

Aurèle Parriaux, Pascal Blunier, Pierrick Maire, Guillaume Dekkil, Laurent Tacher

Rapport de recherche PNR 54

Projet Deep City

Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains



Rapport de recherche PNR 54

Projet Deep City

Ressources du sous-sol
et développement durable
des espaces urbains

Aurèle Parriaux, Pascal Blunier, Pierrick Maire, Guillaume Dekkil, Laurent Tacher



vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Remerciements

Nous remercions le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique pour le soutien et la confiance apportés à ce projet mené dans le cadre du programme national de recherche 54 : Développement durable de l'environnement construit.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui par leurs apports et leurs critiques ont permis de nourrir la réflexion menée dans le cadre de ce travail. Merci en particulier aux membres du comité international de suivi du projet : Marcel Arnould, Michel Boisvert, Michel Agassiz et Michel Meyer. Merci également à l'État de Genève, aux SITG, à la fondation des parkings de Genève, à E4Tech et à IEC SA pour la mise à disposition de leurs données, de leurs outils d'analyse et de leurs compétences.

Publié avec l'appui du Fonds national suisse de la recherche scientifique.

Impressum

Travaux de recherche et rédaction:

Parriaux Aurèle (direction du projet), Blunier Pascal (doctorant), Maire Pierrick (doctorant), Dekkil Guillaume (collaborateur scientifique), Tacher Laurent (collaborateur scientifique)

Avec l'appui de:

Kaufmann Vincent (LASUR : Laboratoire de sociologie urbaine, EPFL), Schuler Martin (CEAT : Communauté d'étude pour l'aménagement du territoire, EPFL), Thalmann Philippe (REME : Laboratoire de recherches en économie et management de l'environnement, EPFL)

Groupe d'accompagnement du projet:

Golay François (LASIG : Laboratoire de systèmes d'information géographique, EPFL), Labiouse Vincent (LMR : Laboratoire de mécanique des roches, EPFL), Risch Claude (Emch + Berger SA), Roulet Claude-Alain (LESO : Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, EPFL), Scartezzini Jean-Louis (LESO : Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment, EPFL), von Meiss Pierre (Professeur honoraire, EPFL)

Référence recommandée:

Parriaux Aurèle, Blunier Pascal, Maire Pierrick, Dekkil Guillaume, Tacher Laurent. 2010. Projet Deep City. Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains. Lausanne, 100p.

Informations bibliographiques de la Bibliothèque nationale allemande:

La Bibliothèque nationale allemande enregistre cette publication dans la Bibliographie nationale. Données bibliographiques détaillées disponibles sur <http://dnb.d-nb.de>

ISBN 978-3-7281-3332-8

DOI 10.3218/3332-8

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Chapitre 1 Introduction	1
1.1 Constat et enjeux	1
1.2 De l'analyse du constat au concept DEEP CITY	2
1.3 Contexte et méthodologie de recherche	3
1.3.1 Analyse des expériences du passé	4
1.3.2 Évaluation de l'acceptabilité de l'usage du sous-sol urbain	4
1.3.3 Principe des usages multiples du sous-sol urbain	5
1.3.4 Démarche liée à l'aménagement du territoire	5
Chapitre 2 Usages des ressources du sous-sol urbain	7
2.1 Usages de l'espace	7
2.2 Usages des géomatériaux	9
2.3 Usages de l'eau souterraine	10
2.4 Usages de la géothermie	11
2.5 Synthèse du chapitre	13
Chapitre 3 Expériences et Usages passés du sous-sol urbain	15
3.1 Cinq itinéraires de développement des ressources du sous-sol urbain	15
3.1.1 Mexico	15
3.1.2 Paris	15
3.1.3 Helsinki	16
3.1.4 Tokyo	16
3.1.5 Montréal	17
3.1.6 L'approche sectorielle : une caractéristique des développements souterrains	17
3.2 Les leçons du passé : leviers de développement du souterrain	18
3.2.1 Démographie et exploitation du sous-sol	19
3.2.2 Des conditions géologiques favorables	20
3.2.3 Des contextes de développement urbain dynamiques	20
3.2.4 Facteurs climatiques	21
3.2.5 Aspects juridiques	21
3.3 L'urbanisme souterrain : état de l'art	23
3.4 Synthèse du chapitre	26
Chapitre 4 Usages multiples du sous-sol urbain	27
4.1 Un cadre de réflexion systémique	28
4.2 Interactions entre les usages des ressources du sous-sol urbain	29
4.2.1 Spécificités du cycle de l'eau en milieu urbain	30
4.2.2 Interactions espace-eau souterraine	33
4.2.3 Interactions espace-géothermie	35
4.2.4 Interactions espace-géomatériaux	35

4.2.5	Interactions eau souterraine-géothermie	36
4.2.6	Interactions eau souterraine-géomatériaux	37
4.2.7	Interactions entre les usages de l'espace	37
4.2.8	Interactions entre les usages de l'eau souterraine	37
4.2.9	Interactions entre les usages de la géothermie	37
4.3	Synthèse du chapitre	38

Chapitre 5 Acceptabilité des usages du sous-sol urbain 41

5.1	Perceptions, usages et formes de l'espace souterrain	41
5.1.1	La perception des ouvrages de passage : résultats de l'enquête menée auprès des abonnés de la fondation des parkings à Genève	41
5.1.2	La perception des ouvrages de destination : résultats de l'enquête menée auprès d'étudiants fréquentant des auditoriums souterrains	42
5.1.3	La phobie du souterrain : résultats de l'enquête menée auprès d'étudiants fréquentant des auditoriums souterrains	43
5.1.4	Éléments de synthèse sur la perception du souterrain	44
5.2	Spécificités économiques et énergétiques de l'espace souterrain	45
5.2.1	Étude de cas	45
5.2.2	Coûts de construction	46
5.2.3	Consommation énergétique et analyse de cycle de vie	47
5.2.4	Bilan des coûts sur le cycle de vie de l'ouvrage	49
5.3	Synthèse du chapitre	50

Chapitre 6 Cadre légal : propriété et mesures de préservation des ressources du sous-sol 51

6.1	Propriété des ressources du sous-sol urbain	51
6.1.1	Propriété de l'espace souterrain	51
6.1.2	Propriété des géomatériaux	53
6.1.3	Propriété de l'eau souterraine	53
6.1.4	Propriété de la géothermie	54
6.1.5	Commentaires sur le régime de propriété	54
6.2	Prise en compte des interactions entre les usages des ressources du sous-sol	55
6.2.1	Synthèse du cadre législatif	55
6.2.2	Commentaires sur les interactions dans le droit suisse	56
6.3	Synthèse du chapitre	58

Chapitre 7 Démarche pour l'aménagement concerté des ressources du sous-sol urbain 59

7.1	Planification, aménagement du territoire souterrain	59
7.1.1	Planification du sous-sol dans les expériences étrangères et passées	59
7.1.2	Stratégies et outils d'aménagement du territoire en Suisse	63
7.2	Démarche conceptuelle pour la gestion des ressources du sous-sol urbain	67
7.3	Intégrer et valoriser la connaissance du sous-sol	68
7.3.1	Géologie	68
7.3.2	Hydrogéologie	71
7.3.3	Milieu bâti	72
7.3.4	Contexte de surface et contraintes	73
7.3.5	Gestion de l'information : vers un SIG pour le sous-sol	73

7.4	Évaluer le potentiel d'un sous-sol urbain	76
7.4.1	Potentiel brut d'usage des ressources	76
7.4.2	Usages multiples des ressources du sous-sol urbain : conflits et synergies	83
7.4.3	Aide à la décision pour la planification des usages des ressources du sous-sol	88
7.5	Synthèse du chapitre	88
Chapitre 8 Conclusions		91
8.1	Synthèse générale	91
8.2	Trois messages clés	92
8.3	Recommandations	93
Bibliographie		95

Table des figures

Figure 1 - Les ressources du sous-sol urbain.....	2
Figure 2 - Les ressources du sous-sol urbain.....	7
Figure 3 - Utilisation de l'énergie géothermique (source : CREGE, centre de recherche en géothermie Neuchâtel)	11
Figure 4 - Approche sectorielle des usages des ressources du sous-sol	18
Figure 5 - La rue à étages multiples, concept développé par l'architecte Hénard au début du 20 ^e siècle (source : Barles, 1995)	23
Figure 6 - centre commercial souterrain sous le parc de Sapporo (source : Golany and Ojima, 1996).....	25
Figure 7 - Éléments spécifiques du cycle de l'eau en milieu urbain	30
Figure 8 - Évolution des niveaux phréatiques et croissance urbaine. Phénomène de rebond phréatique (adapté de : Morris et al., 1997).....	32
Figure 9 - Impacts de l'usage de la géothermie sur les eaux souterraines (figure : David Bréthaut, GEOLEP).....	36
Figure 10 - Synthèse des interactions entre les usages du sous-sol urbain	39
Figure 11 - Perception de la pertinence à réaliser différents ouvrages en souterrain	42
Figure 12 - Perception de l'espace souterrain	43
Figure 13 - Bilan énergétique des trois variantes sur l'ensemble du cycle de vie.....	49
Figure 14 - Division de la propriété du sous-sol (adapté de : Knapp, 1987)	52
Figure 15 - Insertion d'ouvrages dans un profil géologique contenant une nappe protégée....	57
Figure 16 - Principaux outils d'aménagement du territoire et échelle de réalisation.....	64
Figure 17 - Diagnostic et évaluation des potentialités pour le développement des ressources du sous-sol : « Des ressources aux besoins ».....	67
Figure 18 - Les géotypes parmi les différentes échelles de caractérisation du milieu géologique (Parriaux and Turberg, 2007)	70
Figure 19 - Exemple de modèle de géotype 3D pour la ville de Genève	70
Figure 20 - Modèle 3D intégrant l'hydrogéologie en situation de hautes eaux (Genève)	72
Figure 21 - Cycle de vie de l'information spatiale (Pointet, 2007, adapté de Worboys and Duckham, 2004)	74
Figure 22 - Présentation de deux étages de données (Genève)	75
Figure 23 - Mode de valorisation possible des géomatériaux	78
Figure 24 - Granulométrie et mode de valorisation des géomatériaux.....	80
Figure 25 - Exemple de cartes de conductivité thermique équivalente	83
Figure 26 - Profil géologique traversant la ville de Genève	84
Figure 27 - Exemple de carte de restriction : sondes géothermiques	87

