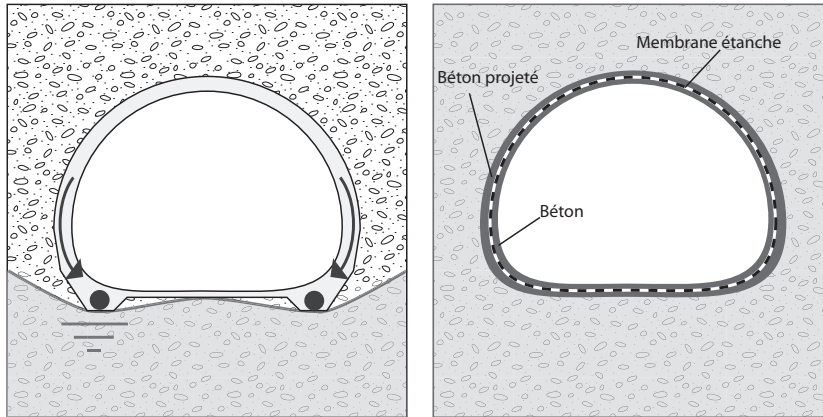


FIGURE B.12.: Tunnel construit en nappe de manière drainante ou étanche

#### B.2.1.5. Revêtement définitif

Le revêtement de l'ouvrage assure une fonction structurelle souvent en combinaison avec les mesures de soutènement, une fonction esthétique (c'est la partie visible du tunnel), ainsi que diverses fonctions de sécurité ou associées à la destination de l'ouvrage (tunnel routier, ferroviaire, etc.). Le revêtement définitif est généralement réalisé en béton coffré. Le revêtement en maçonnerie n'est aujourd'hui presque plus utilisé.

#### B.2.2. Tunneliers

Les tunneliers (en anglais tunnel boring machine ou TBM) sont des engins permettant d'industrialiser le processus de construction souterraine. Ils assurent plusieurs fonctions ; ils permettent dans tous les cas l'abatage du terrain, l'évacuation des déblais à l'arrière de l'engin et l'avancement de l'ensemble. Suivant les technologies et les terrains rencontrés, ils permettent en outre : le soutènement du front de taille et des parois. Les tunneliers les plus grands atteignent des diamètres de l'ordre de 15 m. Pour des diamètres inférieurs à 2 m, on parle de microtunneliers.

Les principaux organes du tunnelier sont la tête d'abatage, qui assure le processus d'abatage, le bouclier permettant d'assurer le soutènement derrière le front de taille et de la zone de travail, et le train suiveur pour le marinage des déblais et l'avancement de l'engin. De nombreux tunneliers intègrent également un dispositif de forage mobile

pour le boulonnage et un dispositif pour mettre en place des voussoirs de soutènements et réaliser des injections de coulis entre le terrain et les voussoirs.

Il existe plusieurs types de tunneliers, distingués principalement par le type de bouclier et utilisés en fonction des conditions de terrain :

- Tunnelier sans bouclier (roches dures)
- Bouclier ouvert (roches tendres et terrains meubles à forte cohésion)
- Bouclier à support mécanique (roches altérées ou fortement fracturées, terrains meubles à forte cohésion)
- Bouclier à pression d'air (terrains meubles à forte cohésion en présence d'eau souterraine)
- Bouclier à pression de boue (terrains meubles grossiers en nappes)
- Bouclier à pression de terre (terrains meubles argileux)
- Tunneliers sans roue, l'abattage est réalisé à la pelle, le terrain est soutenu par le bouclier (terrains meubles).

### **B.2.3. Tubes foncés**

Depuis une chambre de travail, des tubes cylindriques préfabriqués, généralement en béton armé, sont enfoncés à l'aide de vérins hydrauliques. Ces tubes restent de manière permanente dans le sol et forment l'enveloppe principale du tunnel. Les tubes sont enfoncés élément par élément. Au fur et à mesure du fonçage des tubes, les terres sont dégagées et évacuées de l'intérieur du tube. Cette technique est en général réservée à des tunnels de petits diamètres (moins de 3 m) pour les conduites techniques ou les canalisations d'eau.

## **B.3. Pieux**

Les pieux sont des ouvrages largement utilisés comme système de fondations profondes. Lorsque les conditions géologiques ne permettent pas de reprendre la charge d'un ouvrage directement, les pieux sont chargés de reporter les charges plus profondément sur des horizons géologiques de meilleure portance.

Les pieux répartissent les charges par frottement latéral, par appui ou les deux (figure B.13). On distingue deux grandes familles de pieux : les pieux avec refoulement du sol en place, qui mobilisent au maximum les forces de frottement latéral, et les pieux sans refoulement du sol en place.

### **B.3.1. Avec refoulement du sol en place**

Les principaux pieux avec refoulement du sol en place sont les pieux battus (figure B.14). Ils sont enfoncés grâce à une sonnette de battage munie de moutons batteurs. Il s'agit de pieux en bois, en acier ou en béton préfabriqué. De nombreuses formes de sections sont possibles. Les pieux en acier ou en béton peuvent être foncés dans le sol alternativement, à l'aide de vérins ou par vibrofonçage.

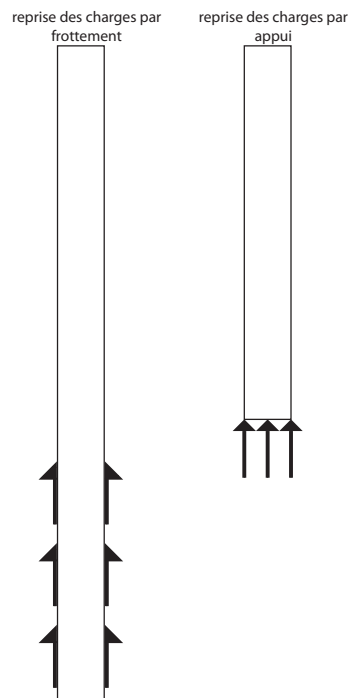


FIGURE B.13.: Reprise des charges dans les pieux

Il existe également des pieux battus moulés : un tube en acier, obturé à la base, est battu dans le sol. Une fois le pieu battu, une armature est mise en place et le pieu est rempli de béton. Le tube est remonté au fur et à mesure du bétonnage.

Les pieux battus sont économiques à mettre en place et permettent de vérifier la capacité portante du pieu à l'exécution. Ils engendrent cependant des nuisances importantes lors du battage (bruit et vibrations). Il existe un risque de les endommager lors de la mise en place. Par ailleurs, les longueurs et sections de pieux sont limitées pour des questions de manutention et de possibilités de mise en place.

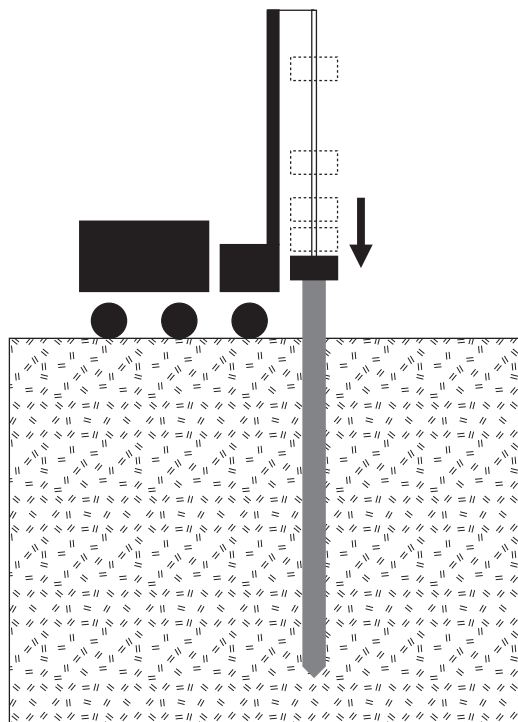


FIGURE B.14.: Pieux battus



### B.3.2. Sans refoulement du sol en place

Les principaux pieux de la famille des pieux sans refoulement du sol en place sont les pieux forés. Il s'agit exclusivement de pieux à section pleine en béton armé. Un forage est réalisé à l'aide d'un outil de forage (tarière, benne, trépan, grappin par exemple). Ensuite, une cage d'armature est mise en place et du béton est coulé (figure B.15).

Dans les terrains cohérents et hors nappe, des pieux forés simples sont réalisés. Si la cohérence du terrain est insuffisante, ou en zone saturée, le forage doit être stabilisé. Il peut l'être à l'aide de boue bentonitique ou à l'aide d'un tubage métallique. Pour les pieux forés sous boue, la boue est injectée lors du forage et est évacuée lors du bétonnage. Pour les pieux forés tubés, un tubage métallique est foncé au fur et à mesure du forage. Il est généralement retiré lors du bétonnage, il peut toutefois être laissé en place dans le cas de pieux forés à tubage perdu (ou pieux tubés permanents). Les pieux forés tubés sont relativement coûteux à mettre en œuvre, mais sont particulièrement adaptés aux terrains difficiles.

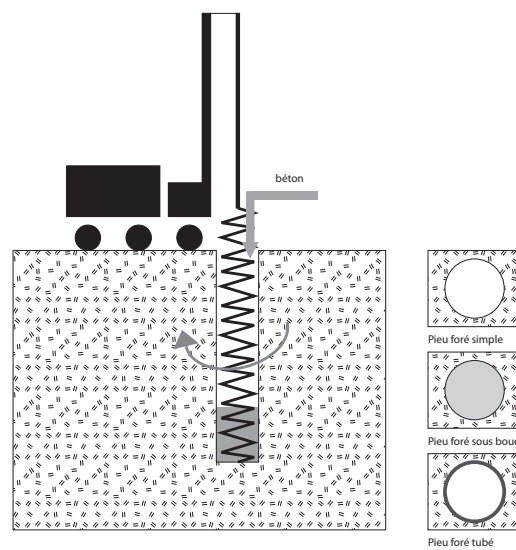


FIGURE B.15.: Pieux forés

Les micropieux sont un type particulier de pieux forés. Il s'agit de pieux de faible section et de faible longueur. Ils peuvent être mis en place à l'aide d'engin de forage de faible taille. Ils sont particulièrement intéressants lorsque les conditions de chantier ne permettent pas de mettre en œuvre des pieux de tailles classiques (par exemple, travail en sous-œuvre).

## B.4. Modification des propriétés du terrain

### B.4.1. Injections

Le procédé d'injection consiste à faire pénétrer dans les porosités ou les fissures du massif un coulis qui, après durcissement ou polymérisation, consolide et étanche le terrain (figure B.16). Les coulis d'injection utilisés sont de plusieurs types :

- coulis de ciment
- gel de silice
- coulis à base de résine synthétique

Les principaux terrains injectés sont les terrains rocheux et les terrains alluvionnaires. En terrain rocheux, les injections sont réalisées sous forte pression, alors qu'en terrain alluvionnaire, on utilise de plus faibles pressions de manière à ne pas claquer le terrain.

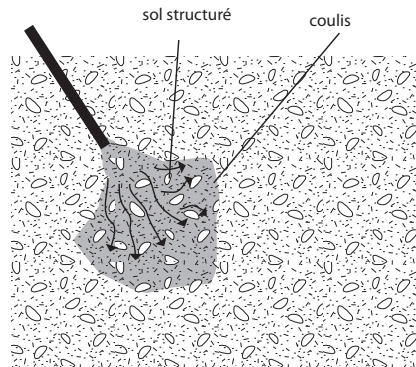


FIGURE B.16.: Injection des terrains

### B.4.2. Jet grouting

Le jet grouting ou jetting est une technique similaire à l'injection, mais pour laquelle de très hautes pressions sont utilisées (de l'ordre des 400 bars). Sous la pression du jet, le terrain se trouve déstructuré et il se forme un mélange sols-coulis (une sorte de « béton de terrain »). Il existe plusieurs techniques de jet grouting faisant appel à un flux unique de coulis ou à d'autres flux d'air ou d'eau (figure B.17).

### B.4.3. Congélation

La congélation est utilisée dans les terrains saturés. Un circuit de fluide est foré dans le terrain. Grâce à un fluide d'azote ou de saumure, le terrain refroidit et gèle (figure B.18). Il devient ainsi temporairement étanche et sa résistance est augmentée. La congélation n'est possible que lorsque le flux d'eau souterraine n'est pas trop fort, pour que les calories ne soient pas perdues par advection.

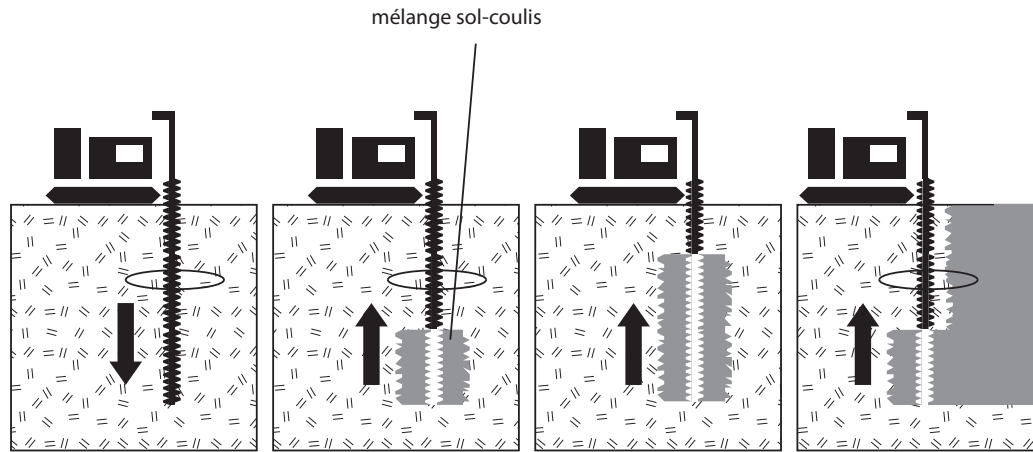


FIGURE B.17.: Jet grouting

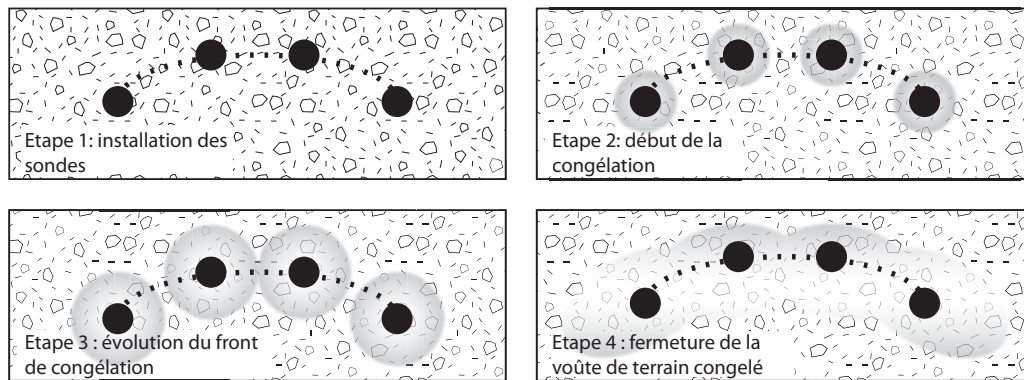


FIGURE B.18.: Exemple de soutènement temporaire par congélation d'une voûte de tunnel



## *Interactions entre les usages du sous-sol urbain : contexte légal et normatif suisse*

### **C.1. Droit fédéral : règles générales**

Les lois, ordonnances d'applications et recommandations des services fédéraux suivantes ont été prises en compte :

- LPE : Loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la Protection de l'Environnement
- OEIE : Ordonnance du 19 octobre 1988 relative à l'Étude de l'Impact sur l'Environnement
- LEaux : Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des Eaux
- OEaux : Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des Eaux
- OSEC : Ordonnance du DFI du 26 juin 1995 sur les Substances Étrangères et les Composants dans les denrées alimentaires
- OHyg : Ordonnance du DFI du 23 novembre 2005 sur l'Hygiène
- OTD : Ordonnance du 10 décembre 1990 sur le Traitement des Déchets
- OPEL : Ordonnance du 1<sup>er</sup> juillet 1998 sur la Protection des Eaux contre les Liquides pouvant les polluer
- LEne : Loi du 26 juin 1998 sur l'Énergie
- OEne : Ordonnance du 7 décembre 1998 sur l'Énergie
- IAPES : Instructions pour l'Application de la Protection des Eaux Souterraines aux ouvrages souterrains (OFEFP, 1998)
- UESS : Utilisation de l'Énergie du Sol et du Sous-sol (OFEV, document en consultation)
- IPPES : Instruction Pratiques pour la Protection des Eaux Souterraines (OFEFP, 2004)
- DME : Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des Matériaux d'Excavation et de déblais (Directive sur les matériaux d'excavation) (OFEFP, 1999)

La LPE est la loi-cadre sur la protection de l'environnement. Elle fixe les principes suivants :

- Prévention des impacts sur l'environnement (art. 1, al. 2)
- Réduction des pollutions à la source (art. 11, al. 1 ; art. 30 al. 1)
- Principe de causalité (art. 2, 32, 32 a, 32 d, 48)
- Obligation de l'assainissement (art. 16-18)
- Priorité de la valorisation des déchets (art. 30)
- Obligation d'éliminer les déchets solides. Les déchets solides non domestiques doivent être éliminés par leurs propriétaires (art. 31 c)
- Obligation d'assainir (art. 32)

Pour les grands projets de construction, un outil d'évaluation est l'EIE<sup>1</sup>. Parmi les projets pouvant s'implanter en souterrain soumis à l'EIE, on trouve (OEIE annexe 1) :

- Routes nationales
- Routes à fort trafic (RGD et RP)
- Parkings de plus de 300 voitures
- Ligne ferroviaire
- Équipement ferroviaire devisé à plus de 40 millions de francs
- Installations de géothermie de plus 5 MWth
- Extraction de plus de 50'000 m<sup>3</sup> par an de gravier, de sable ou d'autres matériaux de lacs, de cours d'eau ou de nappes d'eau souterraines (sauf extraction ponctuelle pour des raisons de prévention des crues)
- Carrière ou gravière de plus de 300'000 m<sup>3</sup>
- Centre commercial de plus de 5'000 m<sup>2</sup>

La LEaux et l'OEaux fixent les principes et modalités d'exécution de la protection des eaux. Elles sont basées sur les impacts sur les milieux récepteurs (approche immissions). Il a été vu dans le corps du rapport que les modifications de niveaux des nappes phréatiques jouent un rôle prépondérant dans la gestion générale des infrastructures souterraines. La loi fixe les principes suivants pour cette problématique (LEaux art. 43 al. 2, OEaux annexe 1 chapitre 2) :

- Amélioration des nappes surexploitées par réduction des prélèvements, alimentation artificielle et stockage d'eau potable dans le sous-sol
- État proche du régime naturel des eaux souterraines

Des outils d'aménagement du territoire sont développés pour la protection des eaux. L'OEaux, l'IPPEs et l'UESS précisent les implications de ces outils pour plusieurs usages du sous-sol urbain dans les ressources espace et géothermie. Les règles fixées par ces documents ont été transcrites sous forme de diagrammes de type arbre de défaillance (figures C.1, C.2, C.3, C.4 et C.5). Les éléments propres aux interactions sont présentés dans le tableau des pages suivantes.