Liste des tableaux

Tableau 1 - Typologie des usages de la ressource espace	9
Tableau 2 - Comparaison entre l'approche sectorielle et l'approche des usages multiples	27
Tableau 3 - Systématique pour l'évaluation des interactions entre les ressources	30
Tableau 4 - Bâtiment commercial : trois variantes	46
Tableau 5 - Analyse des coûts de construction par macroéléments (estimations IEC SA, en CHF)	47
Tableau 6 - Consommation énergétique des trois variantes de bâtiment ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{an}$)	48
Tableau 7 - Bilan des coûts des trois variantes sur le cycle de vie des bâtiments	49
Tableau 8 - Typologie hydrogéologique	81
Tableau 9 - Niveaux de restriction proposés et correspondance avec les recommandations de l'OFEV	85
Tableau 10 - Conflits géothermie-eau souterraine : conditions de compatibilité	86



Open Access im vdf



Weitere thematisch passende Publikationen



Nationales Forschungsprogramm (NFP) 54 „Nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung“



Nationales Forschungsprogramm (NFP) 31 „Klimaänderungen und Naturkatastrophen“



Nationales Forschungsprogramm (NFP) 48 „Landschaften und Lebensräume der Alpen“



**Projekt BaBeL: Quartierentwicklung im
Luzerner Untergrund**

Einsichten – Ergebnisse – Erkenntnisse



**Land Development Strategies: Patterns,
Risks, and Responsibilities**

*Strategien der Raumentwicklung:
Strukturen, Risiken und Verantwortung*



www.vdf.ethz.ch
verlag@vdf.ethz.ch

vdf

1.1 Constat et enjeux

La ville est aujourd'hui le lieu de vie de plus de la moitié de la population mondiale (UN Habitat, 2008) et est toujours plus attractive. La Suisse est fortement engagée dans ce « virage urbain ». Au cours des cinquante dernières années, la population urbaine est passée de 45 % de la population totale à plus de 70 % aujourd'hui, tandis que la superficie totale urbaine a plus que quadruplé pendant la même période (Kuster et Meier, 2003). Cette Suisse urbaine a même été interprétée par certaines voix comme un territoire formant une seule métropole (Association Métropole Suisse, 2002). Les dynamiques territoriales de la ville ne sont toutefois pas homogènes. Au cours des dernières décennies, un fort développement de l'espace périurbain a eu lieu en Suisse. Le territoire suisse est ainsi marqué par deux dynamiques principales : croissance et étalement de l'espace urbain. Ces dynamiques sont également largement observées ailleurs dans le monde (Kasanko et al., 2006, UN Habitat, 2008).

Ce mode de développement n'est pas sans conséquence pour l'environnement, l'économie et la société. Un tissu urbain peu dense implique par exemple d'importants besoins de mobilité. Cette mobilité génère une forte consommation énergétique et de nombreuses nuisances (pollution atmosphérique, bruit, ...), ainsi que des coûts (en argent, mais aussi en temps). Par ailleurs, les infrastructures nécessaires à la satisfaire (route, rail, parkings, etc.) contribuent à augmenter la consommation d'espace. D'autre part, les villes produisent et utilisent peu de ressources locales. De nombreuses études portant sur le métabolisme¹ des villes montrent la forte pression qu'elles portent sur leur environnement dont elles importent les ressources et vers lequel elles exportent leurs déchets (Botkin et Beveridge, 1997, Decker et al., 2000, Moffatt et Kohler, 2008, Newman, 1999).

Face aux contraintes contemporaines², le paradigme des ressources illimitées, qui a été central dans le développement des sociétés industrielles et post-industrielles (Jelinski et al., 1992), apparaît caduc. Aussi il est urgent d'adopter de nouvelles formes de développement de l'espace urbain. C'est l'objectif de la « ville durable », consacré notamment par la conférence Habitat 2 à Istanbul en 1996. Le manifeste d'Istanbul fixe entre autres priorités, le besoin de « respecter la capacité limite des écosystèmes et préserver les chances des générations futures » (UN Centre for Human Settlements, 1996). Pour réaliser cet objectif, il convient de réduire la consommation de ressources et la production de déchets et de favoriser la consommation de ressources endogènes ainsi que le recyclage et la réutilisation des ressources dans le système urbain. Pour y parvenir, les conditions d'occupation de l'espace doivent être changées. Un consensus de plus en plus fort se dresse pour favoriser un développement vers l'intérieur du tissu

¹ Par analogie entre le système urbain et les systèmes écologiques, on parle de métabolisme urbain pour décrire les flux et la façon dont sont consommées les ressources en énergie, eau, matière (et espace suivant les auteurs).

² En particulier la raréfaction des ressources en énergie, eau et matières premières et les limites de l'environnement à absorber les coproduits des activités humaines : polluants ou gaz à effet de serre par exemple.

urbain par la *densification*, la création de *villes compactes*, *multipolaires* ou encore de *réseaux de villes* (Breheny, 1997, Burton et al., 1996, Gordon et Richardson, 1997).

1.2 De l'analyse du constat au concept DEEP CITY

Le sous-sol urbain est riche en ressources en espace, géomatériaux, eau souterraine et énergie géothermique (figure 1). Ces ressources participent au métabolisme de la ville et offrent des opportunités pour réduire la dépendance de la ville vis-à-vis de son environnement. Par ailleurs, l'espace souterrain est un degré de liberté pour le développement de la ville. Son utilisation peut être déterminante pour la densification qualifiée des espaces urbains.

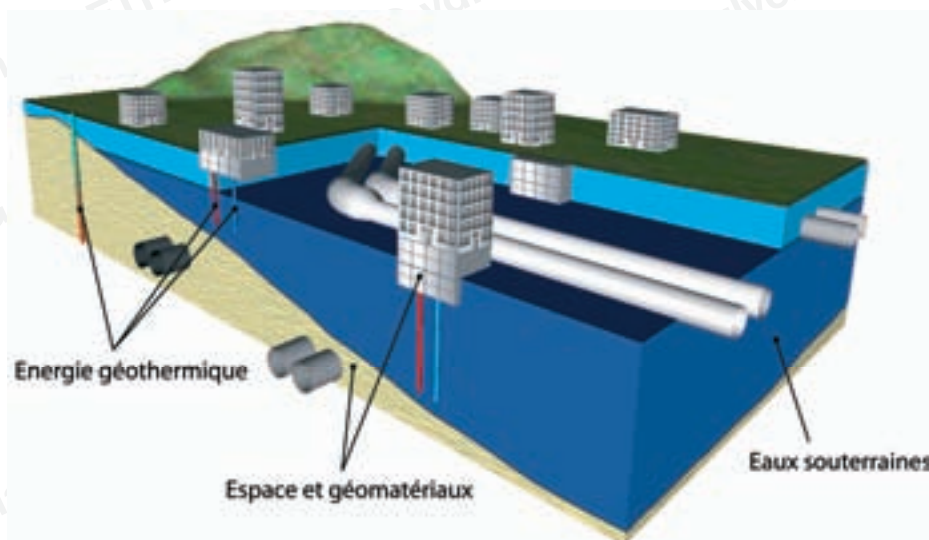


Figure 1 - Les ressources du sous-sol urbain

Ainsi, le sous-sol des villes peut contribuer à répondre aux enjeux urbains contemporains. Force est de constater, cependant, qu'il est peu pris en considération dans les stratégies et politiques de développement territorial. Méconnues ou mésestimées, les ressources du sous-sol sont trop peu ou trop mal exploitées. En effet, si le sous-sol urbain est riche en ressources, il est aussi vulnérable. Une exploitation non coordonnée de ces ressources aboutit souvent à des conflits : l'utilisation d'un volume géologique donné pour un besoin portant préjudice à l'exploitation d'autres ressources. Par exemple, un tunnel construit dans un aquifère peut polluer la nappe souterraine et empêcher son usage futur comme eau de boisson.

Ainsi, il est nécessaire de mettre en œuvre une utilisation plus intense, mais surtout mieux coordonnée des ressources du sous-sol urbain au service du développement durable de la ville. Ceci nous amène à formuler le postulat suivant pour notre recherche :

*Les ressources du sous-sol urbain sont nécessaires au développement de la ville. Une utilisation coordonnée de ces ressources, qui tient 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** ».*

Par ailleurs, en accord avec le concept de développement durable, la conservation et la mise en valeur du patrimoine environnemental ne doivent pas se faire au détriment de la justice sociale ou de l'efficacité économique. Aussi, il est primordial de mettre en évidence quels sont les enjeux socio-économiques, mais aussi les leviers et les freins juridiques, administratifs et politiques à un usage plus intense et plus efficient des ressources du sous-sol pour le développement de la ville. En d'autres termes, il s'agit de déterminer quelle est l'**acceptabilité** d'un tel développement.

Ainsi, les objectifs du projet *Gestion durable des ressources du sous-sol urbain, Deep City* (plus loin projet Deep City) sont multiples et complémentaires :

- Analyser les succès et les échecs des villes ayant réalisé un développement important des ressources de leur sous-sol ;
- Évaluer dans le contexte suisse, les freins et moteurs du développement des ressources du sous-sol en tenant compte de facteurs sociologiques, économiques, légaux, politiques et urbanistiques ;
- Développer une compréhension des interactions entre les ressources du sous-sol urbain dans une perspective systémique (comprendre le système sous-sol et non les ressources de manière indépendante) ;
- Développer une démarche pour intégrer les potentialités et les enjeux de valorisation des ressources du sous-sol à l'aménagement du territoire.

1.3 Contexte et méthodologie de recherche

Le projet de recherche Deep City a été mené dans le cadre du Programme National de Recherche 54 (PNR 54) : *développement durable de l'environnement construit*. Ce programme vise à élaborer « des bases scientifiques qui contribueront à un développement plus durable de l'environnement construit en Suisse »³. Dans ce cadre, le projet Deep City est focalisé sur le rôle des ressources du sous-sol pour assurer un tel développement.

Deux recherches doctorales ont été menées dans le cadre du projet Deep City, l'une portant sur la méthodologie de mise en œuvre de *l'approche par les usages multiples* (Blunier, 2009). L'autre portant sur l'axe de recherche acceptabilité (Maire, 2010 (à paraître)). En complément à ces deux recherches doctorales, d'autres thématiques ont été abordées, notamment les questions d'urbanisme et d'aménagement du territoire ont fait l'objet d'un axe de recherche spécifique. Cet aspect a été piloté par les partenaires de la CEAT (Communauté d'Études pour l'Aménagement du Territoire). Le présent

³ Site internet du programme : <http://www.pnr54.ch/>

rapport présente de manière transversale et synthétique l'ensemble des résultats du projet.

Les objectifs du projet Deep City demandent d'adopter une méthodologie fortement interdisciplinaire. En effet, des champs aussi divers que ceux de la géologie, des sciences de l'ingénieur, de l'urbanisme, des sciences sociales, de l'économie ou de l'information géographique doivent être explorés. La thèse des usages multiples des ressources du sous-sol urbain développée dans le cadre du projet Deep City est nouvelle. Elle repose cependant sur les efforts menés de manière sectorielle (chaque ressource indépendamment) pour valoriser les ressources du sous-sol dans le passé. Aussi, ce projet recouvre une forte dimension de synthèse d'expériences, d'outils et de connaissances.

Quatre étapes principales sont à distinguer dans la recherche, elles sont présentées ci-dessous.

1.3.1 Analyse des expériences du passé

Cette analyse est transversale, elle couvre l'ensemble des problématiques posées par le projet. Cinq villes ont été sélectionnées : Mexico-City, Montréal, Paris, Helsinki et Tokyo en raison de l'importance qu'a revêtu l'usage des ressources du sous-sol urbain dans le développement de ces villes, des problématiques qui ont émergé de ce développement et des réactions mises en place vis-à-vis de ces problématiques.

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 des services techniques liés à la gestion et à la planification de l'usage de ces ressources. Pour chacune des villes, les éléments suivants ont été pris en compte :

- Description du contexte géologique et environnemental et du contexte démographique et socio-économique.
- Historique du développement de l'usage de chacune des ressources du sous-sol urbain.
- Analyse des enjeux et des défis liés à l'utilisation des ressources et des réponses qui ont été apportées.
- Synthèse des forces et faiblesses des expériences menées.

Les expériences des cinq villes ont ensuite été analysées de manière comparative, afin d'en comprendre les différences et les similitudes et d'analyser les points de comparaison possibles avec le contexte spécifique suisse.

1.3.2 Évaluation de l'acceptabilité de l'usage du sous-sol urbain

Cette évaluation est basée sur trois analyses :

L'analyse sociologique est composée de trois enquêtes, une enquête qualitative et deux enquêtes quantitatives. L'enquête qualitative sert à déterminer quels sont les mécanismes de la peur liée au souterrain. Des interviews ont été réalisées afin de comprendre cette peur et de déterminer les dispositifs mis en place par ces personnes afin de vivre avec cette peur. Les deux enquêtes qualitatives ont plusieurs objectifs : estimer la

proportion de personnes ayant peur du souterrain, évaluer les usages les plus adaptés de l'espace souterrain, comparer la perception de l'espace entre des personnes se trouvant en sous-sol, en surface ou en espace borgne de surface. Une enquête s'est déroulée auprès de personnes questionnées sur un lieu de « passage » (des parkings). L'autre enquête s'est déroulée auprès de personnes questionnées sur un lieu de « vie » (des auditoires).

L'analyse économique est une étude de cas. Un bâtiment commercial a été dessiné. Trois variantes de ce bâtiment ont été évaluées (variante 1 : bâtiment en surface ; variante 2 : bâtiment enterré en géologie complexe à la construction ; variante 3 : bâtiment enterré en géologie simple à la construction). Les coûts de construction de ces trois variantes ont été estimés et structurés suivant la méthode par éléments (CFE). Un écobilan de ces trois variantes a aussi été réalisé.

L'analyse juridique est une analyse essentiellement bibliographique. Elle est basée sur un recensement des lois, de la doctrine et de la jurisprudence.

1.3.3 Principe des usages multiples du sous-sol urbain

La compréhension des interactions entre les usages du sous-sol urbain est un élément décisif pour mettre en œuvre une approche holistique de gestion des ressources du sous-sol. L'ensemble des interactions, conflictuelles et synergiques, a été étudié de manière systématique par couple de ressources en se basant sur une description aussi exhaustive que possible 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 à l'aide de cas d'étude décrits dans la littérature scientifique.

Les conditions légales et normatives régissant les interactions entre les usages du sous-sol urbain ont été analysées et critiquées.

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

1.3.4 Démarche liée à l'aménagement du territoire

Les pratiques de la gestion des ressources du sous-sol et leur lien avec l'aménagement du territoire en Suisse ont été analysés grâce à des entretiens avec des praticiens et à des recherches bibliographiques. Un manque d'outils pour assurer le diagnostic des potentialités des ressources du sous-sol urbain a été observé. Une démarche d'évaluation de ces potentialités a été développée autour du cas d'étude de la ville de Genève.

Cette démarche se base sur l'utilisation de données spatiales, le développement d'indicateurs et de méthodes d'analyse. Les grandes étapes de la démarche développée s'articulent autour de la connaissance du sous-sol, de l'analyse du potentiel ressource par ressource et finalement de la mise en évidence des interactions entre les usages dans un contexte donné. Les données spatiales du canton de Genève ainsi que des données statistiques ont servi de base à cette analyse.

Les quatre familles de ressources du sous-sol urbain ont été présentées en introduction et sont rappelées par la figure 2. Ce chapitre vise à décrire les principales utilisations qui en sont faites dans le contexte urbain.

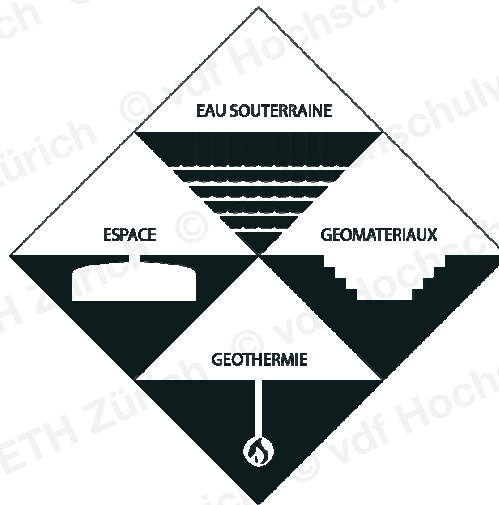


Figure 2 - Les ressources du sous-sol urbain

2.1 Usages 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 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 souterrain 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 une performance comparable à un bâtiment de surface très efficient (standards Minergie®), sur l'ensemble de son cycle de vie (Poux, 2008).

Dans le cadre de cette recherche, deux limites sont posées pour 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). Cette hypothèse a été confirmée par les enquêtes sociologiques présentées au chapitre 5. 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, 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 (tableau 1):

- Emprise géométrique des ouvrages : elle gouverne leur insertion dans le volume géologique. Elle a également 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 souterrains⁴ sont également un élément important de description des infrastructures souterraines. Une synthèse de ces techniques et méthodes est présentée dans Blunier (2009) en annexe B.

⁴ 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.

Tableau 1 - 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	Technique
Linéaire verticale	Technique	Fondations profondes
		Captage d'eau souterraine
		Exploitation géothermique

2.2 Usages des géomatériaux

De nombreux types de matériaux de construction sont utilisés dans les villes. Parmi eux, les géomatériaux ont une place prépondérante dans le métabolisme urbain. En termes de masse, 75 % de l'ensemble des flux de matières (l'eau, les hydrocarbures et la nourriture exclus) 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 m³/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 rarefaction 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 de 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 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.

2.3 Usages de l'eau souterraine

Les eaux souterraines sont une composante importante du cycle de l'eau. Elles occupent le deuxième 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 accentuer 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.).