---

1. Étude d'Impact sur l'Environnement

<b>Interaction</b>	<b>Base légale</b>	<b>Principes</b>	<b>Conditions de compatibilité</b>
Concurrence hydrogéologique	LEaux art 43 al.1 et al.6 IAPES IPPES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prélèvements inférieurs à la recharge</li> <li>- Drainage autorisé uniquement pour maintenir l'exploitation agricole</li> <li>- Abaissement temporaire acceptable si renouvellement prévisible et traitement des eaux drainées</li> </ul>	
Effet Barrage	LEaux art 43 al.4 OEaux Annexe 4-211 OEaux Annexe 4-221 IPPES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les constructions ne doivent pas avoir pour effet de réduire de façon notable et permanente la capacité du réservoir, ni l'écoulement des nappes exploitables</li> <li>- L'IPPES précise que les travaux souterrains profonds (voiles d'injection, enceintes de fouilles, parois étanches) sont aussi concernés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En secteur Au et Zu, interdiction de construire des ouvrages qui réduisent la capacité d'écoulement du sous-sol de plus de 10% en tenant compte d'éventuelles mesures ciblées (par exemple tranchées drainantes)</li> <li>- En zone S3, pas de diminution du volume d'emmagasinement ou de la section d'écoulement de l'aquifère</li> </ul>
Infiltration d'eau de ruissellement	LEaux art 6 LEaux art 7 OEaux art 8 al.1 OEaux art 44 OEaux annexe 2-21 OEaux annexe 2-221	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interdiction d'introduire directement ou indirectement dans une eau des substances pouvant la polluer</li> <li>- Captage, évacuation et traitement des eaux de drainage des ouvrages souterrains</li> <li>- Limiter la réduction de la zone de couverture protectrice des nappes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En zone S3, les installations réduisant de manière importante la zone de couverture sont interdites</li> </ul>
Court-circuit entre aquifères superposés	LEaux art 43 al.3 IPPES	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La création de communications permanentes entre les nappes de nature à les polluer ou diminuer les réserves en eau est interdite</li> </ul>	
Pollution par les matériaux d'injection	LEaux art 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interdiction d'introduire directement ou indirectement dans une eau des substances pouvant la polluer</li> </ul>	
Mobilisation de polluants	LEaux art 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interdiction d'introduire directement ou indirectement dans une eau des substances pouvant la polluer</li> </ul>	
Utilisation des ouvrages souterrains pour le captage d'eau			

<b>Interaction</b>	<b>Base légale</b>	<b>Principes</b>	<b>Conditions de compatibilité</b>
Infiltration dans les ouvrages Modification de la poussée d'Archimède Subsidence et soulèvement	LEaux art 43 al. 2, OEaux annexe 1 chapitre 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les interactions ne sont pas spécifiquement prises en compte, mais les niveaux phréatiques doivent être maintenus dans des régimes naturels de variation :</li> <li>- Amélioration des nappes surexploitées par réduction des prélèvements, alimentation artificielle et stockage d'eau potable dans le sous-sol</li> <li>- État proche du régime naturel des eaux souterraines</li> </ul>	
Corrosion des infrastructures et détérioration des ouvrages	OEaux annexe 1-2 OEaux annexe 2-21 OEaux annexe 2-22 OHyg OSEC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de pollution anthropique des eaux, concentration de substances proche de l'état naturel, température caractéristique de l'état naturel</li> <li>- Concentration limite de certains polluants, pas d'augmentation des concentrations existantes</li> <li>- Exigences chiffrées pour l'eau de boisson</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualité physico-chimique naturelle des eaux</li> <li>- Pour les eaux destinées à l'eau de boisson, les concentrations en sulfate et en chlorures sont limitées à 40mg/l</li> <li>- Les valeurs limites pour les substances étrangères et les composants sont fixés dans l'OSEC, les valeurs limites bactériologiques dans l'OHyg.</li> </ul>
Géostructures énergétiques	LEne art 1 LEne art 3 LEne art 5 LEne art 9 OEne art 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilisation rationnelle de l'énergie</li> <li>- Recours aux énergies indigènes et renouvelables</li> <li>- Principes applicables à l'énergie des bâtiments</li> <li>- La géothermie est considérée comme une source d'énergie renouvelable</li> </ul>	
Valorisation thermique des flux techniques			
Conflit espace			
Modifications thermomécaniques			
Gel du terrain			



<b>Interaction</b>	<b>Base légale</b>	<b>Principes</b>	<b>Conditions de compatibilité</b>
Impact des prélèvements	OEaux art 32 al. C OEne art 15	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autorisation nécessaire en Au et Zu pour l'exploitation des eaux du sous-sol à des fins de refroidissement ou de chauffage</li> <li>- Pose comme condition au soutien aux énergies renouvelable l'absence d'impact sur les eaux utilisées</li> </ul>	
Valorisation des géomatériaux ou élimination des matériaux d'excavation	OTD art 9 OTD art 12 OTD art 16 DME	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obligation de trier les déchets de chantier en fonction de leur potentiel de valorisation</li> <li>- Obligation de valoriser les déchets</li> <li>- Les cantons prévoient le devenir des matériaux d'excavation, la remise en culture des matériaux d'excavation est prévue par l'OTD</li> <li>- Défini les matériaux non pollués, tolérés et pollués et défini leur devenir</li> <li>- Fixe la priorité des modes de valorisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non pollués &lt; valeurs indicatives U</li> <li>Valorisation :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1-sur le chantier</li> <li>• 2-matériaux de construction</li> <li>• 3-comblement de sites d'extraction</li> <li>• 4-modification de terrains</li> <li>• 5-décharge</li> </ul> </li> <li>- Valeurs indicatives U&lt;toléré&lt;valeurs indicatives T : valorisation avec restriction</li> <li>- Pollué &gt; valeurs indicatives T : traitement et ou mise en décharge</li> </ul>
Coordination extractions - construction			
Désaturation des terrains	Voir concurrence hydrogéologique		
Fuites du liquide caloporteur	OEaux annexe 4-221 OPEL art 5 OPEL art 6 OPEL art 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les propriétaires d'installation doivent prendre les mesures de nature à prévenir et détecter les fuites</li> <li>- Obligation d'utiliser les fluides les moins polluants selon liste de l'autorité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- En zone S3, les circuits thermiques qui prélèvent ou rejettent de la chaleur dans le sous-sol sont interdits</li> </ul>
Modifications de l'activité biologique	OEaux annexe 2-21	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le prélèvement ou l'apport de chaleur ne modifie pas la température naturelle des eaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification inférieure à 3°C à 100 m des installations (augmentation ou diminution de la température)</li> </ul>
Modifications chimiques	OEaux annexe 2-21	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le prélèvement ou l'apport de chaleur ne modifie pas la température naturelle des eaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification inférieure à 3°C à 100 m des installations (augmentation ou diminution de la température)</li> </ul>

<b>Interaction</b>	<b>Base légale</b>	<b>Principes</b>	<b>Conditions de compatibilité</b>
Dégradation de la qualité et/ou de la quantité des eaux souterraines	LEaux art 44 OEaux annexe 4-211	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Préservation de la qualité de la nappe en limitant la profondeur et l'extension de l'extraction</li> <li>- Restauration de la couche de couverture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interdiction dans les zones de protection des eaux et dans les périmètres de protection</li> <li>- Pas d'excavation plus bas que 2 m au-dessus du niveau maximum décennal de la nappe ou du niveau effectif des nappes réalimentées</li> </ul>
Interactions entre les usages de la géothermie	OEaux annexe 2-21	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le prélèvement ou l'apport de chaleur ne modifie pas la température naturelle des eaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification inférieure à 3°C à 100 m des installations (augmentation ou diminution de la température)</li> </ul>

## C.2. Protection des eaux souterraines

Les recommandations de l'OFEV pour les usages des ressources du sous-sol, applicables dans le cadre des outils d'aménagement du territoire pour la protection des eaux souterraines, sont présentées ci-dessous. Pour les usages de la géothermie, les précisions apportées par la nouvelle recommandation sur l'énergie du sol et du sous-sol (texte en cours de consultation) ont été incluses. Les recommandations sont présentées dans un premier temps sous forme linéaire. Elles ont été dans un deuxième temps dérivées sous forme de logigramme d'aide à la décision.

Usage	üB	Au <sup>3</sup>	Zu <sup>1</sup>	Péri <sup>9</sup>	S3 <sup>2</sup>	S2	S1
<b>Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines</b>							
Parois étanches / rideau de palplanches	+	b <sup>3</sup>		-	-	-	-
Pilotage par battage ou forage <sup>4</sup>							
• Pieux en bois et pieux en béton préfabriqués	+	+ <sup>b/3</sup>		-	+ <sup>b</sup>	-	-
• Pieux coulés en place	+	+ <sup>b/3</sup>		-	b	-	-
• Pieux forés à la boue	+	+ <sup>b/3</sup>		-	-	-	-
• Pieux forés à sec	+	+ <sup>b/3</sup>		-	b	-	-
Travaux d'étanchéité (compactage par vibration)	+	- <sup>5</sup>		-	-	-	-
Injection	+	- <sup>5</sup>		-	- <sup>5</sup>	-	-
Puits de prélèvement et ouvrages de restitution <sup>4</sup> pour l'utilisation des eaux souterraines à des fins de chauffage ou de refroidissement	+	b <sup>6</sup>		-	-	-	-
Géothermie profonde (forages géothermiques) <sup>4/7</sup>	+	+ <sup>b/8</sup>		- <sup>9</sup>	- <sup>b/10</sup>	-	-
Tunnels	+	+ <sup>b</sup>		- <sup>9</sup>	- <sup>b</sup>	-	-
Cavernes-réservoirs pour liquides pouvant altérer les eaux	- <sup>11</sup>	-		-	-	-	-
Extraction au-dessus du niveau des nappes d'eau souterraines <sup>12</sup>	+	b <sup>13</sup>					
Extraction au-dessous du niveau des nappes d'eau souterraines <sup>12</sup>	b <sup>12</sup>	-		-	-	-	-
<b>Utilisation de l'énergie du sol et du sous-sol</b>							
Sondes géothermiques <sup>4/14</sup>	+	b		-	-	-	-
Collecteurs horizontaux et paniers <sup>15</sup>	+	+		- <sup>9</sup>	+ <sup>b/10</sup>	-	-
Pieux et autres géostructures énergétiques	+	b		- <sup>9</sup>	b	-	-

+ Sans problème du point de vue hydrogéologique ; ne nécessite pas une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux ; le respect d'autres prescriptions légales reste réservé.

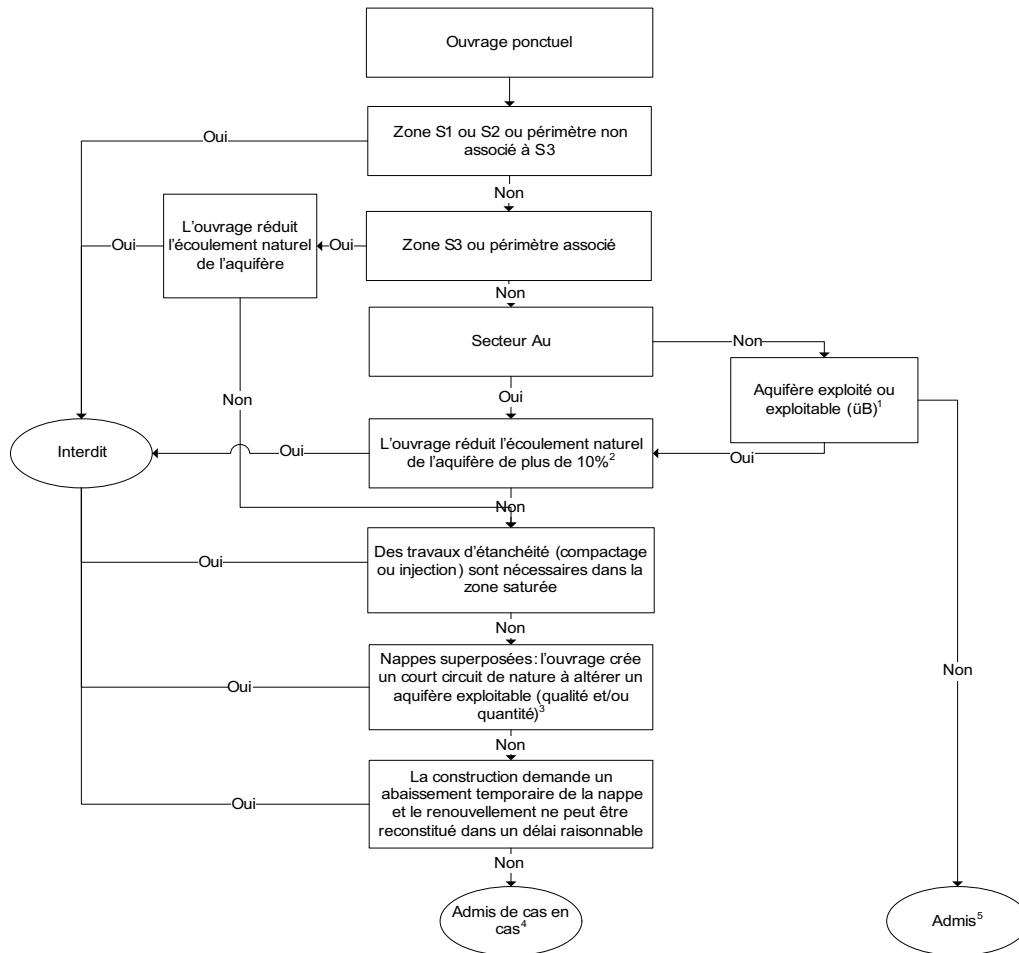
b Admis au cas en cas par l'autorité compétente ; nécessite une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux.

-	Interdit
+ <sup>n</sup>	Sans problèmes du point de vue hydrogéologique, avec les restrictions et conditions signalées dans les notes correspondantes ; ne nécessite pas une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux.
+ <sup>b</sup>	En principe sans problème ; autorisation nécessaire en vertu de l'art. 32 OEaux.
b <sup>n</sup>	Admis de cas en cas par l'autorité compétente, avec les restrictions et conditions signalées dans les notes correspondantes ; autorisation nécessaire en vertu de l'art. 32 OEaux.
- <sup>b</sup>	Interdit ; l'autorité compétente peut admettre une dérogation, après examen du cas particulier.
- <sup>n</sup>	Interdit ; l'autorité compétente peut admettre une dérogation après examen du cas particulier, avec les restrictions et conditions signalées dans les notes correspondantes.

La mention b se rapproche en général de l'autorisation cantonale selon art. 19 LEaux et art. 32 OEaux, donc de l'autorisation prescrite en vertu de la législation sur la protection des eaux souterraines.

- 
- <sup>1</sup> Les cantons prescrivent les mesures à prendre dans les aires d'alimentation Zu. S'appliquent également les dispositions et restrictions relatives aux secteurs de protection des eaux et aux zones de protection des eaux souterraines auxquels elles se superposent. Lorsqu'une aire d'alimentation est déterminée dans le karst ou dans des roches fissurées en lieu et place d'une zone S3, les dispositions prévues pour cette dernière s'appliquent, à l'exception de celles concernant l'extraction de matériaux.
  - <sup>2</sup> Les constructions et installations situées en zone S3 ne doivent diminuer ni la capacité d'emmagasinement ni la section d'écoulement des aquifères (annexe 4, ch. 221, al. 1, let. b OEaux). Il est en outre interdit de réduire les couches de couverture de manière importante (annexe 4, ch. 221, al. 1, let. d, OEaux). Il est également interdit d'infiltrer les eaux à évacuer, à l'exception des eaux non polluées provenant des toits, qui peuvent être infiltrées à travers une couche recouverte de végétation (annexe 4, ch. 221, al. 1, let. c, OEaux).
  - <sup>3</sup> Dans le secteur Au, les constructions et installations doivent être construites au-dessus du niveau piézométrique moyen des nappes d'eau souterraines ; l'autorité peut déroger à ce principe, à condition que la capacité d'écoulement naturelle des aquifères ne soit pas réduite de plus de 10 % (annexe 4, ch. 211, al. 2, OEaux). Le drainage ou le rabattement temporaire des eaux souterraines durant le chantier est soumis à autorisation.
  - <sup>4</sup> Les forages sont exécutés avec des moyens appropriés. Il faut comprendre par là des engins de forage équipés de tous les perfectionnements techniques nécessaires, des foreurs bien formés, attentifs aux dispositions légales et instruits des difficultés qu'ils risquent de rencontrer et des mesures à prendre en cas d'urgence, des équipements et des moyens pour prévenir les accidents et pour y remédier, des installations adéquates pour l'entreposage des substances utilisées et pour l'évacuation des déchets produits sur le chantier.

- <sup>5</sup> Exclusivement pour stabiliser les terrains correspondant à la zone non saturée.
- <sup>6</sup> L'autorité compétente peut fixer des exigences minimales concernant par exemple la responsabilité du promoteur ou la dimension des installations, de manière à garantir un contrôle et un entretien correct des ouvrages de prélèvement et de restitution. L'installation de restitution ne pourra pas être affectée à d'autres usages et devra être démontée si elle est mise hors service.
- <sup>7</sup> Les sondes doivent rester au-dessus du niveau piézométrique maximum des nappes d'eau souterraines.
- <sup>8</sup> Il est recommandé de délimiter, à l'extérieur des zones de protection, les régions dans lesquelles les sondes et pieux géothermiques sont autorisés, ceux où ces équipements sont admis sous certaines conditions et ceux où ils sont interdits.
- <sup>9</sup> Par exception, l'autorité compétente peut autoriser la construction d'un bâtiment ou d'une installation sur des biens-fonds correspondant à la zone S3, si les études hydrogéologiques réalisées permettent déjà de fixer les limites des futures zones de protection des eaux souterraines. Les ouvrages ou installations autorisés à titre exceptionnel sont soumis aux restrictions prescrites dans les zones prévues (annexe 4, ch. 23, al. 2, OEaux).
- <sup>10</sup> Pas de pompe à chaleur à expansion directe. Les pertes de liquides doivent être faciles à détecter.
- <sup>11</sup> Selon art. 24 LEaux.
- <sup>12</sup> L'autorisation d'extraire du gravier au-dessous du niveau des nappes d'eau souterraines ne peut être délivrée que si : la section d'écoulement est maintenue pendant et après l'extraction, y compris après remblayage (maintien de couloirs de gravier) et des mesures appropriées permettent d'exclure tout risque de pollution par des liquides pouvant altérer les eaux (dragues à moteur électrique, extraction depuis la rive au moyen d'une dragline, utilisation d'huiles hydrauliques biodégradables, etc.).
- <sup>13</sup> En cas d'extraction de matériaux, il faut laisser une couche de protection d'au moins 2 m au-dessus du niveau naturel maximum décennal des nappes d'eau souterraines ; ce niveau correspond soit au niveau piézométrique maximal enregistré durant une période de mesures régulières couvrant au moins 10 ans, soit d'une valeur calculée de manière statistique si la période de mesures est inférieure à 10 ans, pour autant que la base de données hydrogéologiques soit suffisante ; dans le cas d'une installation d'alimentation artificielle, le niveau effectif de la nappe est déterminant s'il est situé plus haut que le niveau maximal décennal (annexe 4, ch. 211, al. 3, let. a, OEaux).
- <sup>14</sup> Des mesures de protection doivent être prises pour éviter que les forages ne portent atteinte aux eaux souterraines (art 43, al. 3, LEaux).
- <sup>15</sup> Les installations doivent être aménagées à 2 m au moins au-dessus du niveau piézométrique maximum des nappes d'eau souterraines.