2.4 Usages de la géothermie

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 3) :

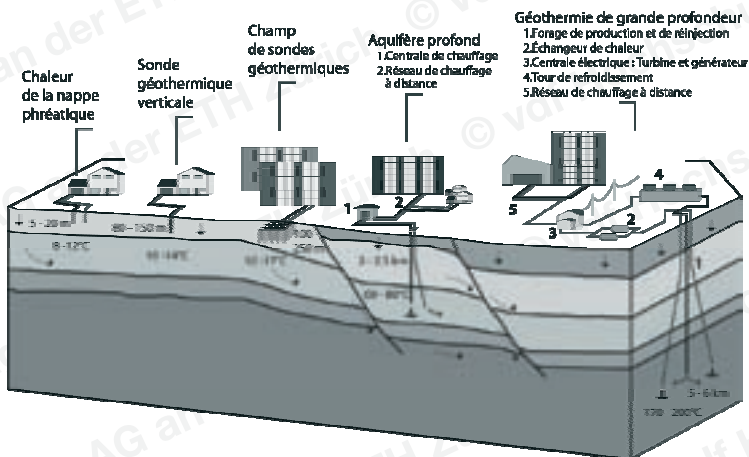


Figure 3 - Utilisation de l'énergie géothermique (source : CREGE, centre de recherche en géothermie Neuchâtel)

- 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, 2009a, Parriaux, 2009b). 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'exploitation 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 reprend cette idée. On notera toutefois qu'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 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 »).

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 6'000 de plus qu'en 2006, ou encore 26'000 de plus qu'en 2000. Ainsi, la Suisse est le pays qui possède le plus grand nombre de sondes géothermiques installées par habitant. Ces installations sont essen-

tiellement développées pour des villas et de petits bâtiments, donc plutôt en milieu périurbain (Lund et Freeston, 2001, Signorelli et al., 2008).

2.5 Synthèse du chapitre

Le sous-sol urbain est le réservoir de quatre familles de ressources : espace, géomatériaux, eau souterraine et géothermie. Ces ressources offrent de nombreuses opportunités de valorisation pour servir le métabolisme de la ville. Dans ce chapitre, une présentation des principaux usages de ces quatre familles de ressources a été exposée.

Les ressources du sous-sol ont été exploitées depuis toujours dans les espaces urbains. Afin de comprendre les mécanismes qui ont gouverné cette exploitation, une analyse transversale a été menée dans cinq villes : Mexico, Paris, Helsinki, Tokyo et Montréal. Ces villes ont été sélectionnées en raison du rôle particulièrement important joué par les ressources du sous-sol dans leur évolution. Le but de cette analyse est de comprendre comment et pourquoi les ressources du sous-sol sont mobilisées et de mieux appréhender les succès et les échecs de ces modes de développement. Dans le présent document, les études de cas ne sont pas représentées *in extenso* (elles sont accessibles, ainsi que la bibliographie complète dans Blunier, 2009), seul un rapide résumé des itinéraires de développement est développé pour chacune des villes, suite à quoi sont exposés les éléments d'analyse transversale.

3.1 Cinq itinéraires de développement des ressources du sous-sol urbain

3.1.1 Mexico

Mexico est située dans un bassin versant d'origine volcanique au dessus d'un aquifère très important. Elle est soumise à une très forte pression démographique qui se transfère sur ses besoins en ressources. Le développement de Mexico est intimement lié à l'exploitation de ses ressources en eau souterraine. Dès le 19^e siècle, l'aquifère a été surexploité. Au cours du 20^e siècle, cette surexploitation a eu pour conséquence un important phénomène de subsidence (atteignant en moyenne 7,5 m). Cette subsidence entraîne une importante détérioration des infrastructures urbaines en surface et en souterrain (métros, tunnels d'adduction et d'évacuation des eaux, etc.) ainsi qu'une fracturation des couches protectrices de l'aquifère, si bien que la qualité des eaux diminue. L'ampleur des défis et les difficultés organisationnelles à coordonner la gestion des eaux et celles des développements infrastructurels rendent la situation de Mexico particulièrement contraignante.

3.1.2 Paris

Paris se trouve dans un grand bassin sédimentaire. Les géomatériaux ont été exploités en carrières souterraines jusqu'au 19^e siècle. De nombreux effondrements ont conduit à l'interdiction de ces exploitations. Les eaux souterraines de Paris ont été une ressource importante jusqu'au début du 20^e siècle. Le développement d'infrastructures souterraines importantes à partir de cette époque (réseau de grands collecteurs d'égouts, métro, tunnels ferroviaires et routiers, parkings et sous-sol de bâtiments) a entraîné d'importantes modifications des écoulements souterrains et de la qualité des eaux et par corollaire, l'abandon des ressources en eau souterraine pour l'eau de boisson.

L'encombrement et la désorganisation du « Paris souterrain » ont été dénoncés par des architectes dès les années trente. Malgré la naissance d'un courant urbanistique spécifique aux espaces souterrains, les tentatives de correction de cette situation ont échoué.

3.1.3 Helsinki

Helsinki, ville péninsulaire, est située sur un socle rocheux cristallin proche de la surface et des terrains de couverture argileux peu favorables à la construction. Des usages intenses de l'espace souterrain ont été développés dans cette ville à partir des années vingt. Le contexte géologique a permis la réalisation d'ouvrages de grande taille (tunnels et cavernes) par minage. Les matériaux d'excavation de ces constructions ont essentiellement été réutilisés en remblais, particulièrement pour améliorer la qualité des terrains pour la construction et pour gagner de l'espace sur la mer.

L'importance de la ressource « espace souterrain » a été identifiée dès le milieu du vingtième siècle par les autorités. Pour en assurer la coordination, d'importants efforts ont été portés sur l'acquisition et le maintien de l'information géologique ainsi que sur l'évaluation du potentiel des terrains rocheux pour la construction souterraine. En raison de la faible importance des terrains aquifères, peu de conflits sont apparus entre ouvrages souterrains et eau.

3.1.4 Tokyo

L'important bassin sédimentaire sur lequel est située Tokyo présente de nombreuses formations aquifères. Tokyo a connu un très fort développement démographique au cours du 20^e siècle qui a eu pour conséquence une forte densification de l'agglomération. À partir des années vingt, l'espace souterrain est apparu comme une solution pour permettre la réalisation d'infrastructures urbaines sous le tissu dense. Les développements caractéristiques du Tokyo souterrain sont : son important réseau de métros, de nombreuses galeries commerciales, des axes routiers et des parkings et enfin des tunnels d'exhaure pour le drainage pluvial. Les conditions géologiques peu favorables du point de vue de la construction souterraine ont eu pour conséquence de nombreuses innovations technologiques dans ce domaine telles que la réalisation de tunneliers à pression de boues. La forte pression vers le sous-sol et la difficulté croissante à réaliser les projets souterrains d'utilité publique ont conduit les autorités à modifier le régime foncier et à définir un espace souterrain de droit public en 1998.

Dans un territoire fortement contraint, le Japon et particulièrement Tokyo a été confronté à deux problèmes importants de géomatériaux : importer des matériaux pour le métabolisme de la ville et exporter et stocker les matériaux d'excavation. Aussi, à Tokyo, des technologies de recyclage très poussées ont été mises en œuvre, comme la stabilisation des sols liquides à la chaux, au liant hydraulique ou à la mousse synthétique.

Les ressources en eau souterraine de Tokyo ont été exploitées dans la période industrielle puis graduellement abandonnées. Cet abandon est lié à des problèmes de subsidence (surexploitation), de baisse de qualité des eaux et de diminution de la demande (désindustrialisation). Depuis la fin des années soixante, les eaux souterraines remontent et posent des problèmes d'infiltration et de stabilité pour les ouvrages souterrains.

3.1.5 Montréal

La ville de Montréal a essentiellement assuré un développement de ses ressources en espace souterrain. Les tranchées ouvertes pour la réalisation du train transcontinental à la fin des années dix et laissées ouvertes pendant des années sont une des prémices du développement de la Ville Intérieure de Montréal. La saturation du Vieux-Montréal a en effet rendu nécessaire la construction d'un nouveau centre, dans une ville se trouvant confinée sur une île du fleuve Saint-Laurent. Aussi, on a construit en 1962 la Place Ville-Marie, dont la moitié de la surface utile se trouve sous le niveau du sol. Sa jonction avec les nouveaux réseaux de métro et de cheminements piétonniers en 1966 est l'opportunité de développer une réelle urbanité en souterrain et en espace confiné. Sous l'influence d'architectes visionnaires et grâce à un partenariat fort entre le public et le privé, la Ville intérieure de Montréal s'est développée en un réseau de plus de 30 km de long connectant 80 % des bureaux du centre-ville et comptant près de 2'000 commerces. Toutefois, ce développement n'a pas fait l'objet de planification d'ensemble et n'a pas toujours été assumé par les autorités comme partie intégrante du développement urbain de Montréal.

En raison de sa situation géographique (au bord du fleuve Saint-Laurent) essentiellement, la ville de Montréal a extrêmement peu valorisé ces ressources en eaux souterraines, malgré la présence d'aquifères dans les fractures du socle calcaire. Les deux autres ressources, géomatériaux et géothermie, ont fait l'objet de valorisations très marginales.

3.1.6 L'approche sectorielle : une caractéristique des développements souterrains

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 4). 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^e 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^e siècle au milieu du 20^e, les eaux souterraines sont exploitées abondamment pour l'alimentation en eau potable.
- À partir du début du 20^e 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^e 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).
- À la fin du 20^e 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.