<sup>1</sup> D'après art 43 al. 4, les instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines prévoient toutefois que tous les aquifères exploités ou exploitables soient protégés par un secteur Au

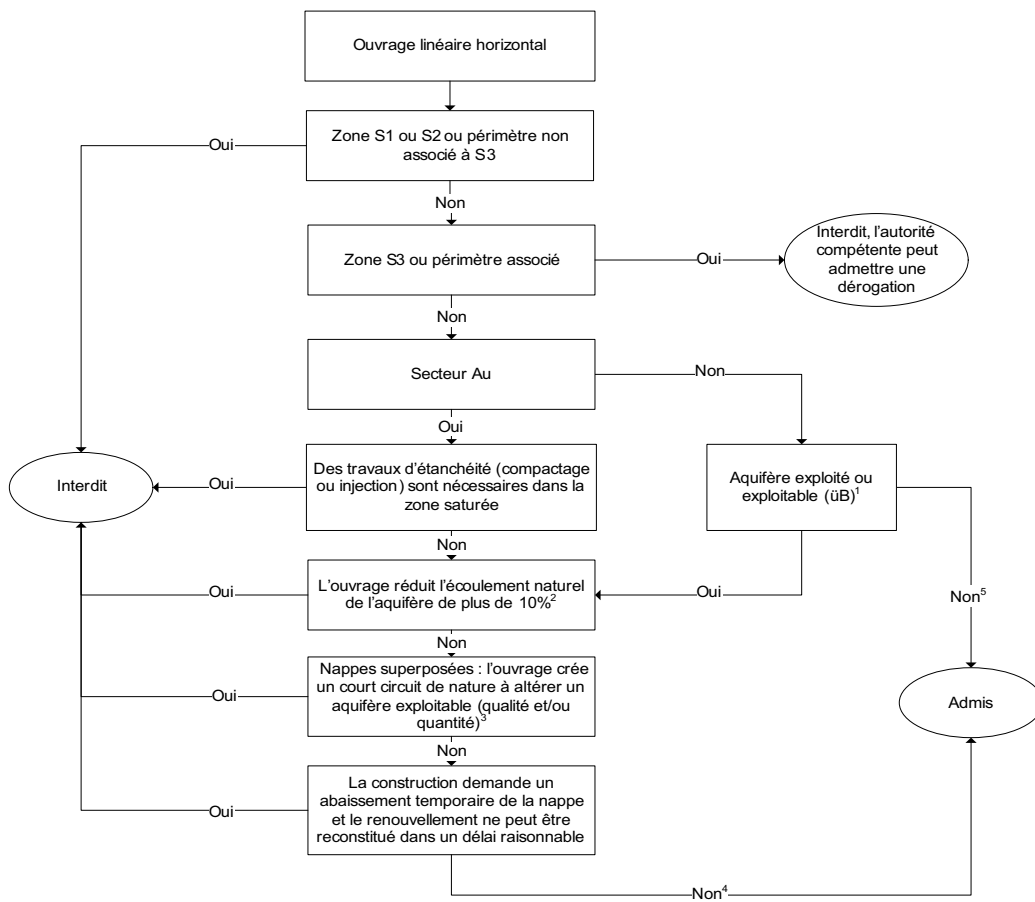
<sup>2</sup> Si des mesures ciblées permettent de réduire l'effet barrière (p.ex. tranchée drainante), l'ouvrage peut être admis

<sup>3</sup> Si des mesures ciblées permettent d'éviter l'effet de court-circuit (p.ex. tubage permanent, géotextiles) l'ouvrage peut être admis

<sup>4</sup> Nécessite une autorisation au sens de l'art 32 Oeaux

<sup>5</sup> Ne nécessite pas une autorisation au sens de l'art 32 Oeaux

FIGURE C.1.: Protection des eaux et ouvrages ponctuels



<sup>1</sup> D'après art 43 al. 4, les instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines prévoient toutefois que tous les aquifères exploités ou exploitables soient protégés par un secteur Au

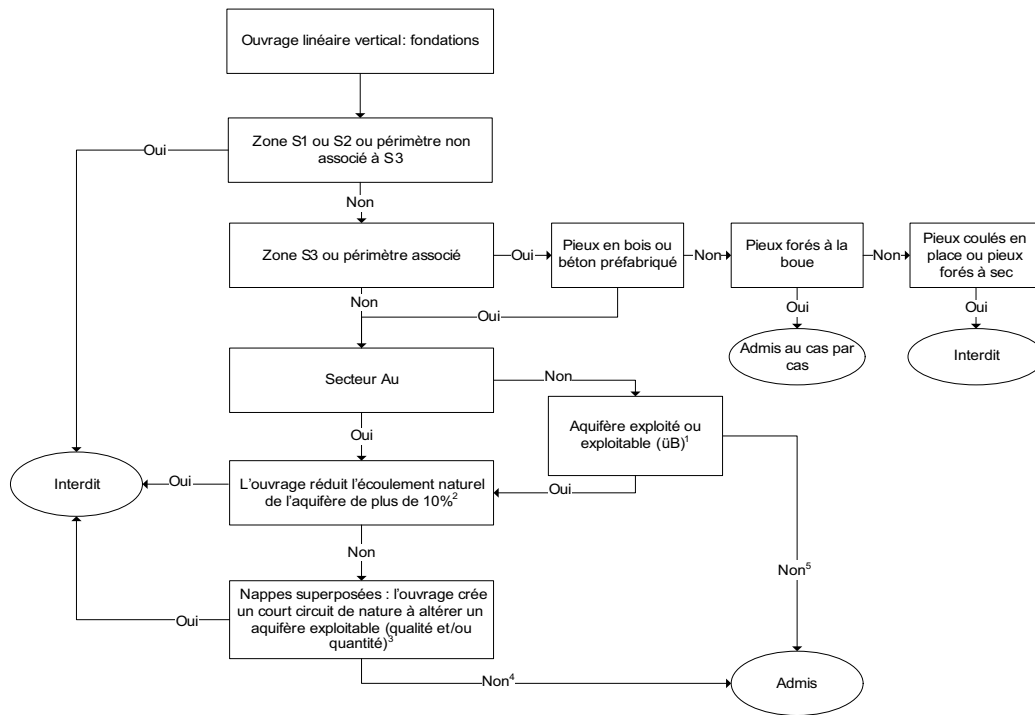
<sup>2</sup> Si des mesures ciblées permettent de réduire l'effet barrière (p.ex. tranchée drainante), l'ouvrage peut être admis

<sup>3</sup> Si des mesures ciblées permettent d'éviter l'effet de court-circuit (p.ex. tubage permanent, géotextiles) l'ouvrage peut être admis

<sup>4</sup> Nécessite une autorisation au sens de l'art 32 OEaux

<sup>5</sup> Ne nécessite pas une autorisation au sens de l'art 32 OEaux

FIGURE C.2.: Protection des eaux et ouvrages linéaires horizontaux



<sup>1</sup> D'après art 43 al. 4, les instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines prévoient toutefois que tous les aquifères exploités ou exploitables soient protégés par un secteur Au

<sup>2</sup> Si des mesures ciblées permettent de réduire l'effet barrière (p.ex. tranchée drainante), l'ouvrage peut être admis

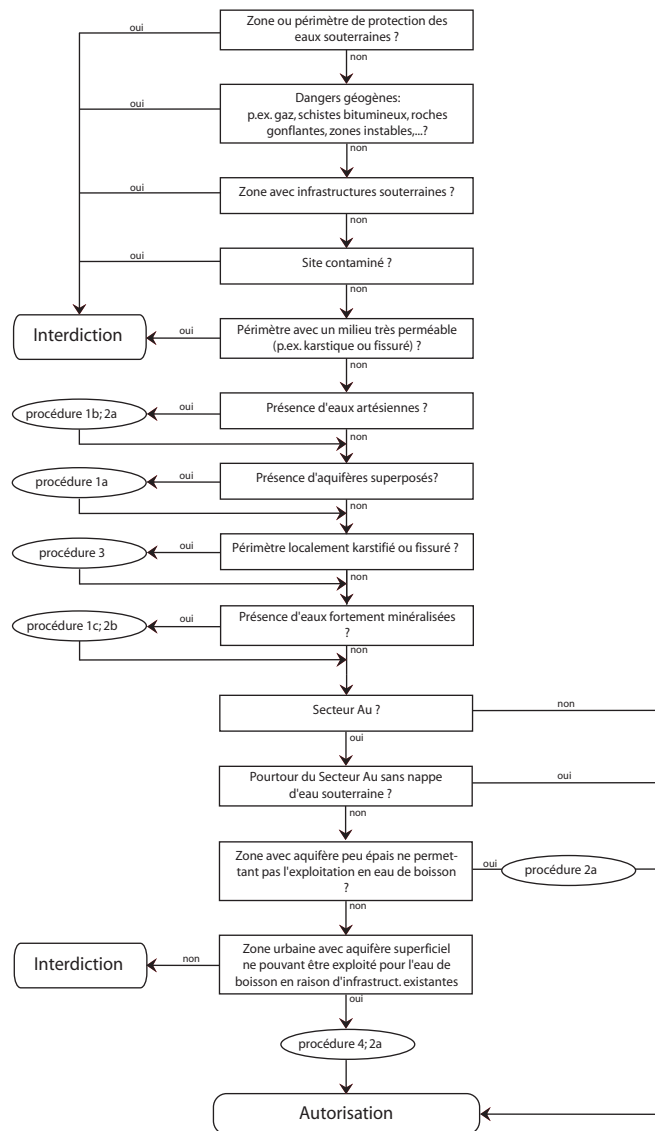
<sup>3</sup> Si des mesures ciblées permettent d'éviter l'effet de court-circuit (p.ex. tubage permanent, géotextiles) l'ouvrage peut être admis

<sup>4</sup> Nécessite une autorisation au sens de l'article 32 Oeaux

<sup>5</sup> Ne nécessite pas une autorisation au sens de l'article 32 Oeaux

FIGURE C.3.: Protection des eaux et ouvrages linéaires verticaux





Procédures :

1. Limitation de la profondeur des sondes.
  - a. afin de ne pas atteindre le toit du deuxième aquifère.
  - b. afin de ne pas atteindre le toit d'un aquifère artésien.
  - c. afin de ne pas atteindre les eaux fortement minéralisées.
2. Equipement des forages :
  - a. Tubage permanent ou mise en place de géotextiles dans les tronçons de terrains meubles ou sur toute la longueur du forage jusqu'au plancher de l'aquifère.
  - b. Mesures de protection contre la corrosion et injection d'un coulis d'injection adapté à la minéralisation des eaux.
3. Investigations supplémentaires
4. Limitation du nombre de sondes et/ou de leur profondeur et/ou de la quantité de chaleur soutirée afin de minimiser l'impact sur les eaux souterraines

FIGURE C.4.: Protection des eaux et sondes géothermiques (source : Brethaut et Parriaux, 2008)

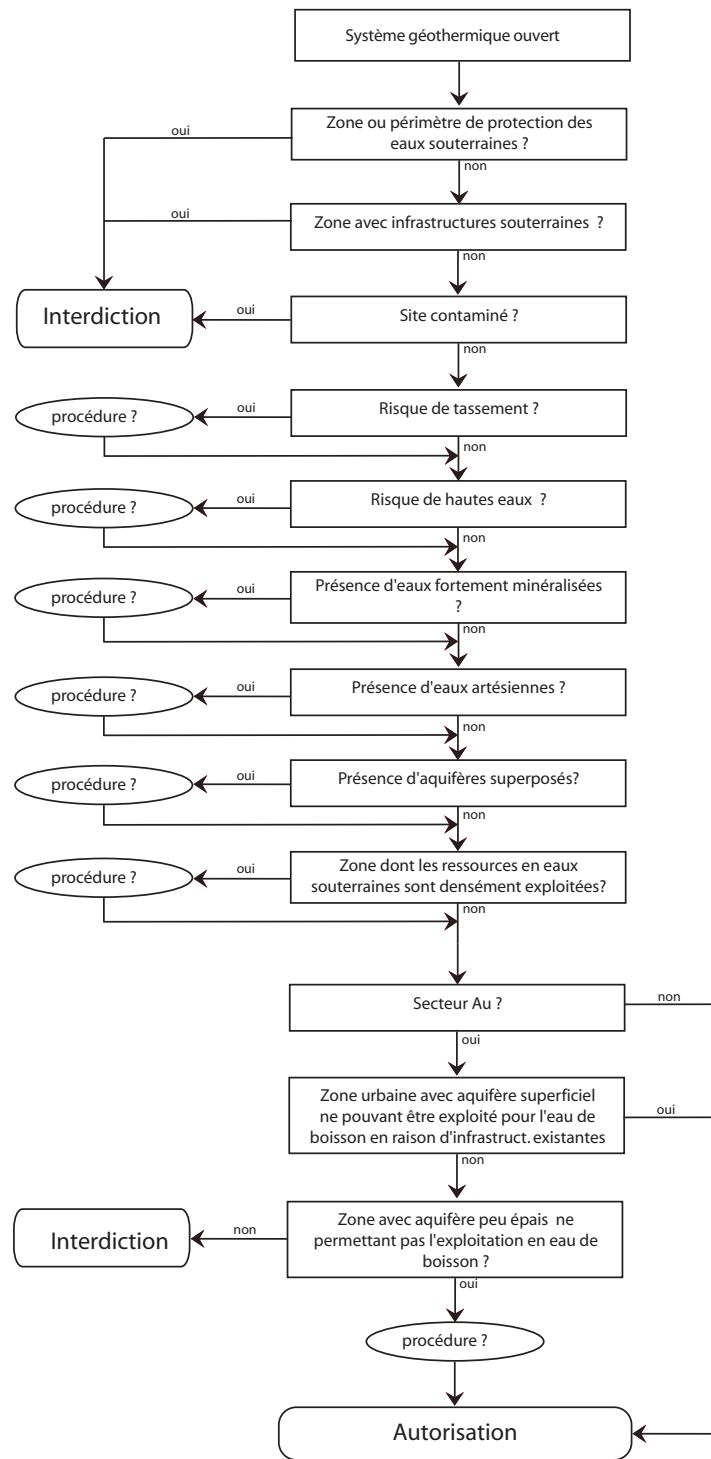


FIGURE C.5.: Protection des eaux et doublets géothermiques (source: Brethaut et Parriaux, 2008)

### C.3. Normes SIA

La norme SIA 197 (Projets de tunnels – Bases générales) est la norme essentielle du point de vue de la construction souterraine. Au niveau de l'exécution, les normes suivantes fixent les exigences pour des milieux professionnels :

- SIA 193.111 : Exécution des travaux géotechniques spéciaux – rideaux de palplanches
- SIA 193.112 : Exécution des travaux géotechniques spéciaux – parois moulées
- SIA 195 : Fonçage de tubes
- SIA 197/1 : Projets de tunnels - Tunnels ferroviaires
- SIA 197/2 : Projets de tunnels – Tunnels routiers
- SIA 198 : Constructions souterraines – Exécution
- SIA 199 : Etude du massif encaissant pour les travaux souterrains
- SIA 267 : Géotechnique
- SIA 272 : Etanchéité des ouvrages enterrés
- SIA 430 : Gestion des déchets de chantier
- SIA 431 : Exécution et traitement des eaux de chantier

Du point de vue de la géothermie, la future norme SIA 384 (Sondes géothermiques) permettra d'uniformiser les modes de dimensionnement des sondes. Elle fixe une prise en compte du contexte géologique et hydrogéologique. La documentation SIA D 0190 (Utilisation de la chaleur du sous-sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton - Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance), présente les principaux conflits liés aux géostructures énergétiques pour l'environnement, sans définir spécifiquement de mesures cibles.

Le tableau des pages suivantes synthétise les principales recommandations.