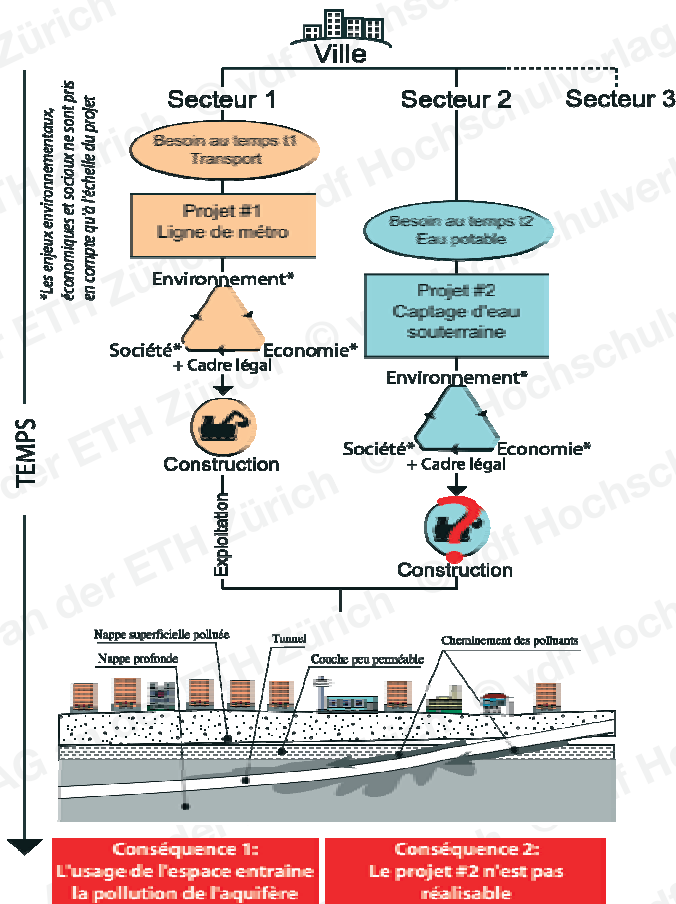


Figure 4 - Approche sectorielle des usages des ressources du sous-sol

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

3.2 Les leçons du passé : leviers de développement du souterrain

Les études de cas produites dans 5 villes du monde apportent des éléments sur les contextes et les conséquences de l'utilisation du sous-sol sur les différents modes de développement urbain. Le souterrain apparaît alors comme une ressource à part entière

du développement urbain. Comment et pourquoi les villes ont-elles valorisé leur sous-sol ? Quels sont les mécanismes qui les ont conduites à s'engager dans cette voie ? Quelles en sont les conséquences sur le fonctionnement des villes et sur les ressources naturelles ?

3.2.1 Démographie et exploitation du sous-sol

Les enjeux liés à l'exploitation des ressources souterraines sont étroitement liés aux contextes de développement démographique. À ce titre, le cas de Mexico est particulièrement illustratif. Pendant la période de la colonisation espagnole, du 16^e au 19^e siècle, le développement urbain important a nécessité la réalisation d'aménagements hydrauliques en amont de la ville. Cela a conduit à une baisse des flux hydrauliques de surface. Pour y remédier et approvisionner la population en eau, en 1957, près de 140 puits de captage avaient été creusés. Le développement démographique s'accroissant, le nombre de puits a également augmenté pour atteindre le nombre de 3'537 en 1998. En ajoutant les puits officiels, près de 10'000 puits parsèmeraient la ville : ils pompent l'eau entre 70 et 200 m de profondeur. L'abondance de la ressource en eau a permis d'accompagner le développement démographique de la ville. L'importance de l'exploitation est désormais telle que les ressources sont particulièrement fragilisées et conditionnent de fait les perspectives de développement urbain. De plus, d'importants problèmes d'affaissement des sols fragilisent les implantations humaines.

Le cas de Tokyo montre également que l'utilisation du souterrain a permis le développement de la ville en même temps qu'il en est une conséquence. En effet, Tokyo a connu une croissance démographique certainement sans pareil au cours du 20^e siècle. Entre 1900 et 1935, la population est passée de 2 à 7,35 millions d'habitants. La Seconde Guerre mondiale a ensuite causé de nombreux dégâts matériels et explique la nette baisse de la population tokyoïte (3,5 millions en 1945). La stabilité politique et la forte croissance économique mondiale d'après-guerre ont permis la relance de la croissance démographique, particulièrement vive jusqu'en 1960. La conurbation de Tokyo est désormais la plus importante du monde avec près de 13 millions d'habitants en 2007 (Statistics Division - Bureau of general affairs, 2007). Ce développement démographique s'est caractérisé, certes par un éloignement des limites de la ville, mais également par une forte densification du tissu urbain, et donc une très forte pression foncière sur les espaces centraux. Dans ces conditions, de nombreux ouvrages ont été construits en souterrain. Avant-guerre, mais surtout depuis les années cinquante, le réseau de métros a été construit. Il parcourt à présent la ville sur plus de 267 km. En lien avec le réseau de métros, de nombreuses galeries commerciales ont été développées, notamment dans les années soixante et soixante-dix. En 2000, ces superstructures souterraines, pour la plupart dédiées aux activités de commerces, couvraient une surface souterraine de près de 900'000 m². De nombreux tunnels routiers et parkings souterrains ont vu le jour. Dans certains quartiers, la plupart des bâtiments possèdent plusieurs étages en souterrain, parfois jusqu'à six. Ainsi, malgré des contraintes géologiques importantes, dans une ville qui s'est développée de manière rapide et importante sur une surface réduite, l'usage du sous-sol a permis une densification du tissu urbain, une plus grande efficacité des réseaux de transport et un accompagnement du développement économique.

3.2.2 Des conditions géologiques favorables

Les conditions géologiques dans les villes observées peuvent constituer des leviers pour la valorisation du sous-sol et au final du développement urbain. Précisément à Paris, les conditions géologiques (présence de grès et de calcaire) ont permis l'exploitation de géomatériaux. En effet, de l'époque romaine jusqu'en 1813, les extractions ont contribué à la construction de la majeure partie de la ville. Les carrières de grès et de calcaire ont notamment permis de construire les plus beaux bâtiments parisiens. Ces siècles d'exploitation du sous-sol ont causé des problèmes importants d'effondrements. En 1854, on estimait que près d'un dixième de la surface de la ville aurait reposé sur des excavations. À partir de 1813, l'exploitation des carrières sous la ville a été interdite. Ceci est intervenu à une époque où les coûts des transports diminuaient, ouvrant ainsi la possibilité d'exploiter des carrières à ciel ouvert en périphérie des villes.

À Helsinki, les conditions géologiques favorables (soubassement rocheux cristallin composé de granite et de gneiss), ont permis l'exploitation de la ressource espace. Le sous-sol est exploité pour des usages techniques depuis les années 1920. Le développement du souterrain a pris une ampleur plus importante au cours de la période 1960-80. Cela s'est caractérisé par la construction de nombreux ouvrages notamment susceptibles d'accueillir du public. Les travaux ont été facilités par la possibilité de réaliser des excavations à l'explosif. De fait, le coût de construction en souterrain y est relativement faible.

À Mexico, la qualité de l'aquifère, sa relative protection et son importance ont été des conditions favorables au développement de la ville. Ce n'est que dans les dernières décennies que les limites de l'aquifère ont été atteintes et que des mesures de protection ont été nécessaires.

Au cours de l'histoire du développement urbain des villes étudiées, les conditions géologiques ont donc pu faciliter l'exploitation du souterrain dans deux domaines. D'une part, l'approvisionnement en matériaux de construction a été facilité par la présence de géomatériaux de qualité et facilement exploitables. D'autre part, la présence de roches dures a facilité la construction d'ouvrages de grande ampleur en souterrain.

3.2.3 Des contextes de développement urbain dynamiques

La valorisation du souterrain a souvent été menée dans des contextes de développement urbain spécifiques. Le souterrain constituant ainsi une composante de projets urbains de grande ampleur.

L'expérience montréalaise montre que le développement du réseau souterrain a bénéficié, à ses prémices, d'un contexte de redéveloppement urbain. De manière contemporaine à la construction de la Gare Centrale, les autorités municipales ont en effet cherché à rénover le centre ancien. Un important travail d'amélioration de l'habitat, mais également de « curetage urbain » a conduit les autorités municipales à élaborer une nouvelle trame urbaine. Des dispositifs incitatifs ont permis de mobiliser le partenariat public-privé pour valoriser le souterrain. Dans ce contexte, le potentiel du souterrain a été valorisé. L'expérience montréalaise est de ce point de vue généralisable et l'on peut considérer qu'une volonté forte d'intervenir sur la ville constitue un levier pour la valorisation de la ressource espace du souterrain.

Plus récemment, de nombreux cas de requalification, notamment d'infrastructure de transport, sont l'occasion de valoriser le souterrain dans les projets urbains. On peut

ainsi évoquer le projet urbain de la Spina Centrale à Turin (Gotlieb, 2003) où l'utilisation du souterrain permet de déplacer et d'agrandir les infrastructures de transport et ainsi de libérer des espaces en surface et de procéder à des opérations de requalification urbaines majeures pour la ville. Le projet du Big-Dig à Boston est très connu dans le continent nord-américain. Big-Dig⁵ est le surnom du projet autoroutier souterrain en construction depuis 1985 qui permet de remplacer une autoroute suspendue et donc d'alléger la circulation de surface dans le cœur de la ville. Les espaces dégagés en surface recréent de la qualité urbaine et valorisent l'image de la ville.

Enfin, l'expérience finlandaise d'Helsinki montre que les récentes constructions d'ouvrage se sont inscrites dans un contexte de densification du centre-ville. En effet, outre les enjeux liés à l'économie de l'espace, la ville est contrainte dans son développement par le fait qu'elle se situe sur une péninsule.

3.2.4 Facteurs climatiques

Le sous-sol est moins sujet aux aléas climatiques que l'extérieur. Il n'est pas exposé aux vents et connaît des variations de température moindres que l'air. Parmi les villes étudiées, deux se situent dans des zones soumises à des conditions climatiques difficiles. Ainsi à Montréal, où les usages de la ressource espace du sous-sol sont particulièrement importants. La construction de la Ville Intérieure a ainsi permis de garantir la continuité au cours de l'année des activités socioculturelles et des activités commerciales. À Helsinki, l'étude de cas réalisée montre également l'intérêt de développer des infrastructures collectives à vocation récréative en sous-sol : piscine, opéra, etc. Les travaux analysés insistent également sur les potentiels énergétiques de la construction en souterrain dans ces milieux. Sans verser dans le déterminisme géographique, on peut conclure que les conditions thermiques difficiles incitent à la valorisation de la ressource espace du sous-sol.

3.2.5 Aspects juridiques

Dans la plupart des cas étudiés et globalement dans la majeure partie des pays du monde, les aspects réglementaires liés à la propriété foncière et au mode de production de la ville (planification urbaine et urbanisme opérationnel) ne facilitent pas le développement du souterrain. En effet, comme nous le développerons dans un chapitre spécifique, la propriété foncière du sol induit celle du sous-sol. À ce sujet, l'expérience la plus riche est certainement celle de Montréal. En effet, si les autorités locales n'ont développé aucune démarche de planification du souterrain d'ensemble, elles ont mis en place des outils incitatifs qui ont contribué au développement du souterrain. Parmi eux, il faut évoquer le fait que jusqu'en 1990, les surfaces bâties en souterrain n'étaient pas prises en compte dans le calcul de l'Indice de Superficie de Plancher (équivalent du CUS en Suisse). Cela a largement contribué au développement de l'activité commerciale en souterrain, soit de manière indépendante à la rue, soit connecté aux

⁵ <http://www.masspike.com/bigdig/index.html> consulté le vendredi 26 septembre 2008 à 19h15.

commerces situés en surface. Par ailleurs, des droits de superficie (baux emphytéotiques en France), des locations du domaine public et des dérogations de droit à bâtir ont été mis en place et ont largement contribué au développement du réseau souterrain.

À Tokyo, le développement du souterrain a eu lieu dans un premier temps sans planification spécifique. Puis dans les années 1990, après une certaine réticence à développer le sous-sol, les autorités publiques japonaises ont souhaité encourager cette pratique. Cette stratégie a été élaborée en lien direct avec les orientations globales de développement urbain. En 1998, afin de mieux contrôler le développement du souterrain, une loi a été votée. Elle prévoyait de prioriser l'usage du sous-sol profond pour des ouvrages publics. Pour définir le sous-sol profond, une méthode de calcul a été développée. Elle conduit à définir une limite située soit à la profondeur de 40 m sous le sol, soit 10 m sous les fondations des bâtiments. Par ailleurs, au cours des années quatre-vingt, l'État a souhaité que les communes les plus concernées développent des méthodes de planification pour l'utilisation conjointe du sol et du sous-sol. La Ville de Tokyo a ainsi développé un plan d'utilisation du sous-sol dans chacune de ses 23 circonscriptions. Ces plans prévoyaient d'organiser les usages du sous-sol et les équipements publics à implanter. Cette démarche de planification n'a pas été renouvelée au cours des plans suivants. En tout état de cause, l'exemple tokyoïte se révèle être particulièrement intéressant, car il illustre l'intention d'une collectivité de maîtriser le développement de son souterrain, sans bloquer les initiatives privées dans la partie superficielle du sous-sol (environ jusqu'à 40 m).

Les cadres réglementaires oscillent donc entre la volonté des autorités publiques d'encadrer et de contrôler le développement du souterrain d'une part et la recherche de mécanismes incitatifs pour encourager son développement d'autre part. Les études de cas montrent que les pays adaptent leur cadre réglementaire et juridique en fonction des besoins effectivement observés sur le territoire.

Pour conclure et vis-à-vis du contexte territorial suisse, les expériences observées sont enrichissantes à plusieurs titres. En effet, si la Suisse ne compte pas de mégapole sur son territoire, il faut noter que le phénomène urbain y prend une ampleur de plus en plus importante. Ainsi, le système urbain suisse est marqué par d'intenses mécanismes de métropolisation. La forte compétitivité de son économie lui permet d'attirer des entreprises à forte valeur ajoutée qui se localisent principalement dans les cinq aires métropolitaines du pays : Zurich, Berne, Bâle, Genève-Lausanne, et le Tessin (Office du développement territorial, 2008). Cette dynamique renforce la pression foncière. Cette dernière ne semble pas encore être suffisamment puissante pour se répercuter sur le tréfonds comme cela a été observé à Tokyo par exemple. Toutefois, à l'avenir les tendances de développement de la Suisse devraient contribuer à renforcer la polarisation des agglomérations. À cela, il faut ajouter que la Suisse est un petit pays. Son territoire est largement contraint par les montagnes. Ces éléments renforcent la pression sur les espaces les plus facilement urbanisables. Autre élément qui pourrait plaider pour une valorisation future du souterrain : l'importance des infrastructures ferroviaires. Souvent très bien situées dans les centres urbains, les gares ferroviaires constituent des secteurs stratégiques. Les politiques de développement territorial contemporaines favorisant l'utilisation des transports publics, l'intérêt de ces pôles devrait aller croissant. Les gares de Zurich, de Berne, de Genève et de Genève-Aéroport, ont déjà développé les prémices d'espaces souterrains ferroviaires et marchands.

Au regard des expériences passées, on peut donc estimer que la tendance à la densification des centres urbains ainsi que le dynamisme des villes suisses sont des éléments de contextes qui permettraient d'engager un développement du souterrain. Les développements et les réflexions qui suivent doivent permettre d'affiner cette réflexion.

3.3 L'urbanisme souterrain : état de l'art

Aucune des villes étudiées 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. L'urbanisme souterrain n'a pas manqué de réflexions théoriques approfondies. Elles ont vu le jour dès le début du 20^e siècle, donnant naissance au courant de l'urbanisme souterrain.

Évoquer l'urbanisme souterrain permet de situer les réflexions sur la valorisation des ressources du sous-sol dans un domaine de recherche scientifique.

Les prémices de l'urbanisme souterrain sont issues des travaux de l'architecte et ingénieur civil Eugène Hénard (1903) qui dénonça l'encombrement anarchique du souterrain et proposa une réflexion approfondie sur l'organisation des réseaux et des flux en parallèle à la forme bâtie de la ville. Son concept est formalisé dans l'idée de la rue à étages multiples (figure 5). Cette nouvelle disposition revient à moderniser les immeubles et les rues. Il proposa de « *dédoubler la rue actuelle en deux rues* » (Hénard, 1903). Il dessina ainsi le profil d'une rue à un double niveau de souterrain.



Figure 5 - La rue à étages multiples, concept développé par l'architecte Hénard au début du 20^e siècle (source : Barles, 1995)

Par la suite, l'urbanisme souterrain a fait l'objet de développements spécifiques. Ils ont été largement animés par les travaux, véritablement fondateurs, de l'architecte et urbaniste Édouard Utudjian. Ils ont conduit, à la création, en 1933, du Groupe d'Études du Centre Urbain Souterrain (GECUS). Il a eu pour but de développer les réflexions et les propositions d'aménagement du sous-sol urbain. Sa création repose sur trois constats (Barles, 1995) :

- le chaos du sous-sol doit être géré de manière rationnelle,
- l'encombrement de la surface doit entraîner l'implantation de certaines fonctions en souterrain,
- le risque d'agressions étrangères nécessite l'implantation de certaines fonctions en sous-sol.

Le GECUS a prôné l'utilisation de la troisième dimension (le sous-sol) pour résoudre les maux urbains de l'époque. L'objectif de l'urbanisme souterrain a alors résidé principalement dans l'enterrement « *de certains organes de la ville qui encombrent la surface de leurs masses inertes* » (Utudjian, 1952). Il identifie trois facteurs de développement du souterrain : l'exploitation, la circulation et la protection. L'urbanisme souterrain dépasse les visions techniques et scientifiques du souterrain pour mettre l'homme au centre des réflexions sur l'utilisation du sous-sol. Les premiers travaux visent donc à organiser « harmonieusement » l'ensemble des implantations humaines en sous-sol. Le GECUS s'est toujours défendu d'implanter l'habitat en souterrain. Il a également milité pour la préservation du patrimoine s'opposant ainsi aux idées fonctionnalistes. Les travaux de l'urbanisme souterrain ont porté sur le contenu des réalisations en souterrain. Ils cherchent à les mettre en perspective avec le contexte spatial et la morphologie urbaine. Les travaux sur le « zoning » du souterrain dont l'objet est spécifiquement d'organiser les différentes fonctions et usages du sous-sol en lien avec la surface ont été développés.

Les travaux de l'urbanisme souterrain ont inspiré deux courants de l'urbanisme : l'urbanisme sur dalle, conséquence du fonctionnalisme et la poursuite de l'urbanisme souterrain. L'urbanisme sur dalle prône la séparation totale des cheminements piétons et de la circulation automobile, par un éclatement de la rue en plusieurs niveaux. Les réseaux de transport en commun sont prioritairement enterrés, les véhicules individuels se déplacent plutôt au niveau du sol naturel et au-dessus, la dalle est dédiée aux habitants-piétons. Ils s'y déplacent sur des passerelles qui relient des espaces eux-mêmes monofonctionnels (habitations, commerce, travail tertiaire, culture et loisirs, nature, etc.).