<b>Interaction</b>	<b>Base normative</b>	<b>Conditions</b>
Concurrence hydrogéologique	SIA 197 (3.3.3, 5.2.1)	- Prise en compte des captages dans le rapport hydrogéologique - Prise en compte dans l'élaboration du projet des atteintes à des aquifères, captages et sources
Effet Barrage	SIA 197 (3.3.2)	- Le rapport hydrogéologique présente les points faisant barrage aux eaux souterraines
Infiltration d'eau de ruissellement	SIA 197 (5.2.1, 5.2.2, 8.6)	- Prise en considération dans l'élaboration du projet des pollutions des eaux issues du tunnel - Pollution par les eaux pendant la phase de chantier prise en compte, norme pour les mesures à prendre (SIA 431) - Prise en compte de risque de fuite depuis le tunnel - Les normes spécifient les standards et méthodes d'étanchéité
Court-circuit entre aquifères superposés	SIA 197 (3.3.2)	- Le rapport hydrogéologique présente les aquifères et leurs interdépendances
Pollution par les matériaux d'injection		
Mobilisation de polluants	SIA 197 (5.2.2)	- Évaluation de la menace due à des zones contaminées touchées par l'ouvrage
Utilisation des ouvrages souterrains pour le captage d'eau		
Infiltration dans les ouvrages	SIA 197 (3.3.4, 8.6, 8.7)	- Le rapport hydrogéologique présente des données sur les venues d'eau attendues - Mesure d'étanchéité et concept de drainage - Les normes spécifient les standards et méthodes d'étanchéité
Modification de la poussée d'Archimède	SIA 197 (7)	- L'analyse structurale doit tenir compte des états limites. Situation transitoire, situation durable et situation accidentelle. La possible augmentation des niveaux phréatiques n'est pas explicitement précisée
Subsidence et soulèvement	SIA 197 (5.2.2)	- Pendant la phase de chantier, prise en compte des effets de compaction des sols

<b>Interaction</b>	<b>Base normative</b>	<b>Conditions</b>
Corrosion des infrastructures et détérioration des ouvrages	SIA 197 (7 et 8)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les possibilités de corrosion doivent être prises en compte dans le projet.</li> <li>- En présence d’eaux agressives permanentes : structure à deux coques des tunnels</li> <li>- Choix des matériaux adaptés aux actions chimiques envisageables</li> </ul>
Géostrucures énergétiques		
Valorisation thermique des flux techniques		
Conflit d’espace		
Modifications thermomécaniques		
Gel du terrain		
Impact des prélèvements		
Valorisation des géomatériaux ou élimination des matériaux d’excavation	SIA 197 (3.7, 5.2.2)	-EIE : plan de gestion des matériaux et évaluation de l’impact (également de la phase de mise en dépôt des matériaux pollués)
Coordination extraction – construction		
Dessaturation des terrains		
Fuites du liquide caloporteur		
Modifications de l’activité biologique		
Modifications chimiques		
Dégradation de la qualité et la quantité des eaux souterraines		
Interaction entre les usages de la géothermie		



## Annexe D

### *Définition des différents géotypes*

Contexte géologique	Groupe de géotypes	Géotype	Code	Définition
Anthropique		Remblais artificiels	R	Débris mis en place par l'homme. Nature très variable allant du matériel d'excavation aux ordures ménagères. Propriétés techniques généralement très mauvaises. Les remblais peuvent contenir des substances dangereuses.
Dépôts de versants		Colluvions / éluvions	CE	Débris de pente emportés par le ruissellement diffus sur les talus (colluvions) ou formations résiduelles dérivées d'autres terrains complètement altérés (éluvions). Terrains de couverture peu structurés, meubles, à dominante granulométrique sable et limon. Présence de matière organique.
		Éboulis, éboulements, écroulements	E	Amas de blocs de taille décimétrique à métrique accumulés en voiles ou en cônes au pied des falaises de roche cohérente. Taille supérieure pour éboulements et écroulements.

Contexte géologique	Groupe de géotypes	Géotype	Code	Définition
		Terrain glissé ou affaissé	GT	Terrain se déplaçant en masse ou s'étant déplacé sous l'effet de la gravité. Selon les applications, ce géotype est remplacé par celui du terrain qui est affecté par le glissement.
		Tuf	T	Précipité de carbonate de calcium au droit des sources à eau bicarbonatée calcique. Géotype à n'utiliser qu'au droit des sources et non sur les encroûtements rencontrés dans les cours d'eau en aval de la source.
Dépôts alluviaux s.l.	Alluvions de plaines	actuelles	APA	Dépôts fluviatiles généralement grossiers, chenalisés, créés par la divagation d'une rivière. Gravier bien roulés.
		en terrasses	APT	Idem mais se trouve perché en terrasses par suite de l'érosion due à la rivière.
	Alluvions en cônes	actuelles	ACA	Dépôt de matériel grossier mais très hétérométrique, stratification plus erratique, faible arrondi. En général en cônes de déjection. Comprend les sédiments des laves torrentielles.
		en terrasses	ACT	Idem mais se trouve perché en terrasses par suite de l'érosion due à la rivière.
	Dépôts lacustres	de delta	LD	Sédiments correspondant aux dépôts grossiers d'embouchure, groupant les topset et foreset beds. Comprend les deltas actuels et les deltas anciens aujourd'hui souvent perchés.
		de fond	LF	Sédiments de fosse lacustre de granulométrie limon – argile – sable fin en fines laminations qui correspondent au bottomset beds. Faiblement à moyennement consolidés.
		craie lacustre	CRL	Dépôt très meuble de fines particules de carbonate de calcium d'origine principalement biogénique.



Contexte géologique	Groupe de géotypes	Géotype	Code	Définition
		dépôts palustres	P	Formations de marais riches en matière organique : tourbes, gyttja.
Dépôts glaciaires s.l.	Moraines	superficielles	MS	Débris anciennement à la surface du glacier, déposés au toit de la moraine. Blocs épars en horizon très discontinu.
		frontales	MFR	Croissant de débris formé au front de la langue glaciaire, soumis à un fort délavage par les eaux du torrent. Gravier à blocs avec sédimentation fortement perturbée par la tectonique glaciaire.
		latérales	MLAT	Crête de débris, moins fortement lavés que ceux de la moraine frontale.
		de fond	MF	Coussin de débris à la base du glacier. Terrain très hétérogranulaire, non stratifié, fortement surconsolidé. Les éléments grossiers sont imbriqués dans la matrice fine (matrix supported textures).
		aquatiques	MA	Dépôt de granulométrie fine, riche en argile, sans stratification, peu consolidé. Les galets morainiques sont rares.
	Périglaciaire	Fluvioglaciaires	FG	Alluvions grossières à stratification parfois perturbée par des affaissements dus à la glace morte. Éléments moins arrondis et moins ségrégués du point de vue de leur résistance à l'usure que dans les dépôts fluviatiles.
		Glaciolacustres	GL	Alternance de limons et d'argiles en fines laminations similaires au lacustre de fond mais avec présence de galets épars (dropstones). Peuvent être parfois fortement surconsolidés.
		Loess	LO	Limons et sables fins quartzueux d'origine éolienne.

Contexte géologique	Groupe de géotypes	Géotype	Code	Définition
Roches	Détritiques	Conglomérats avec quelques marnes	COM	Présence importante de bancs conglomératiques dans les cyclothèmes deltaïques. Correspond principalement à la molasse dite helvétique (OMM supérieur) ou à certaines écaïlles de la molasse subalpine.
		Grès	GR	Série essentiellement gréseuse. Correspond souvent à la molasse dite burdigalienne (OMM inférieure).
		Grès avec quelques marnes	GRM	Séries à dominante gréseuse avec encore des séquences marneuses importantes. Correspond souvent à la molasse dite aquitanienne (USM supérieure).
		Marnes avec quelques grès	MGR	Séries à dominante marneuse. Correspond souvent à la molasse dite chattienne (USM inférieure) et peut contenir du gypse.
		Alternance grès-schistes argileux	GS	Principalement faciès schisto-gréseux du flysch.
		Argilite	A	Séries à dominante argileuse. Comprend principalement les argiles à Opalinus du Jura et l'Aalénien de l'Helvétique.
	Marno-calcaires	Marnes	M	Séries à dominante marneuse pratiquement dépourvue de calcaires. Comprend les marnes de Hauterive du Jura et diverses séries marneuses des Alpes.
		Alternance marnes-calcaires	MC	Comprend les couches d'Effingen dans l'Argovien du Jura et de nombreuses séries de l'Helvétique.
	Carbonatées	Calcaires	C	Séries calcaires pratiquement dépourvues de marnes. Comprend le Jurassique supérieur du Jura et les calcaires massifs de l'Helvétique.

Contexte géologique	Groupe de géotypes	Géotype	Code	Définition
		Calcaire siliceux	CS	Calcaires à imprégnation diffuse de silice ou à silex. Comprend le Lias de la Nappe des Préalpes médianes plastique.
		Calcaire argileux	CA	Série à dominante calcaire contenant une part importante d'argile. Comprend les couches de Birmensdorf du Jura.
		Calcaire dolomitique	CD	Séries à dominante de calcaires dolomitiques. Essentiellement Trias alpin.
		Dolomie	D	Séries à dominante de dolomies. Essentiellement Trias alpin.
	Évaporitiques	Gypse	G	Séries à dominante de gypse. Essentiellement Trias alpin, à des profondeurs inférieures à 100 m.
		Cornieule	CO	Brèche vacuolaire dans le Trias alpin, souvent dans les zones de contacts tectoniques.
		Anhydrite	AN	Séries à dominante d'anhydrite. Essentiellement Trias alpin, à des profondeurs supérieures à quelques décamètres.
		Roche salifère	RS	Roche à halite du Trias ultra-helvétique de la région de Bex.
	Métamorphique	Quartzite	Q	Roche holoquartzreuse très dure, parfois arénisée, du Trias alpin.
		Gneiss	GN	Roche quartzofelspathique à micas, fortement anisotrope. Présente dans les massifs cristallins alpins.
	Magmatique	Granite	GRA	Roche quartzofelspathique à micas, isotrope. Présente dans les massifs cristallins alpins.



## *Traduction de la géologie genevoise en géotypes*

Le sous-sol genevois est régulièrement décrit à l'échelle de la couche par les descripteurs de formations géologiques suivants : molasse chatienne, moraine rissienne, alluvion ancienne, moraine würmienne, alluvion récente. C'est cette stratigraphie qui sert de base à la construction du modèle descriptif de la géologie du Genevois. Une classification spécifique des sols a été développée pour le canton de Genève par Deriaz *et al.* (1997) (ci-dessous classification GADZ). Elle est présentée à la figure E.1. Elle est utilisée pour établir les cartes géologiques et géotechniques du canton de Genève.

À partir des descriptifs et des propriétés géologiques et géotechniques, un système de conversion entre les géotypes, la classification GADZ et les formations géologiques est développé. Ce système de conversion est présenté à la table E.1. Trente-six descripteurs du système genevois sont traduits en onze géotypes ; un même géotype pouvant être attribué à des faciès de différentes stratigraphies. Les deux géotypes APA et APT ne peuvent pas être discriminés par les faciès de la classification GADZ. Sur le plan génétique, les deux géotypes sont très similaires, ils ont par ailleurs les mêmes propriétés granulométriques. C'est un facteur géomorphologique qui les distingue, et qui a pour conséquence des propriétés hydrogéologiques différentes (les alluvions de plaines actuelles seront généralement saturées, celles de terrasses non). Dans ce projet, les facteurs hydrogéologiques sont traités spécifiquement et l'ensemble des formations alluvionnaires récentes modélisées faisant parti d'une formation aquifère liée aux eaux de surface, on utilise uniquement le géotype : alluvions de plaines actuelles APA et on distingue hydrogéologiquement les régions saturées des régions non saturées.

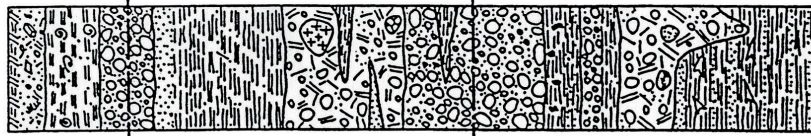
Une analyse statistique de la présence des différents faciès et des différents géotypes dans la ville de Genève est réalisée. Pour cela, les cartes géologiques et géotechniques au 1 :5000 du canton numéros 38, 39, 50, 51, 52, 58 et 59 et 60 ont été numérisées (figure E.2) puis transformées à l'aide du tableau de conversion pour créer une carte des géotypes (figure E.3).

PRINCIPE DE NUMEROTATION

Npx,y	N	No de la formation	Phases :	a	graveleuse
	p			b	sableuse
				c	limoneuse
				d	limono-argileuse
				e	argileuse
				f	crayeuse
x			compacité et consistance :	1	élevée
				1-2	moyenne
				2	faible
y			phase	3	altérée

PHASE	COUCHE	COUVERTURE ET REMBLAIS	FORMATION	DESCRIPTION
c, d, e	1, 2			Terrains récents
a, b, c	3			Terrains de couverture, sols actuels (remblais)
a, b, c, d, e, f	4			Remblais
a, b, c, d, e, f	5			Terrains holocènes
a, b, c, d, e	6			Eboulis, formations de pente, colluvions, limon de ruissellement
c, d, e	7			Alluvions de terrasses
a, (b, c)	9			Dépôts ou vases lacustres, tourbe, craie lacustre
c, d, e	10			Terrains glaciaires würmiens
a, b, c, d	11			Formations supraglaciaires de retrait
c, d, e	12			Moraine à cailloux et blocs alpins
b, c, d, e	14			Dépôts intramorphiques ou intraformationnels
b, c, d, e	15			Cailloutis morainiques profonds ou "alluvion ancienne"
				Terrains attribués à l'interglaciaire Riss-Würm interglaciaire
				Terrains glaciaires attribués au Riss
				Formation de retrait
				Moraine à cailloux et blocs alpins
				Dépôts intramorphiques ou intraformationnels
				Substratum rocheux molassique
				Complexe de la Molasse grise du Chattien supérieur
				Complexe de la Molasse rouge du Chattien inférieur

COUCHE



N.P. I  
V  
sup.

N.P.2  
V  
prof.

FIGURE E.1.: Classification des sols genevois et profil type de la cuvette genevoise

TABLE E.1.: Système de conversion entre les géotypes et les différents systèmes de description géologique

<b>Géotype</b>	<b>GADZ</b>	<b>Description du géotype</b>	<b>Formation géologique</b>
R	2	Remblais artificiels	Terrains récents
CE	3c 3d 3e	Colluvions	Terrains holocènes
APA	4a 4b	Alluvions de plaines actuelles	Alluvion récente
APT	4a 4b	Alluvions de plaines en terrasses	Alluvion récente
LF	4c 5c 5d 5e 5f	Dépôts alluviaux - dépôts lacustres -de fond	Alluvion récente
LD	5a 5b	Dépôts alluviaux - dépôts lacustres -de delta	Alluvion récente
FG	6a 6b	Dépôts glaciaires fluvio-glaciaires	Moraine Würmienne
GL	6c 6d 6e	Sédiments glaciolacustres	Moraine Würmienne
MF	7c 7d 7e	Moraine de fond	Moraine Würmienne
FG	9a 9b	Dépôts glaciaires fluvio-glaciaires	Alluvion ancienne
GL	9c	Sédiments glaciolacustres	Alluvion ancienne
LF	10c 10d 10e	Dépôts alluviaux - dépôts lacustres -de fond	Alluvion ancienne
MLat	11a 11b	Moraine latérale	Moraine rissienne
MF	11c 11d 12c 12d 12e	Moraine de fond	Moraine rissienne
MGR	14 15	Marnes avec quelques grès	Molasse chatienne



FIGURE E.2.: Carte géologique et géotechnique, Genève

Les terrains cartographiés comme ne faisant pas plus de 5 m de profondeur, pour des questions de lisibilité, ne sont pas reportés sur la carte, mais ils sont intégrés dans l'analyse.

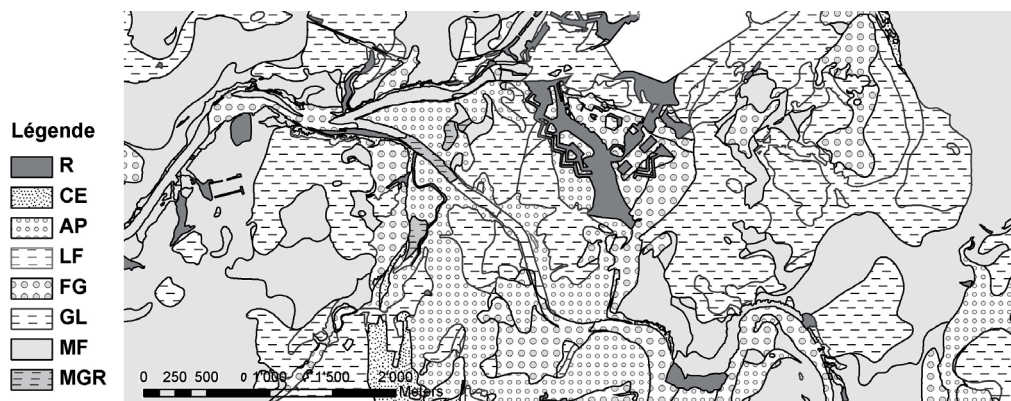


FIGURE E.3.: Carte des géotypes, Genève

Les terrains cartographiés comme ne faisant pas plus de 5 m de profondeur, pour des questions de lisibilité, ne sont pas reportés sur la carte, mais ils sont intégrés dans l'analyse.



À partir de la carte des géotypes, les surfaces de chacun des géotypes sont mesurées. La répartition de ces surfaces est présentée à la figure E.4. Les données étant dérivées de la carte géologique et géotechnique, elles sont représentatives essentiellement de la géologie à l’affleurement ou en faible profondeur. La molasse est par exemple ici sous-représentée, alors que c’est un socle que l’on retrouve sur l’ensemble du Genevois. Cette analyse des surfaces montre que huit géotypes sont représentés sur les cartes géologiques. L’analyse des surfaces de géotypes est ensuite traduite au sein des formations géologiques.

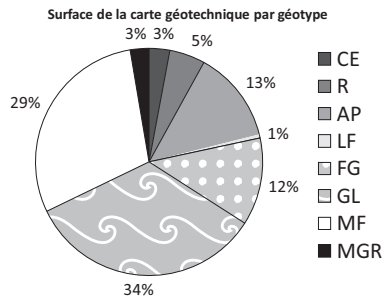
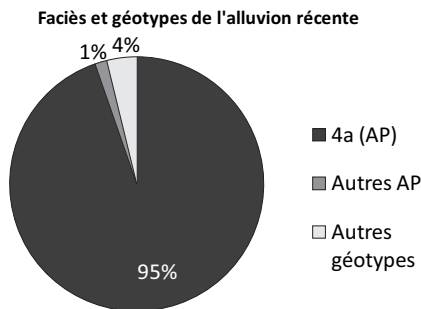
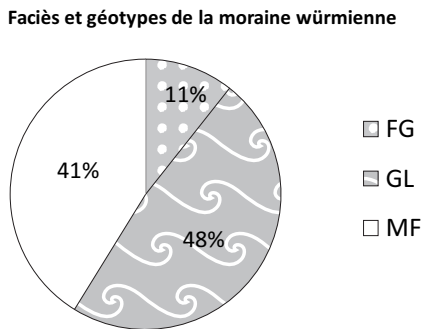


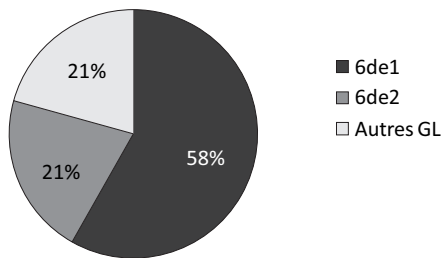
FIGURE E.4.: Répartition des surfaces par géotype sur la carte des géotypes. La surface totale considérée est 3970 ha



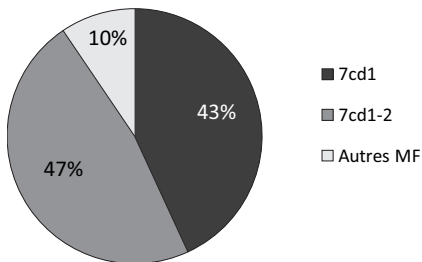
Au sein de l’alluvion ancienne, seul un géotype est représenté : AP. Par ailleurs, ce géotype est représenté pour l’essentiel par une couche : 4a



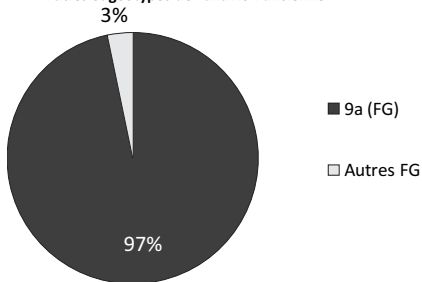
Au sein de la moraine würmienne, deux géotypes couvrent 89 % de la surface : GL et MF.

**Faciès du géotype GL: moraine würmienne**

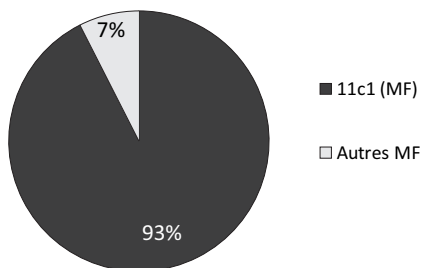
Le géotype GL de la moraine würmienne est représenté essentiellement par les couches 6de1 et 6de2 – Ces couches sont en fait une agrégation cartographique des couches 6d1 et 6e1 pour la première, et 6d2 et 6e2 pour la seconde.

**Faciès du géotype MF : moraine würmienne**

Le géotype MF de la moraine würmienne est représenté essentiellement par les couches 7cd1 et 7cd1-2 - Ces couches sont en fait une agrégation cartographique des couches 7c1 et 7d1 pour la première, et 7c1-2 et 7d1-2 pour la seconde.

**Faciès et géotypes de l'alluvion ancienne**

Au sein de l'alluvion récente, seul un géotype est représenté : FG. Par ailleurs, ce géotype est représenté pour l'essentiel par une couche : 9a.

**Faciès et géotypes de la moraine rissienne**

Au sein de la moraine rissienne, seul un géotype est représenté : MF. Par ailleurs, ce géotype est représenté pour l'essentiel par une couche : 11c1.

Cette analyse des géotypes et des principales couches permet de développer une représentation simplifiée basée sur les faciès les plus représentatifs du Genevois figure E.5. Pour cette représentation simplifiée, on ne retient finalement que cinq géotypes différents. On note qu'elle ne tient pas compte des formations de remblais ni de ceux de colluvionnement et d'éluvionnement. En effet, ces formations sont liées à des facteurs génétiques très locaux. Il n'est donc pas pertinent de les représenter à l'échelle urbaine.

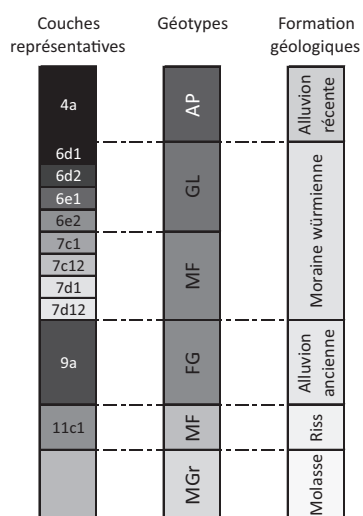


FIGURE E.5.: Représentation simplifiée de la géologie genevoise

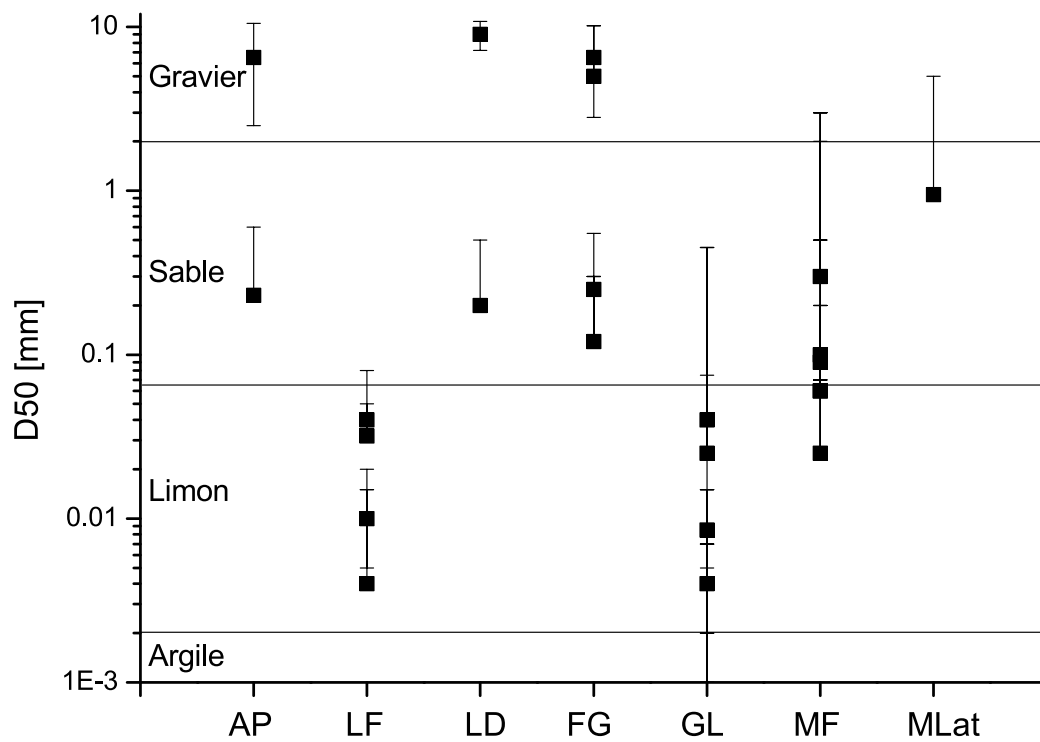
Les couches représentatives ne comportent pas l'ensemble des couches (cf. classification GADZ). Par ailleurs, au sein des couches de type 6 et de type 7, les relations stratigraphiques présentées ne respectent pas obligatoirement les empilements stratigraphiques du terrain (par exemple, un faciès 6e1 peut se trouver au-dessus d'un faciès 6d1).

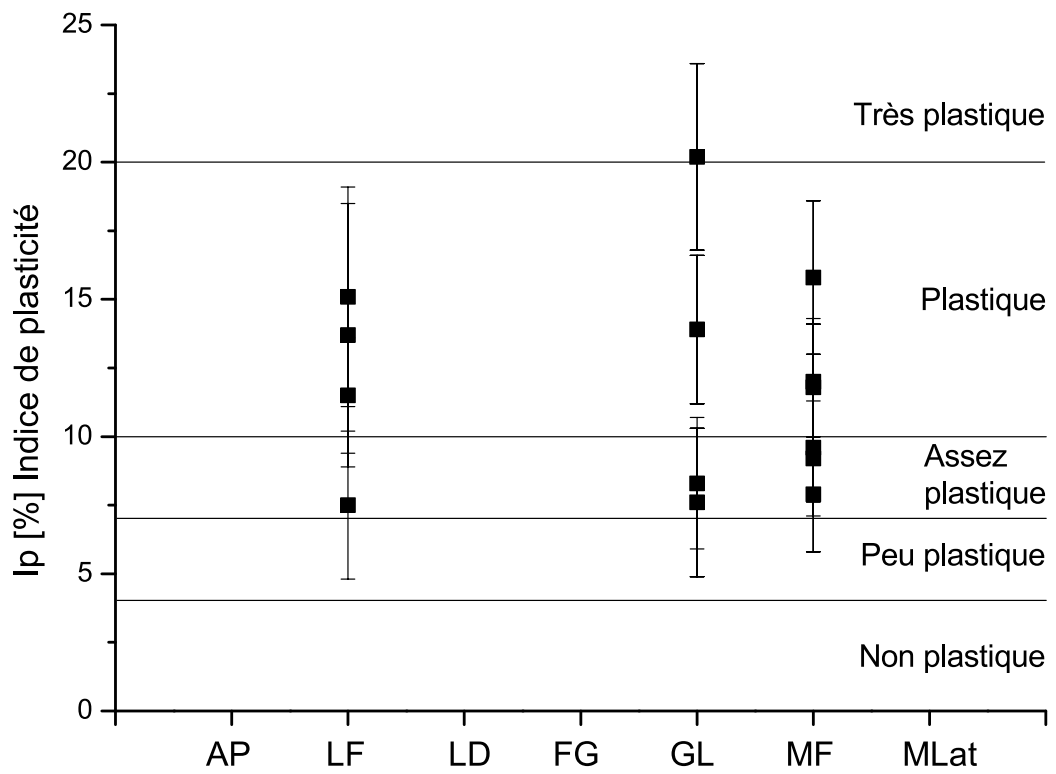
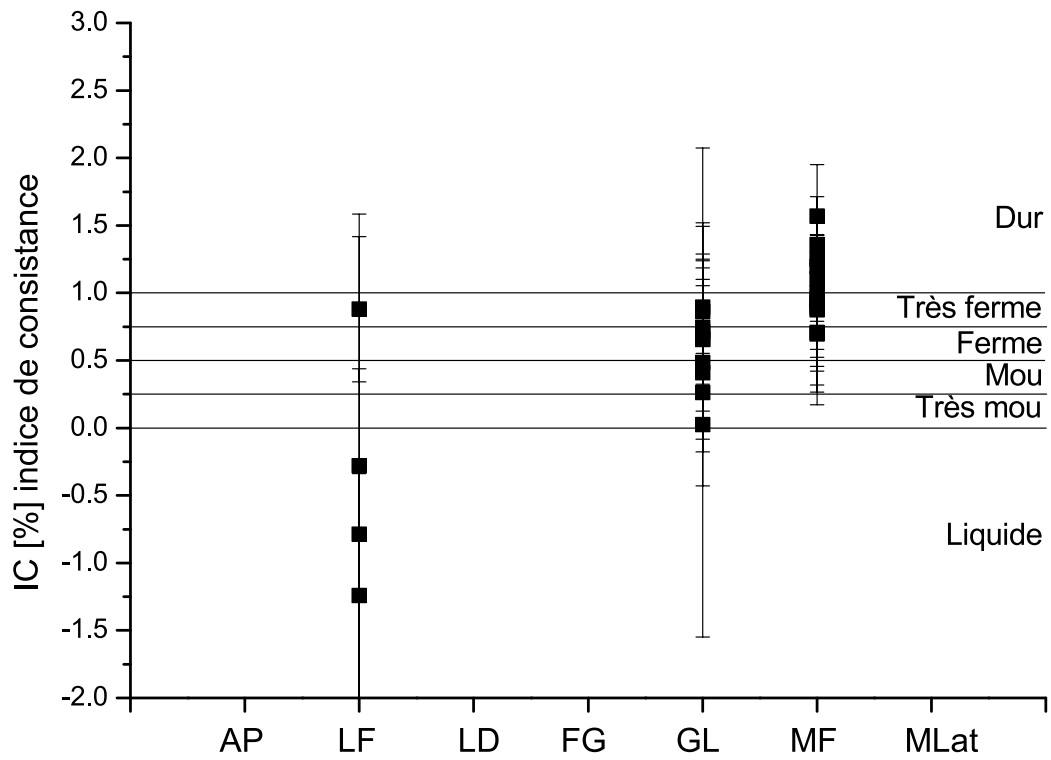


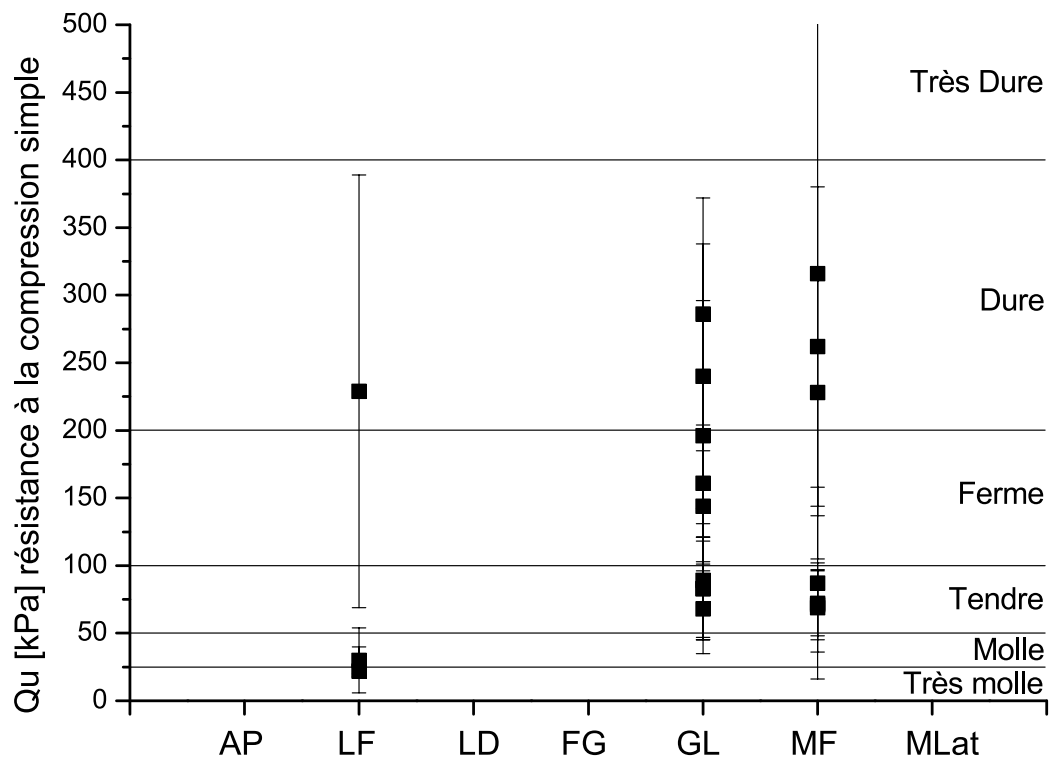
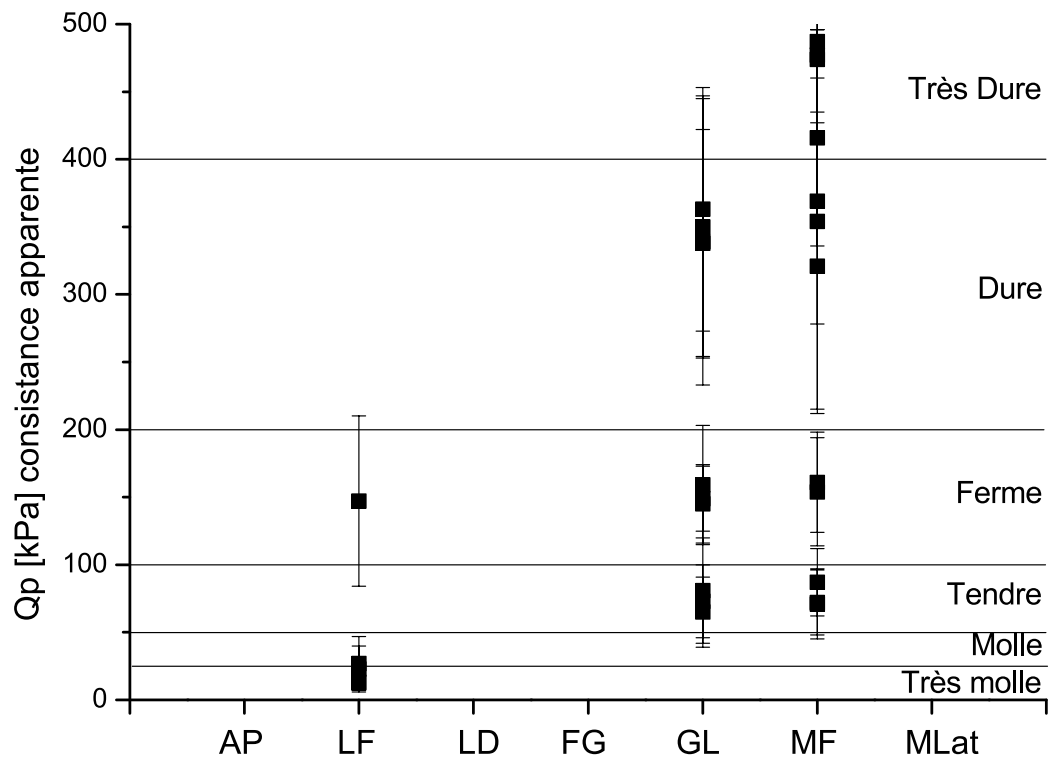
## Annexe F

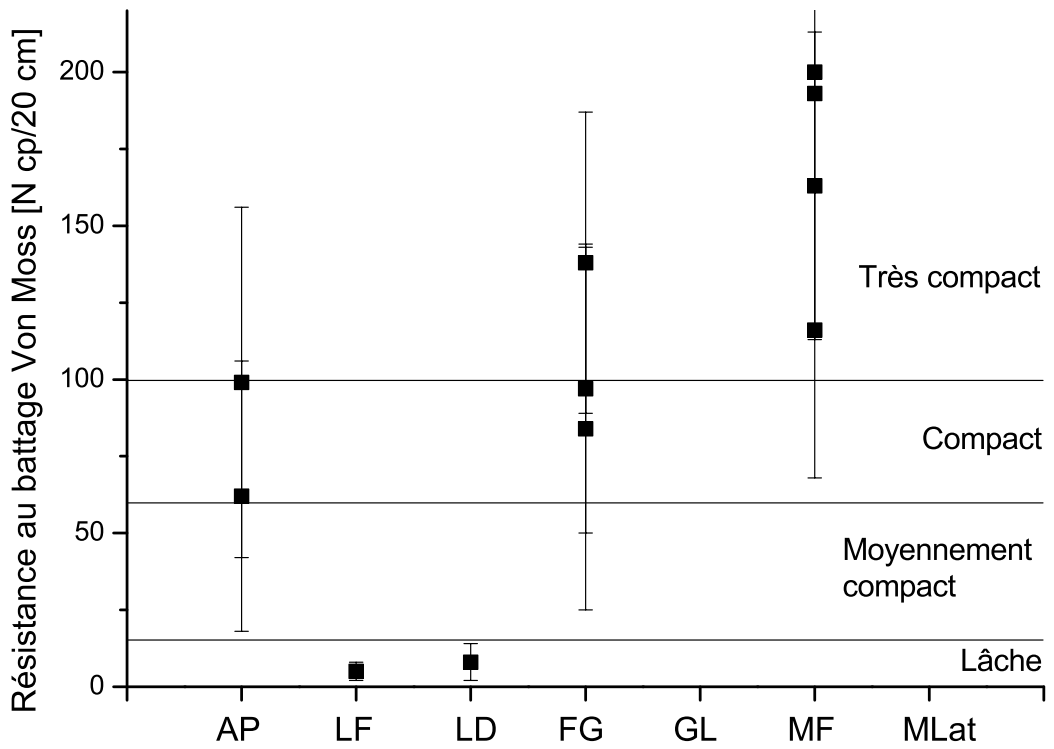
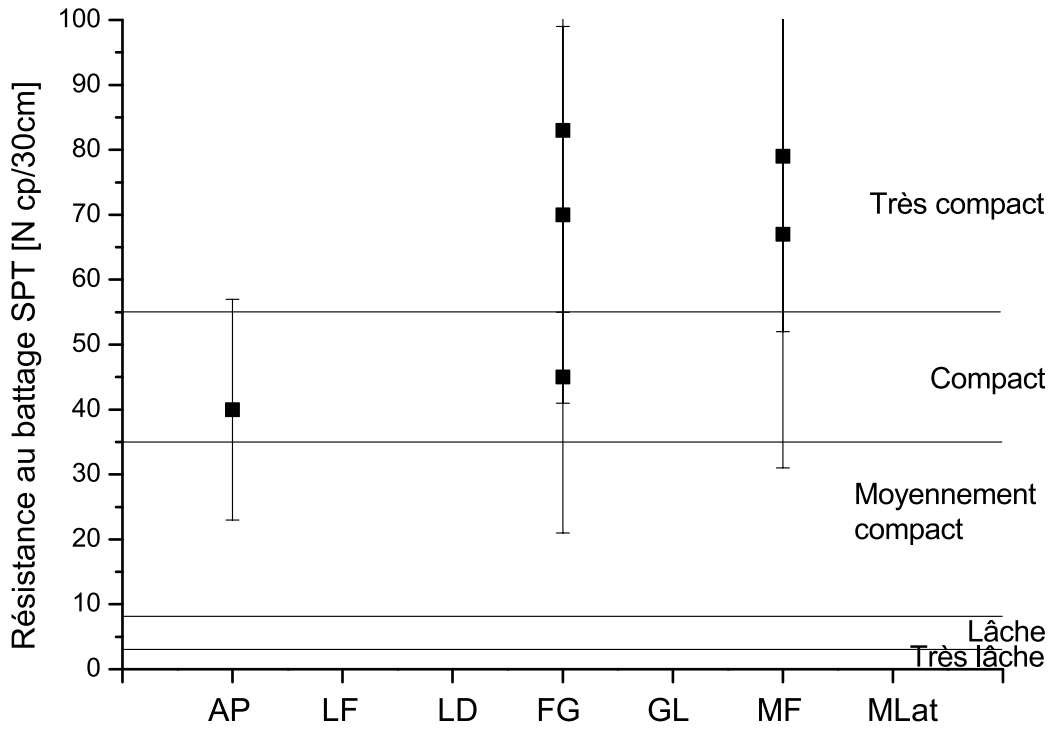
### *Paramètres géotechniques des géotypes de la géologie genevoise*

Les graphiques de cette annexe sont une traduction des paramètres géotechniques des sols genevois issus de Deriaz *et al.* (1997), interprétés à l'aide de notre modèle des géotypes.