Toutefois, le courant de l'urbanisme souterrain n'a pas eu le succès escompté notamment dans son propre domaine. Les urbanistes eux-mêmes étant peu enclins à adhérer à des approches peut-être trop techniciennes et préférant chercher à la surface les réponses à leurs attentes. Ainsi, à la fin des années 1970, le courant de l'urbanisme souterrain s'est passablement éclaté laissant place à des approches disparates plus pragmatiques, disciplinaires, voire techniques. Depuis, ce sont principalement les professionnels de la gestion des ressources naturelles (géologues) ou de la construction souterraine (ingénieurs civils) qui développent ces réflexions. L'essor et la qualité des travaux de l'Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) en témoignent. Cette dernière valorise les travaux de ses membres en les consolidant par des approches dépassant leurs propres champs.

Depuis le début des années 1990, des signes annonciateurs d'un regain d'intérêt pour les valorisations urbaines du souterrain sont perceptibles. La montée des préoccupations environnementales et les volontés d'engagement vers un développement durable réhabilitent l'urbanisme souterrain. Les intentions de préservation des ressources, de développement de formes urbaines compactes et de promotion des mobilités durables renforcent l'intérêt pour le sous-sol urbain. De par le monde se développent des opérations d'aménagement, souvent de grande ampleur. Elles accompagnent le développement des villes et les projets de requalification urbaine. Elles portent en particulier sur des pôles multifonctionnels intégrant notamment des centres commerciaux et des pôles d'échanges multimodaux (figure 6). De plus en plus, ces opérations sont marquées par l'intervention de grandes entreprises de construction intégrant des bureaux d'études de conception et appuyées par des groupes financiers solides (Barles et Jardel, 2005).



**Figure 6 - centre commercial souterrain sous le parc de Sapporo
(source : Golany et Ojima, 1996)**

Plus récemment, des démarches de planification innovantes à l'échelle des métropoles (Helsinki, Tokyo, etc.) ont été initiées (Golany et Ojima, 1996). De nouvelles réflexions et expériences s'intéressent aux potentiels offerts par l'habitat troglodyte (*earth sheltered*) et au rôle du souterrain dans la morphologie urbaine. L'urbanisme souterrain y est appréhendé en prenant en compte l'ensemble des fonctions et activités qui composent la ville (Golany et Ojima, 1996). On voit dès lors se développer un nouvel urbanisme souterrain qui cherche à « réunir les approches disparates de la décennie précédente puisqu'il veut intégrer la dimension environnementale dans ses projets » (Barles, 1995). L'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain a

récemment créé un comité dont les activités ont spécifiquement pour but de « *promouvoir l'utilisation du sous-sol auprès des élus soucieux d'améliorer l'équipement de leur ville, des responsables d'entreprises impliquées dans la construction et l'exploitation d'ouvrages souterrains* ».

Le projet Deep City s'inscrit dans la perspective historique de l'urbanisme souterrain et des réflexions de valorisation du sous-sol. Il se distingue toutefois des travaux évoqués. D'une part, il vise explicitement à promouvoir les approches transversales. D'autre part, il se concentre sur l'analyse des différentes ressources du sous-sol et de leurs interactions. Il s'appuie sur des rapprochements disciplinaires entre les sciences de l'ingénieur, les sciences sociales et le domaine de la gestion des ressources naturelles.

3.4 Synthèse du chapitre

Les expériences de Mexico, Paris, Helsinki, Tokyo et Montréal montrent 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 souvent 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. Ces développements sont fortement favorisés par des facteurs de contexte (conditions géologiques, climatiques) et par les modifications urbaines (pression démographique et renouvellement par exemple). Paradoxalement, ces développements ont peu bénéficié d'approches coordonnées de planification. Malgré l'existence d'un courant d'urbanisme souterrain, les acteurs de la gestion urbaine ont globalement 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, le sous-sol n'est pas perçu comme une réelle ressource (c'est à dire offrant des potentialités, mais aussi des limites et une vulnérabilité). Le résultat est la surexploitation de plusieurs ressources et de nombreux conflits d'usage. Ainsi, de nombreuses villes manquent les possibilités offertes par le sous-sol, en ne prenant pas la mesure des synergies possibles entre ses usages, et en réduisant la capacité de renouvellement de ses ressources.

Le chapitre précédent sur les expériences et usages passés du sous-sol urbain a mis en évidence la prédominance de l'approche sectorielle dans le développement des ressources du sous-sol. Les développements réalisés selon cette approche sont gouvernés par une vision qui procède des besoins de la ville aux usages des ressources (voir figure 4). Ce mode de développement a abouti à des conflits d'usage et à un gaspillage de ressources. Cette situation n'est pas compatible avec les objectifs du 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 nouvelle *approche par les usages multiples* développée dans ce projet promeut un changement de paradigme qui permettra d'assurer un développement qui procède *des ressources aux besoins*. Le tableau 2 présente les principales différences entre l'approche sectorielle et la nouvelle approche des usages multiples. 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.

Tableau 2 - 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 les contraintes	Fondée sur les interactions
Développement selon opportunité	Développement planifié
Échelle du projet	Échelle fonctionnelle urbaine
Compétences disciplinaires	Compétences transdisciplinaires
Pensée analytique	Pensée systémique

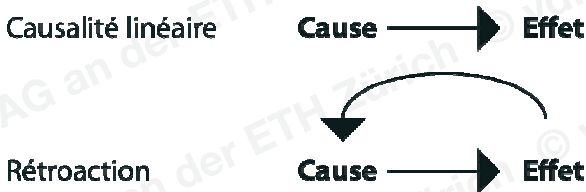
4.1 Un cadre de réflexion systémique

La mise en œuvre d'une telle approche demande ainsi de tenir compte de l'ensemble des interactions entre les usages des ressources (conflits et synergies) au sein du système sous-sol urbain.

La pensée systémique promeut une réflexion globale sur le système en portant l'attention sur la façon dont ses composantes sont liées et interagissent plus que sur les composantes en elles-mêmes. Selon Le Moigne (1977), un système peut être défini par : *« (...) un ensemble d'éléments identifiables (disposant d'attributs) et de leurs interrelations, ensemble borné dont on définit par un choix discrétionnaire, politique, les frontières. »*

Si dans sa formalisation, la pensée systémique tend à s'opposer à la pensée analytique, qui promeut la décomposition d'un problème en éléments fondamentaux, les deux modes de pensée se complètent dans la pratique. L'articulation systémique et analytique permet ainsi l'analyse de problèmes complexes à plusieurs échelles.

Un élément important de la pensée systémique est la notion de complexité. En systémique, la complexité est caractérisée par le type de relations qui existent entre les composantes du système. En effet, on distingue deux principales relations :



Selon le type de relations entre les éléments du système, ce dernier pourra être :

- **Complicqué** : dans le cas d'un système qui possède de nombreux éléments reliés par des relations de causalités linéaires.
- **Complexe** : dans le cas d'un système qui possède des éléments reliés par des relations de rétroaction.

Ainsi, les systèmes complexes qui n'obéissent pas à des logiques mécanistes (action-réaction linéaire), évoluent de manière dynamique en fonction de leurs états précédents et ne sont pas mécaniquement réversibles.

L'importance des interactions entre les usages du sous-sol urbain a déjà été largement discutée. Elle montre que le sous-sol peut être envisagé comme un ensemble d'éléments et de leurs interrelations, à savoir un système selon la définition proposée par Le Moigne. Par ailleurs, le système sous-sol présente un certain nombre de caractéristiques spécifiques :

- C'est un 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.

- C'est un système dynamique. Le sous-sol est sujet à des flux d'eau et d'énergie. 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.
- C'est un 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 critères identifiés par Yatchinovsky (2000) pour décrire la complexité : 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 sa dynamique non linéaire, mais surtout d'anticiper des changements irréversibles qui pourraient résulter de son exploitation. Une telle approche est promue par l'analyse des interactions entre les ressources du sous-sol.

4.2 Interactions entre les usages des ressources du sous-sol urbain

Une revue de l'ensemble des interactions entre les usages des ressources du sous-sol urbain a été menée selon une systématique dérivée de la matrice structurale de Le Moigne (1977) (tableau 3). Les impacts de l'usage d'une ressource sur une autre (ou sur d'autres usages de la même ressource) ont été évalués par couple de ressources. Ils ont été illustrés par des exemples issus de la littérature scientifique et technique et les conditions dans lesquelles ces interactions se développent (en particulier les conditions géologiques et hydrogéologiques) ont été décrites selon l'état actuel des connaissances.

Deux types d'interactions ont été distingués :

- 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.

Tableau 3 - Systématique pour l'évaluation des interactions entre les ressources

ressource	Espace	Eau souterraine	Énergie géothermique	Géomatériaux
Espace				
Eau souterraine				
Énergie géothermique				
Géomatériaux				

Cette revue exhaustive peut être consultée dans Blunier (2009). Nous présentons ici les principales caractéristiques du système sous-sol qui régissent ces interactions ainsi qu'une synthèse de l'ensemble des interactions.

4.2.1 Spécificités du cycle de l'eau en milieu urbain

En milieu urbain, le cycle de l'eau est modifié par plusieurs facteurs qui agissent tant sur le bilan quantitatif que la composition physico-chimique des eaux. Ces facteurs sont présentés par la figure 7.