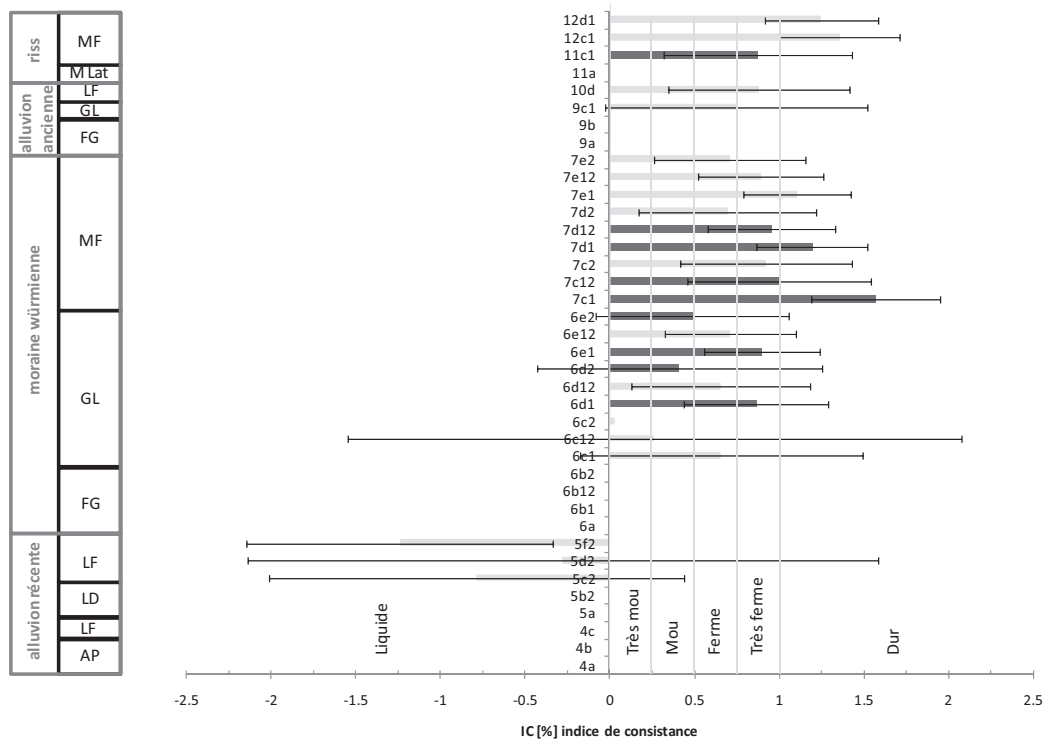
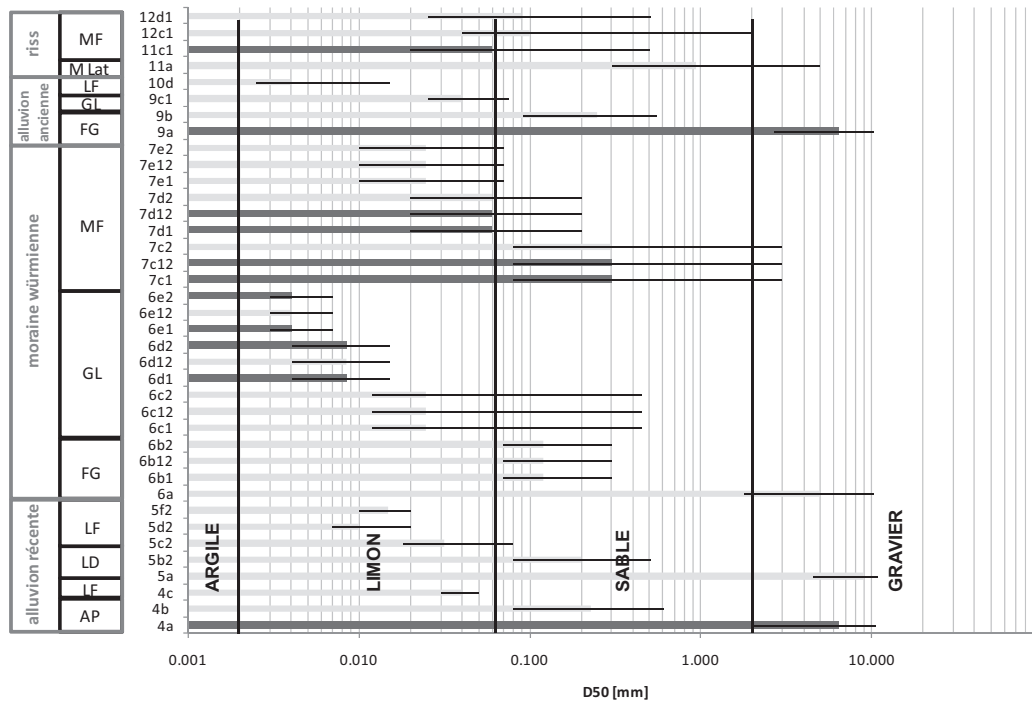


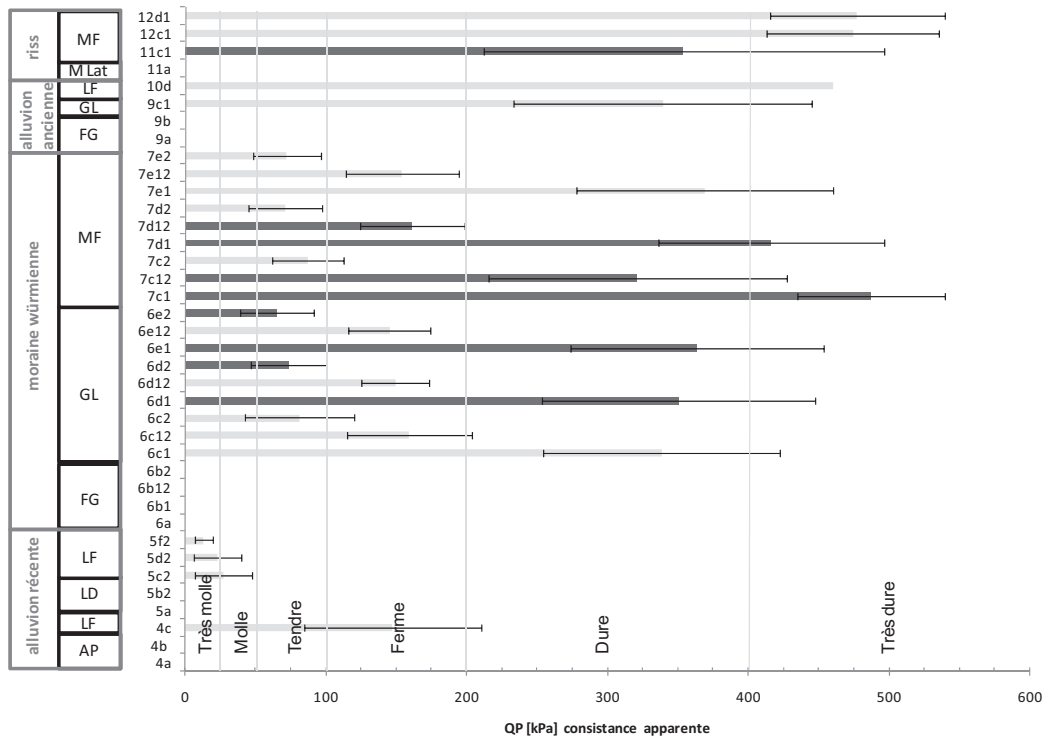
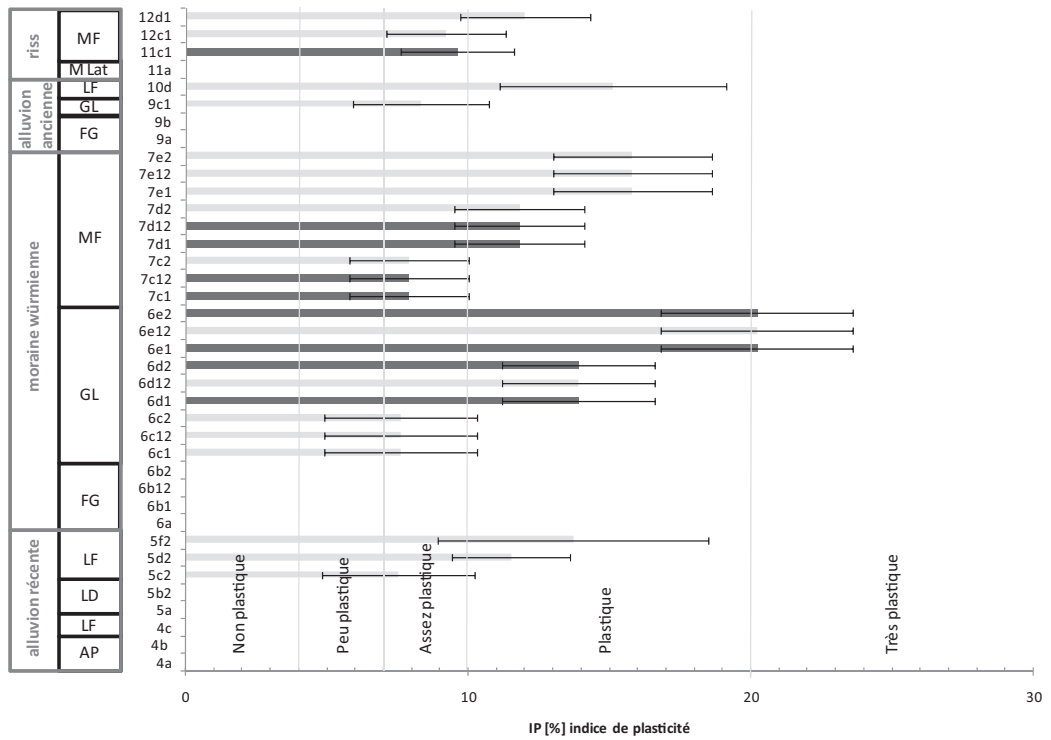




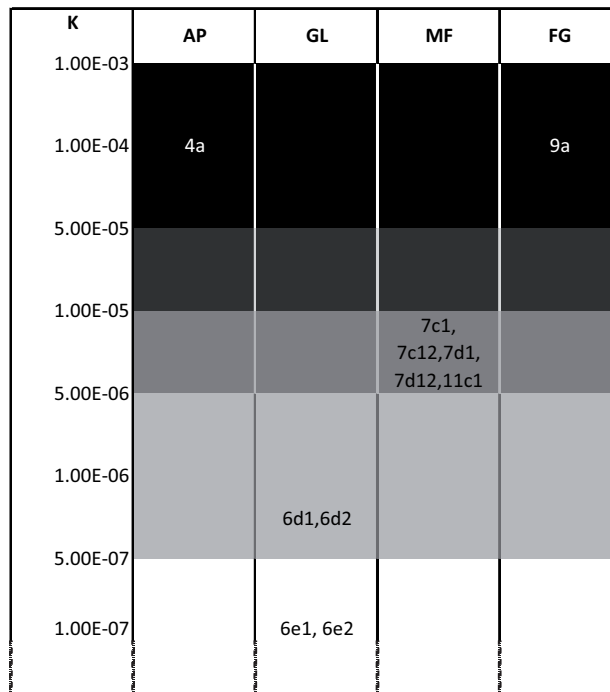
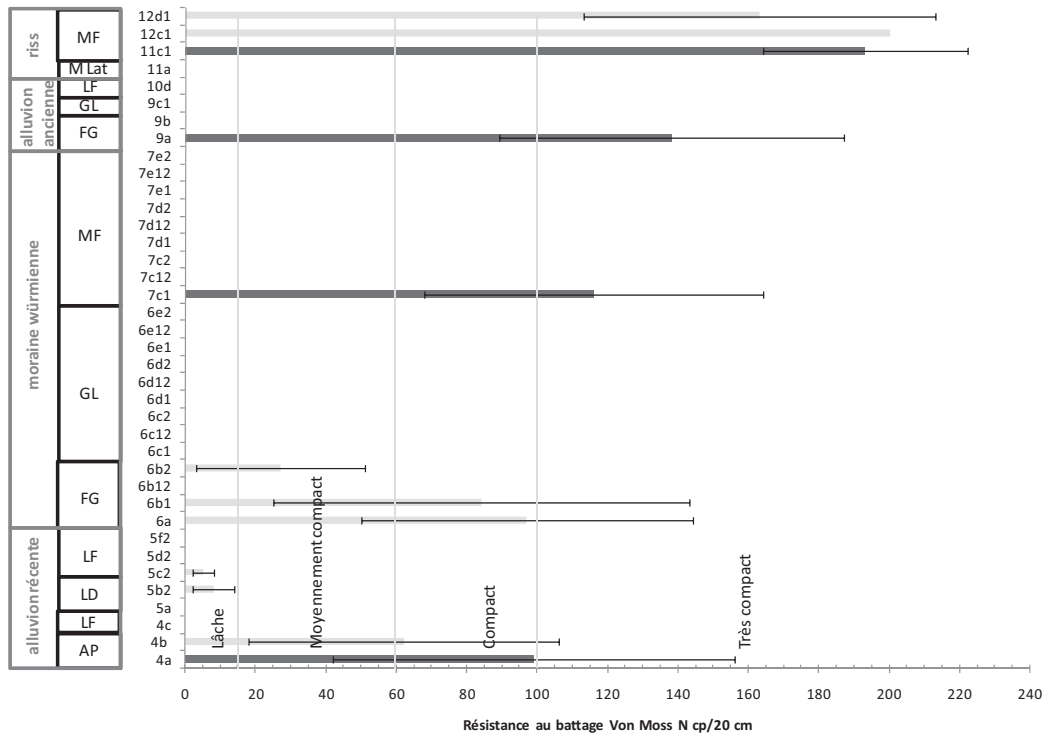


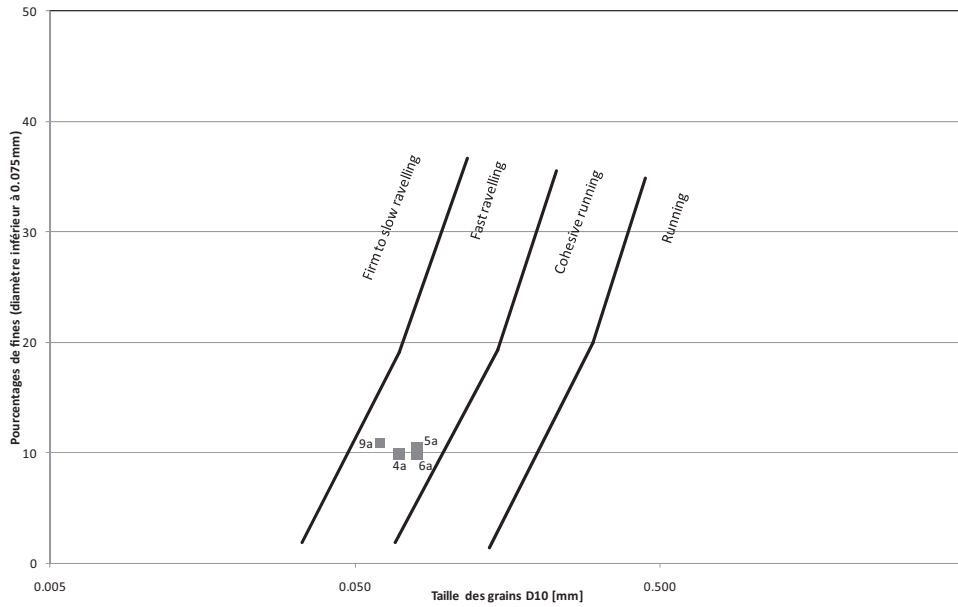












			AP	LP	LD	FG	GL	MF	Mist
Major divisions		Group symbol							
Coarse grained soils more than 50% retained on No.200 (0.075 mm) sieve	gravel > 50% of coarse fraction retained on No.4 (4.75 mm) sieve	clean gravel	GW						
		poorly graded gravel	GP						
	sand >= 50% of coarse fraction passes No.4 sieve	clean sand	SW						
		poorly graded sand	SP						
Fine grained soils more than 50% passes No.200 sieve	silt and clay liquid limit < 50	inorganic	ML						
		organic	OL						
	silt and clay liquid limit >= 50	inorganic	MH						
			CH						
		organic	OH						
			Pt						

VALEURS SIA 384/6			
Conductivité thermique λ saturé (W/m.K)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Capacité calorifique Cv sec (MJ/m3.k)	Capacité calorifique Cv saturé (MJ/m3.K)

Major divisions			Group symbol	Group name	Conductivité thermique λ saturé (W/m.K)	Conductivité thermique λ (W/m.K)	Capacité calorifique Cv sec (MJ/m3.k)	Capacité calorifique Cv saturé (MJ/m3.K)
Coarse grained soils more than 50% retained on No.200 (0.075 mm) sieve	gravel > 50% of coarse fraction retained on No.4 (4.75 mm) sieve	clean gravel	GW	well graded gravel, fine to coarse gravel	0.4-0.5	1.6-2.0	1.3-1.6	2.2-2.6
		poorly graded gravel	GP					
	sand >= 50% of coarse fraction passes No.4 sieve	clean sand	SW	well graded sand, fine to coarse sand				
		poorly graded sand	SP					
Fine grained soils more than 50% passes No.200 sieve	silt and clay liquid limit < 50	inorganic	ML	silt	0.4-1	0.9-2.3	1.5-1.6	2.0-2.8
			CL	clay				
	silt and clay liquid limit >= 50	inorganic	MH	silt of high plasticity, elastic silt				
			CH	clay of high plasticity, fat clay				
		organic	OH	organic clay, organic silt				
			Pt	peat				

					VALEURS SIA 384/6				
Major divisions					Conductivité thermique $\lambda$ sec (W/m.K)	Conductivité thermique $\lambda$ saturé (W/m.K)	Capacité calorifique Cv sec (MJ/(m3.K))	Capacité calorifique Cv saturé (MJ/(m3.K))	
Major divisions			Group symbol	Group name					
Coarse grained soils more than 50% retained on No.200 (0.075 mm) sieve	gravel > 50% of coarse fraction retained on No.4 (4.75 mm) sieve	clean gravel	GW	well graded gravel, fine to coarse gravel	0.4	1.7	1.4	2.3	
			GP	poorly graded gravel					
			GM	silty gravel					
	sand >= 50% of coarse fraction passes No.4 sieve	gravel with >12% fines	clean sand	GC	clayey gravel	0.5	2.3	1.4	2.4
				SW	well graded sand, fine to coarse sand				
				SP	poorly-graded sand				
SM				silty sand					
Fine grained soils more than 50% passes No.200 sieve	silt and clay liquid limit < 50	inorganic	ML	silt	0.6	1.4	1.5	2.3	
			CL	clay					
		organic	OL	organic silt, organic clay					
			silt and clay liquid limit >= 50	inorganic					MH
	CH	clay of high plasticity, fat clay							
	organic	OH		organic clay, organic silt					
		Pt		peat					
	Highly organic soils								

						Perméabilité K [m/s]
Major divisions				Group symbol	Group name	
Coarse grained soils more than 50% retained on No.200 (0.075 mm) sieve	gravel > 50% of coarse fraction retained on No.4 (4.75 mm) sieve	clean gravel	GW	well graded gravel, fine to coarse gravel	>10-2	
			GP	poorly graded gravel	>10-2	
			GM	silty gravel	10-3_10-6	
	sand >= 50% of coarse fraction passes No.4 sieve	gravel with >12% fines	clean sand	GC	clayey gravel	10-6_10-8
				SW	well graded sand, fine to coarse sand	>10-3
				SP	poorly-graded sand	>10-3
SM				silty sand	10-3_10-6	
Fine grained soils more than 50% passes No.200 sieve	silt and clay liquid limit < 50	inorganic	SC	clayey sand	10-6_10-8	
			ML	silt	10-3_10-8	
		organic	CL	clay	10-6_10-8	
			OL	organic silt, organic clay	10-4_10-6	
	silt and clay liquid limit >= 50	inorganic	MH	silt of high plasticity, elastic silt	10-4_10-6	
			CH	clay of high plasticity, fat clay	10-6_10-8	
		organic	OH	organic clay, organic silt	10-6_10-8	
			Pt	peat		
Highly organic soils						

## *Méthode des comparaisons par paires*

La méthode de comparaison par paires est un processus de formalisation pour exprimer de manière quantitative des préférences perçues, des valeurs ou des jugements d'experts sur des variantes ou des critères. Les premiers fondements scientifiques de cette méthode ont été posés par (Thurstone, 1927). L'approche a été développée dans de nombreux domaines tels que la psychologie, la recherche opérationnelle, l'aide à la décision. Dans le cadre de ce travail, c'est la démarche développée par Saaty (1980) pour sa méthode d'aide à la décision AHP<sup>1</sup> qui est utilisée. Cette annexe montre l'application de la méthode. Le lecteur intéressé par les fondements mathématiques peut se référer à la littérature (par exemple: Saaty, 1980, 1990).

La méthode peut être appliquée à la formalisation d'une échelle de pondération pour des objectifs ou des critères, mais également à la construction d'indicateurs cardinaux à partir de valeurs qualitatives ou ordinales pour différentes actions. La méthode est illustrée ci-dessous pour la comparaison d'objectifs. Elle peut cependant s'appliquer de manière analogue pour comparer des critères ou des alternatives.

La méthode de comparaison par paires se fonde sur l'hypothèse de transitivité de la préférence, c'est-à-dire que si A est préféré à B et B est préféré à C, alors A est préféré à C.

L'illustration est réalisée pour la comparaison de trois objectifs

- O1 = Efficacité économique
- O2 = Préservation de l'environnement
- O3 = Cohésion sociale

Le but est de construire une échelle de pondération pour ces trois objectifs à l'intention d'un décideur.

### **G.1. Construction de la matrice de comparaison**

Dans un premier temps, pour établir une échelle de comparaison de manière systématique, il est plus simple de ranger les objectifs par ordre de préférence décroissant, par exemple O3 est préféré à O1 qui est préféré à O2. Les comparaisons sont ensuite effectuées par paires,

---

1. Analytic Hierarchy Process





Par ailleurs, pour tester la consistance de la matrice, un ratio de consistance a été développé. Ce ratio CR est donnée par :

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

CI est l'indice de consistance, il est égal à :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$$

où  $\lambda_{max}$  est la plus grande valeur propre de la matrice de comparaison par paires. n est l'ordre de la matrice.

RI est un indice de consistance moyen qui dépend de l'ordre de l'ordre de la matrice de comparaison par paires. Saaty a calculé les valeurs suivantes pour cet indice RI :

n	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0,52	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

Si  $8 < n < 16$ , RI est environ égal à 1,45

Saaty suggère que le ratio de consistance CR ne doit pas être supérieur à 10 %, sinon la matrice de comparaison par paires doit être révisée.

Dans notre cas, on calcule les valeurs et vecteurs propres de la matrice de comparaison par paires :

La plus grande valeur propre est

$$\lambda_{max} = 3,06$$

On obtient donc un indice de consistance

$$CI = 0,03$$

Et un ratio de consistance

$$CR = 5 \%$$

La matrice peut donc être considérée comme consistante. Le vecteur propre correspondant à  $\lambda_{max}$  propre est :

$$\begin{pmatrix} 0,91 \\ 0,39 \\ 0,1 \end{pmatrix}$$

Ce vecteur propre forme les poids des différents objectifs. Il peut être normalisé pour que la somme des poids soit unitaire, on obtient ainsi les poids suivants :

Poids objectif O3	0,65
Poids objectif O1	0,28
Poids objectif O2	0,07



*Exemples de cartes de restriction*

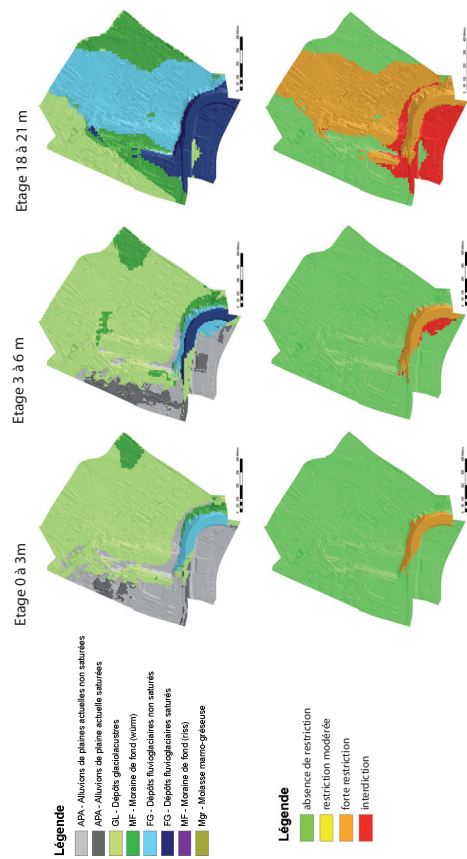


FIGURE H.1.: Cartes des géotypes et cartes de restrictions pour les ouvrages ponctuels étanches pour trois étages de profondeur différents, quartier de Champel

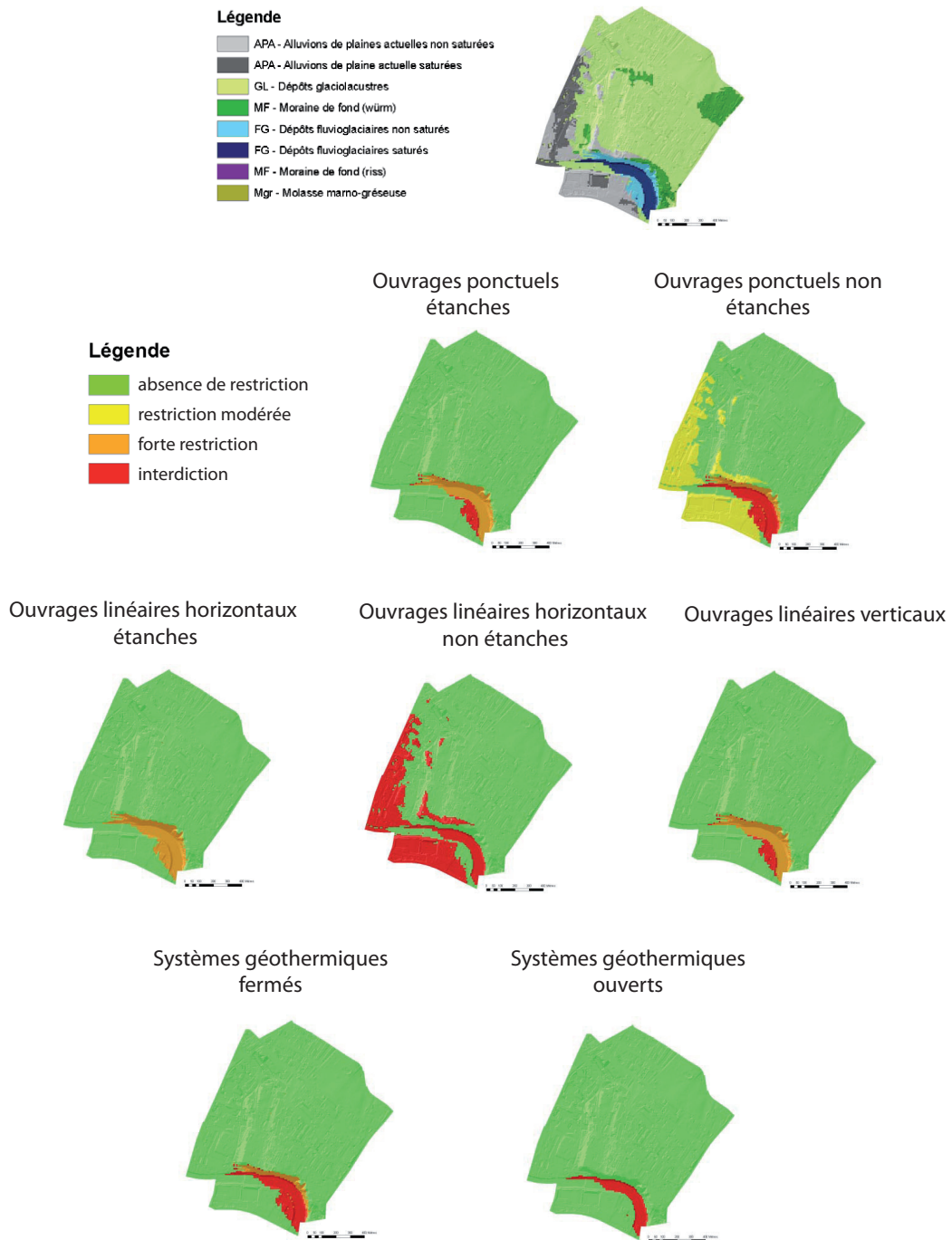


FIGURE H.2.: Cartes des géotypes et cartes de restrictions pour l'ensemble des usages pour l'étage de profondeur de 0 à 3 m, quartier de Champel

## *Exemple d'évaluation multicritère : illustration avec la méthode AHP-OWA*

Le processus d'aide à la décision multicritère est illustré ici à l'aide d'une méthode par agrégation de type critère unique de synthèse : la méthode AHP-OWA sous la forme proposée par Boroushaki et Malczewski (2008). Elle combine deux méthodes d'agrégation multicritères : Analytic Hierarchy Process (Saaty, 1980) et Order Weighted Average (Yager, 1988).

La méthode AHP est fondée sur une structuration hiérarchique des étapes de décision suivant plusieurs niveaux, par exemple : but, objectif, critères, attributs. Des échelles de pondération sont développées en utilisant la méthode des comparaisons par paires (annexe G) à tous les niveaux hiérarchiques de l'analyse.

La méthode OWA est une méthode de surpondération dépendant de la performance des alternatives dans les différents critères. Avant d'appliquer OWA, les résultats pondérés d'une alternative sont classés pour chaque critère et OWA permet d'appliquer une surpondération en fonction de ce classement. Les poids appliqués à l'aide d'OWA forment un vecteur des poids d'ordre. Les valeurs de ce vecteur sont fixées par le décideur et traduisent son attitude vis-à-vis du risque ainsi que le degré de compensation qu'il accepte entre les critères. Boroushaki et Malczewski (2008) ont implémenté OWA comme extension de AHP en utilisant des paramètres linguistiques (par exemple : *au moins un, quelques, la moitié, la plupart, tous*) pour déterminer le vecteur des poids d'ordre.

Cette démarche est illustrée ci-dessous pour évaluer l'adéquation du territoire (dans le quartier de Champel) à recevoir des ouvrages ponctuels étanches sur un étage du modèle spatial.

Une structure de décision définie par un but (exploiter de manière appropriée la ressource espace), trois objectifs (optimiser les conditions de construction, maximiser les synergies avec les ressources géothermie et géomatériaux et éviter les conflits d'usage) et quatre indicateurs (potentiel pour la construction d'ouvrages souterrains, potentiel de valorisation des géomatériaux, conductivité thermique du sous-sol et carte de restriction espace-eau souterraine) est développée (figure I.1). Les pondérations des différents critères sont réalisées par la méthode des comparaisons par paires, de même que la transformation des indicateurs ordinaux en indicateurs cardinaux. Les matrices sont présentées aux figures I.2, I.3 et I.4.

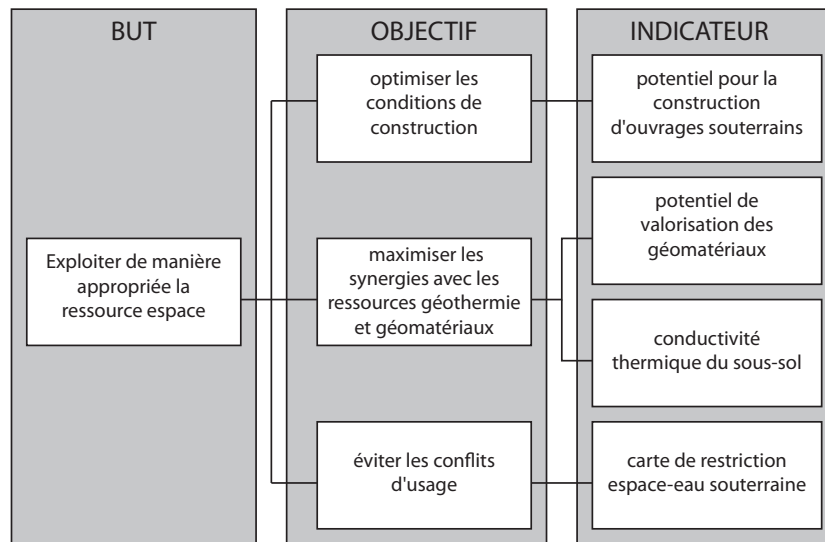


FIGURE I.1.: Structure hiérarchique d'analyse pour l'implantation d'ouvrages souterrains ponctuels étanches

	AP	FG	MF wür m	MF riss	GL	MGR	
AP	1	2	5	6	8	9	Indicateur valorisation des géomatériaux  0.42 0.30 0.13 0.09 0.04 0.02
FG	1/2	1	4	5	7	9	
MF würm	1/5	1/4	1	2	5	7	
MF riss	1/6	1/5	1/2	1	4	6	
GL	1/8	1/7	1/5	1/4	1	4	
MGr	1/9	1/9	1/7	1/6	1/4	1	

CR = 8%

FIGURE I.2.: Matrice de comparaison par paires pour l'indicateur géomatériaux

L'échelle ordinale de préférence pour les géomatériaux est créée en tenant compte des différences des filières, mais aussi des traitements nécessaires pour entrer dans les filières.

	Absence de restriction	Restriction modérée	Forte restriction	Indicateur de restriction
Absence de restriction	1	4	9	0.71
Restriction modérée	1/4	1	5	0.23
Forte restriction	1/9	1/5	1	0.06

CR = 7%

FIGURE I.3.: Matrice de comparaison par paires pour l'indicateur de restriction  
Le niveau interdiction n'est pas implémenté, c'est un critère de veto : en situation d'interdiction, le potentiel est considéré comme nul.

	Conflits	Conditions de construction	Synergies	Pondération des objectifs
Conflits	1	3	7	0.65
Conditions de construction	1/3	1	5	0.28
Synergies	1/7	1/5	1	0.07

CR = 6%

FIGURE I.4.: Matrice de comparaison par paires pour les objectifs

À l'aide de l'opérateur OWA, trois analyses de décision sont réalisées et présentées (figure I.5) :

- Analyse 1 : aversion au risque, (paramètre OWA *tous*) : cette analyse surpondère fortement les critères qui ont la performance la plus faible. Il n'y a pas de compensation entre les critères.
- Analyse 2 : paramètre OWA *au moins un*, c'est le choix d'un décideur prêt à prendre des risques importants pour favoriser des situations très bonnes sur un seul critère et mauvaises dans d'autres. Il n'y a pas de compensation entre les critères
- Analyse 3 : compensation complète des critères (paramètre OWA *la moitié*), cette situation correspond à l'utilisation de la méthode AHP seule.

Les cartes de résultat de l'évaluation mettent en évidence des zones très bonnes (par exemple : taches rouges au nord-est et au centre de la figure, indiquées (a)) dans les trois analyses. Ce sont des sites d'implantations très adaptés pour l'ensemble des critères. Au contraire, certains sites voient leur performance changer de manière très importante (par exemple au centre de la figure : grande étendue bleue puis rouge puis jaune, indiquée (b)) suivant l'attitude du décideur vis-à-vis du risque et de la compensation des critères. Ce sont des zones pour lesquelles un arbitrage de l'utilisation des ressources du sous-sol est nécessaire : certains critères sont remplis de manière très performante, d'autres non.

Par ailleurs, on notera que le niveau de restriction interdiction pour les interactions entre les usages a été traduit comme un veto : les zones correspondantes ne sont pas incluses dans l'analyse multicritère.

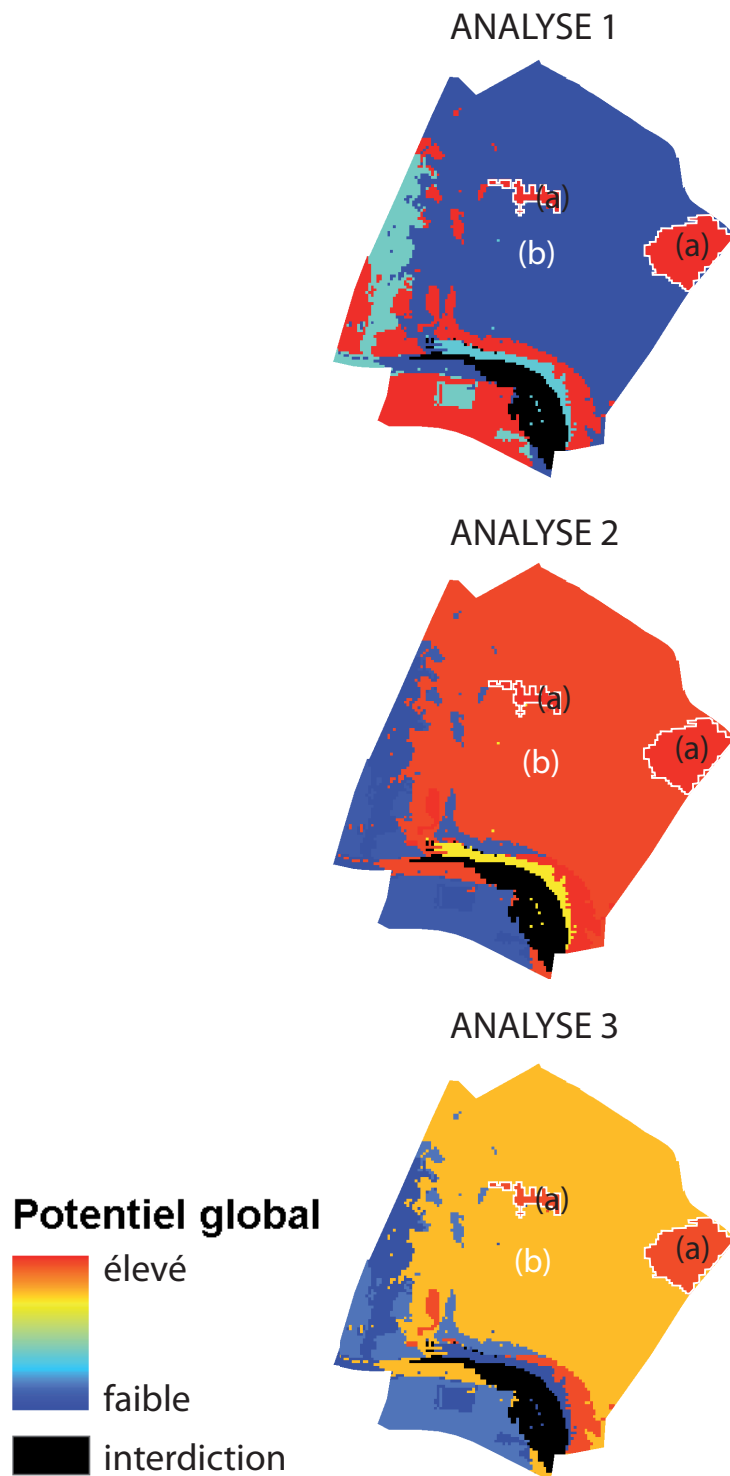


FIGURE I.5.: Évaluation multicritère du potentiel d'implantation d'ouvrages ponctuels étanches



## *Table des figures*

1.1. Modèles de métabolisme des écosystèmes . . . . .	2
1.2. Les ressources du sous-sol urbain . . . . .	4
2.1. Implantation de sites urbains et géologie . . . . .	10
2.2. Coupe géologique de la ville de Lausanne . . . . .	11
2.3. Coupe géologique peu profonde au droit de la ville de Genève . . . . .	12
2.4. Types de porosités des aquifères . . . . .	13
2.5. Coupe d'un système aquifère : principales définitions. . . . .	14
2.6. Les ressources du sous-sol urbain . . . . .	17
2.7. Utilisation de l'énergie géothermique . . . . .	22
3.1. Coupe géologique simplifiée du bassin de Mexico . . . . .	24
3.2. Coupe Géologique au droit de Paris . . . . .	27
3.3. Carte géotechnique d'Helsinki . . . . .	30
3.4. Coupe géologique de la région de Tokyo . . . . .	33
3.5. Principales phases de développement de la ville intérieure de Montréal . . . . .	37
3.6. PIB par habitant de la Suisse et des pays dans lesquels se trouvent les 5 villes étudiées . . . . .	39
3.7. Approche sectorielle des usages des ressources du sous-sol . . . . .	43
4.1. Matrice structurale . . . . .	49
4.2. Exemple de modèle causal . . . . .	50
4.3. Exemple de modèles de stocks et de flux . . . . .	51
4.4. Éléments spécifiques du cycle de l'eau en milieu urbain . . . . .	54
4.5. Exemple de concurrence hydrogéologique pendant la construction . . . . .	56
4.6. Exemple de concurrence hydrogéologique pendant l'exploitation . . . . .	57

4.7. Concurrence hydrogéologique cas du tunnel de Ormen à Stockholm . . . . .	58
4.8. Effet barrage de sous-sols d'immeubles . . . . .	60
4.9. Effet barrage d'un tunnel pénétrant dans une nappe . . . . .	60
4.10. Effet barrage cas de Hong Kong . . . . .	61
4.11. Court-circuit entre deux aquifères superposés lié à la construction d'un ouvrage .	63
4.12. Effet du percement des couches étanches par les ouvrages en profondeur . . . . .	67
4.13. Migration du coulis d'injection dans l'aquifère . . . . .	68
4.14. Mobilisation de polluants par lixiviation . . . . .	70
4.15. Mobilisation de polluants par drainance . . . . .	70
4.16. Captage d'eau potable dans le tunnel de Glyn . . . . .	71
4.17. Évolution des niveaux phréatiques et croissance urbaine . . . . .	72
4.18. Effet de la remontée des nappes sur les ouvrages construits dans la zone non saturée	74
4.19. Augmentation de la poussée d'Archimède sous un ouvrage. . . . .	75
4.20. Subsidence et soulèvement liés à la surexploitation puis au rebond de la nappe .	76
4.21. Bâtiment fondé sur pieux énergétiques . . . . .	78
4.22. Installation géothermique à la station Praterstern du métro U2 . . . . .	79
4.23. Principaux impacts de l'usage de la géothermie sur l'usage de l'espace . . . . .	80
4.24. Mode de valorisation possibles des géomatériaux . . . . .	81
4.25. Diminution du rendement des ouvrages géothermiques par abaissement de la nappe	83
4.26. Impacts de l'usage de la géothermie sur les eaux souterraines . . . . .	85
4.27. Représentation schématique du cas d'étude . . . . .	88
4.28. Modèle causal du système . . . . .	89
4.29. Modèle de stocks et flux du système . . . . .	90
4.30. Résultats de simulation . . . . .	91
5.1. Principaux outils d'aménagement du territoire et échelle de réalisation . . . . .	97
5.2. Principales étapes d'un projet d'ingénierie territorial . . . . .	99
5.3. Instruments d'organisation du territoire relatifs aux eaux souterraines . . . . .	100
5.4. Insertion d'ouvrages dans un profil géologique contenant une nappe protégée . .	103
5.5. Diagnostic et évaluation des potentialités pour le développement des ressources du sous-sol . . . . .	105
6.1. Extension de la zone d'étude . . . . .	108
6.2. Les géotypes parmi les différentes échelles de caractérisation du milieu géologique	111
6.3. Genève : échelle des géotypes et des formations géologiques . . . . .	112
6.4. Genève : modèle 3D des géotypes . . . . .	113

6.5. Nappes principales du canton de Genève . . . . .	115
6.6. Différence du niveau de la nappe entre les situations de hautes eaux et de basses eaux . . . . .	116
6.7. Genève : modèle 3D intégrant l'hydrogéologie . . . . .	116
6.8. Genève : différence entre les bâtiments hors-sol et les bâtiments sous-sol . . . . .	118
6.9. Genève : illustration de l'usage du sous-sol au droit de la traversée de l'Arve par le CEVA . . . . .	119
6.10. Modèles de données des SIG . . . . .	122
6.11. Cycle de vie de l'information spatiale . . . . .	123
6.12. Conception du modèle d'information dans le SIG par étages . . . . .	125
6.13. SIG de données par étage . . . . .	126
6.14. Présentation de deux étages de données . . . . .	127
7.1. Granulométrie et mode de valorisation des géomatériaux . . . . .	136
7.2. Puissance théorique d'une PAC en fonction du débit du doublet géothermique . . . . .	140
7.3. Calcul de la conductivité thermique équivalente . . . . .	141
7.4. Conductivités thermiques équivalentes . . . . .	143
7.5. Coupe à travers la <i>zone urbaine</i> . . . . .	144
7.6. Profil géologique selon l'axe AA' (figure 7.5) . . . . .	144
7.7. Mesures piézométrique de longue durée . . . . .	146
7.8. Simulation de scénarios naturels et anthropiques . . . . .	146
7.9. Exemple de carte de restriction : sondes géothermiques . . . . .	151
7.10. Coupe géologique du PAV dans l'axe Nord Sud . . . . .	155
B.1. Construction en fouille talutée . . . . .	184
B.2. Fouille à parois épinglées . . . . .	185
B.3. Fouille à parois berlinoises . . . . .	186
B.4. Rideau de palplanches avec des profilés métalliques de type Larssen . . . . .	186
B.5. Mise en place d'un rideau de palplanches par vibrofonçage de manière alternée . . . . .	187
B.6. Réalisation de parois moulées . . . . .	188
B.7. Rideaux de pieux jointifs et sécants . . . . .	189
B.8. Construction en taupe . . . . .	190
B.9. Construction en caisson . . . . .	191
B.10. Fouille en terrain aquifère réalisée par rabattement de la nappe. La fouille est réalisée avec une enceinte non étanche de parois berlinoises . . . . .	192
B.11. Technique de fouille en terrain saturé sans rabattement de la nappe. Exemple avec réalisation d'un radier bétonné immergé . . . . .	193

B.12. Tunnel construit en nappe de manière drainante ou étanche . . . . .	195
B.13. Reprise des charges dans les pieux . . . . .	197
B.14. Pieux battus . . . . .	198
B.15. Pieux forés . . . . .	199
B.16. Injection des terrains . . . . .	200
B.17. Jet grouting . . . . .	201
B.18. Exemple de soutènement temporaire par congélation d'une voûte de tunnel . . . . .	201
C.1. Protection des eaux et ouvrages ponctuels . . . . .	212
C.2. Protection des eaux et ouvrages linéaires horizontaux . . . . .	213
C.3. Protection des eaux et ouvrages linéaires verticaux . . . . .	214
C.4. Protection des eaux et sondes géothermiques . . . . .	215
C.5. Protection des eaux et doublets géothermiques . . . . .	216
E.1. Classification des sols genevois et profil type de la cuvette genevoise . . . . .	228
E.2. Carte géologique et géotechnique, Genève . . . . .	230
E.3. Carte des géotypes, Genève . . . . .	230
E.4. Répartition des surfaces par géotype sur la carte des géotypes . . . . .	231
E.5. Représentation simplifiée de la géologie genevoise . . . . .	233
H.1. Cartes des géotypes et cartes de restrictions pour les ouvrages ponctuels étanches pour trois étages de profondeur différents, quartier de Champel . . . . .	249
H.2. Cartes des géotypes et cartes de restrictions pour l'ensemble des usages pour l'étage de profondeur de 0 à 3 m, quartier de Champel . . . . .	250
I.1. Structure hiérarchique d'analyse pour l'implantation d'ouvrages souterrains ponctuels étanches . . . . .	252
I.2. Matrice de comparaison par paires pour l'indicateur géomatériaux . . . . .	252
I.3. Matrice de comparaison par paires pour l'indicateur de restriction . . . . .	253
I.4. Matrice de comparaison par paires pour les objectifs . . . . .	253
I.5. Évaluation multicritère du potentiel d'implantation d'ouvrages ponctuels étanches . . . . .	254

## *Liste des tableaux*

2.1. Typologie hydrogéologique . . . . .	15
2.2. Typologie des usages de la ressource espace . . . . .	18
4.1. Comparaison entre l'approche sectorielle et l'approche des usages multiples . . . . .	46
4.2. Comparaison entre les axiomes analystes et systémistes . . . . .	47
4.3. Systématique pour l'évaluation des interactions entre les ressources . . . . .	53
4.4. Concurrence hydrogéologique, conditions de conflit . . . . .	59
4.5. Effet-barrage, conditions de conflit . . . . .	62
4.6. Court-circuit entre aquifères superposés, impact quantitatif . . . . .	64
4.7. Court-circuit entre aquifères superposés, impact qualitatif . . . . .	65
4.8. Infiltration d'eau de ruissellement, conditions de conflit . . . . .	66
4.9. Pollution par les matériaux d'injection, conditions de conflit . . . . .	69
4.10. Synthèse des interactions entre les usages du sous-sol urbain . . . . .	93
7.1. Synthèse des principaux paramètres géotechniques des terrains meubles . . . . .	131
7.2. Indicateur de potentiel pour la construction d'ouvrages souterrains . . . . .	133
7.3. Types de valorisation des matériaux d'excavation . . . . .	134
7.4. Filières de valorisation des différents géotypes de la géologie genevoise . . . . .	137
7.5. Conductivité thermique des différents géotypes . . . . .	142
7.6. Niveaux de restriction proposés . . . . .	147
7.7. Conflits espace-eau souterraine : conditions de compatibilité . . . . .	149
7.8. Conflits géothermie-eau souterraine : conditions de compatibilité . . . . .	150
E.1. Conversion géotypes - descripteurs géologiques . . . . .	229
G.1. Échelle de comparaison par paires . . . . .	246



# pascal blunier

né en 1981  
nationalité suisse et française  
célibataire  
✉ pascal.blunier@gmail.com

## Formation

- 2005–2009 **École doctorale en environnement**, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*.  
Thèse de doctorat: *Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain*
- 1999–2004 **Sciences et ingénierie de l'environnement**, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, *Diplôme d'ingénieur en environnement*.  
Travail pratique de diplôme: *La collecte et le transport mécanisés des boues de vidange dans la ville de Ouahigouya*
- 2001–2002 **Sciences et ingénierie de l'environnement**, *Indian Institute of Technology*, Chennai, Inde, année d'échange.
- 1999 **Baccalauréat scientifique**, *Lycée international de Ferney-Voltaire*.

## Expérience professionnelle

- Depuis 2005 **Assistant-doctorant**, *laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'EPFL*.  
Développement d'une méthodologie pour la gestion concertée des ressources en eau, espace, géomatériaux et énergie dans le cadre des processus d'aménagement urbain. Projet de recherche Deep City dans le cadre du Programme National de Recherche 54
- 2004–2005 **Collaborateur scientifique**, *laboratoire de chimie environnementale et d'écotoxicologie de l'EPFL*.  
Projet RUIZI : Impact pollutif global des eaux de ruissellement de certaines zones industrielles de Genève sur leur milieu récepteur et conséquences sur les modes de dépollution. Mandat scientifique pour l'état de Genève

## Langues

- Français langue maternelle  
Anglais parlé, lu et écrit : très bonnes connaissances  
Allemand parlé et lu : bonnes connaissances  
Espagnol débutant

## Informatique

- |             |                              |                   |                               |
|-------------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|
| OS          | Mac OSX, Windows, Linux      | SIG et DAO        | ArcGIS, MapInfo, MicroStation |
| Bureautique | LaTeX, OpenOffice, MS office | Logiciels métiers | FeFlow, Vensim, LabView       |
| Graphisme   | Adobe Creative Suite         |                   |                               |

---

## Publications

- Blunier P, Tacher L, Parriaux A (2007), Systemic Approach of Urban Underground Resources Exploitation. 11<sup>th</sup> ACUUS Conference, *Underground Space: Expanding the Frontier*, Athens
- Parriaux A, Blunier P, Maire P, Tacher L (2007), A Global Concept for a Sustainable Urban Underground Management. 11<sup>th</sup> ACUUS Conference, *Underground Space: Expanding the Frontier*, Athens
- Blunier P, Maire P, Parriaux A, Tacher L (2006), Deep City: ressources du sous-sol urbain. *Tracés* 132(5) : 6-9
- Parriaux A, Tacher L, Kaufmann V, Blunier P (2006), Underground resources and sustainable development in urban areas. IAEG Conference, *Engineering geology for tomorrow's cities*, Nottingham
- Blunier P, Koanda H, Koné D, Strauss M, Klutsé A, Tarradellas J (2004), Quantification des boues de vidange. Exemple de la ville de Ouahigouya, Burkina Faso. Premier forum de recherche du réseau CREPA, Ouagadougou

---

## Conférences et présentations

- Blunier P, Bréthaut D, Parriaux A (2009), Underground resources and sustainable urban development: the example of shallow geothermal potential mapping. AGS annual meeting *The challenge of sustainability*, Zürich
- Blunier P, Parriaux A (2008), Deep City: toward combined uses of the urban underground resources. EGU General Assembly, Vienne
- Blunier P, Parriaux A (2007), Projet Deep City : Le dessous de la ville pour quoi faire? Séminaire EPFL SIA *La ville sous la ville : une idée à creuser*, Lausanne
- Blunier P, Maire P (2006), Les ressources du sous-sol urbain: le cas de Mexico City. Conférence de l'association urbanistes sans frontières *Urbanitaire: les enjeux de la ville*, Lausanne