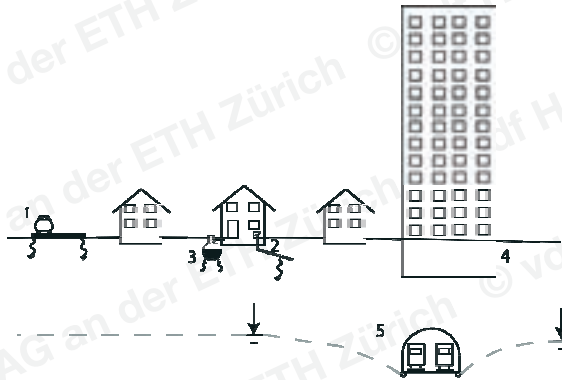


Figure 7 - Éléments spécifiques du cycle de l'eau en milieu urbain

- (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

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) :

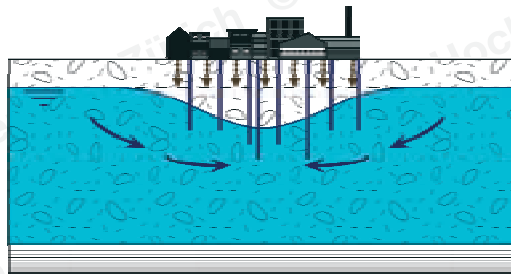
- Imperméabilisation de la surface (diminution de la recharge)
- Infiltration des eaux de pluie dans des puits perdus ou des tranchées d'infiltration (augmentation de la recharge). En Suisse, la politique récente de gestion des eaux météoriques favorise l'infiltration sur l'évacuation, pour autant que 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)
- 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, 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 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 le bilan hydrogéologique de manière importante. Il est d'ailleurs intéressant de noter que de nombreuses villes des pays industrialisés ont connu un développement similaire de leurs nappes souterraines (figure 8). 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.

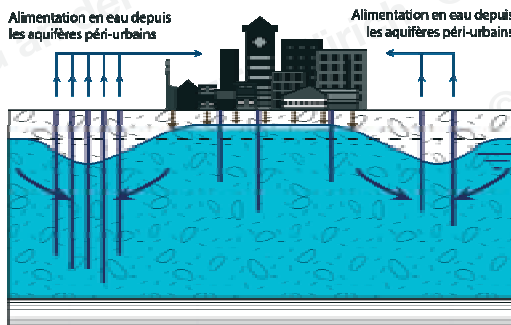
Ce phénomène de rebond phréatique a par exemple été observé à Barcelone (Vázquez-Suñe et al., 2005, Vázquez-Suñe et al., 1997), Milan (Bonomi et Ellis, 1999) ou Londres (Lerner et Barrett, 1996, Mavroulidou et Woods, 1997). Les variations de niveau piézométrique observées vont de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. 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 sou-

terrains 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.



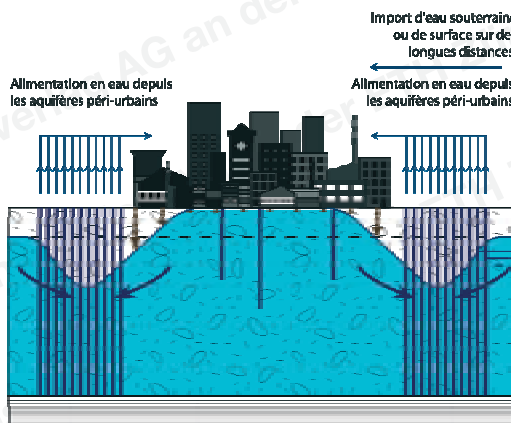
(a) Le village devient une ville

- 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 8 - Évolution des niveaux phréatiques et croissance urbaine. Phénomène de rebond phréatique (adapté de : Morris et al., 1997)

4.2.2 Interactions espace-eau souterraine

La construction d'ouvrages souterrains peut avoir des impacts sur le bilan hydrogéologique ainsi que sur la qualité des eaux.

- Certains ouvrages construits sans mesures particulières d'étanchement sous la nappe nécessitent des mesures de pompage (pour abaisser la nappe sous l'ouvrage ou pour évacuer les eaux drainées dans l'ouvrage). Ceci entraîne un abaissement des niveaux phréatiques. Lorsque l'aquifère est exploité, l'abaissement du niveau phréatique a pour conséquence la diminution des débits exploitables. Dans les cas extrêmes, les puits peuvent se retrouver entièrement au-dessus du niveau phréatique et devoir être abandonnés. Ce phénomène est appelé « concurrence hydrogéologique ».
- Les ouvrages souterrains pénétrant dans la nappe changent les conditions d'écoulement et créent un barrage à cet écoulement. Les échanges aux limites de l'aquifère sont perturbés par les effets barrage, de même que le bilan hydraulique (réduction de la section d'écoulement). Les niveaux phréatiques peuvent être localement modifiés de manière importante (augmentation en amont de l'ouvrage, réduction en aval).
- Lorsque deux ouvrages superposés sont traversés par un même ouvrage, la perforation de la ou des couches imperméables qui les séparent provoque un court-circuit hydraulique : la nappe dont le potentiel hydraulique est le plus important s'écoule dans l'autre nappe. Les courts-circuits ont un effet quantitatif : la nappe dont le potentiel est le plus élevé peut être drainée par l'autre. Ils ont également un effet qualitatif : les eaux de la nappe dont le potentiel est le plus faible sont mélangées avec celles de l'autre nappe. En milieu urbain, cet effet qualitatif est de grande importance. En effet, les nappes superficielles peu profondes sont souvent polluées alors que les ressources en eau potable se trouvent dans des nappes plus profondes et mieux protégées.
- 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.
- 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 jetting⁶. 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

⁶ Le procédé d'injection consiste à faire pénétrer dans les porosités ou les fissures du massif géologique un coulis qui, après durcissement ou polymérisation, consolide et étanche le terrain. Le jet grouting ou jetting est une technique similaire, pour laquelle des hautes pressions (de l'ordre de 400 bars) sont utilisées lors de l'injection. Ces hautes pressions déstructurent le terrain afin de réaliser une sorte de « béton de terrain ».

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. Lors de l'utilisation de tunneliers à pression de boues⁷, il peut également se produire une migration des boues dans l'aquifère.

- 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 : 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 lessivage. Lorsque les ouvrages génèrent des modifications importantes des conditions d'écoulement (par exemple par concurrence hydraulique ou effet barrage), les polluants existant dans une nappe (par exemple si une nappe est touchée par un site contaminé ou des rejets industriels) peuvent être déplacés vers les zones de captage par drainance.
- Dans certaines situations, l'exploitation de l'espace et de l'eau souterraine peut être réalisée en synergie. C'est en particulier le cas lorsque les eaux souterraines sont captées dans un ouvrage souterrain (par exemple un tunnel), pour l'adduction en eau potable ou des besoins industriels.

Réciproquement, l'exploitation des eaux souterraines peut influencer l'exploitation de l'espace :

- Lorsque les niveaux phréatiques augmentent, il peut se produire des infiltrations dans les ouvrages souterrains. C'est particulièrement le cas dans les villes ayant vécu un rebond de leur nappe phréatique (
- figure 8). 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. Par exemple, 12 millions de m³ étaient pompés du réseau de métros de Barcelone en 1999 (Vázquez-Suñe et al., 1999).
- De même, si les ouvrages ont été construits étanches, les modifications de niveaux phréatiques peuvent entraîner une augmentation de la sous-pression (poussée d'Archimède), pouvant aller jusqu'à la déstabilisation de l'ouvrage.
- La diminution des niveaux phréatiques peut entraîner un affaissement du terrain, c'est le phénomène de subsidence (de même, la remontée des eaux peut entraîner un soulèvement, toutefois son ampleur est moins importante). Subsidence et soulèvement ne sont pas homogènes, pour cette raison les ouvrages souterrains se trouvent soumis à des contraintes différentielles qui peuvent les détériorer.

⁷ Engins destinés à la construction de tunnels. Ils sont utilisés surtout en terrains meubles grossiers saturés. De la boue sous pression est utilisée pour assurer le soutènement du tunnel lors de sa réalisation.

4.2.3 Interactions espace-géothermie

La construction d'ouvrages souterrains offre souvent des possibilités d'utilisation synergétique de l'énergie géothermique :

- La réalisation de géostructures énergétiques est souvent envisageable lors de la construction d'ouvrages souterrains. Il s'agit de pieux, parois ou radiers qui sont équipés d'échangeurs thermiques reliés à une pompe à chaleur.
- De même, si des mesures de pompage sont rendues nécessaires pour des raisons techniques (par exemple infiltrations d'eau), il peut être intéressant d'exploiter le flux thermique des eaux pompées.

Au contraire, les infrastructures de captage de l'énergie géothermique entrent souvent en conflit avec les ouvrages souterrains :

- Il peut exister des conflits spatiaux entre les deux types d'ouvrages : l'emprise spatiale des infrastructures géothermiques (en particulier les champs de sondes) présente une contrainte pour la construction souterraine.
- Si le dimensionnement n'est pas réalisé de manière adéquate, l'utilisation de l'énergie géothermique dans les structures porteuses peut avoir un effet de modification des conditions mécaniques par sollicitation thermique. Par ailleurs, lors du geocooling (exploitation de la géothermie pour des besoins de refroidissement), il peut se produire un décollement du terrain par dessiccation ainsi que des tassements différentiels autour des radiers.
- Dans les cas extrêmes de surexploitation, le terrain peut geler. Ses propriétés structurelles sont alors fortement modifiées et les fondations peuvent subir des déformations qui entraînent leur rupture.
- Enfin, dans le cas des systèmes ouverts, on peut craindre des impacts liés à l'exploitation de l'eau similaires aux interactions espace-eau.

4.2.4 Interactions espace-géomatériaux

Lors des constructions souterraines, les matériaux d'excavation doivent être gérés, par revalorisation (matériaux de construction ou remblais) ou par leur mise en décharge⁸ (après un éventuel traitement).

Les conditions géologiques et l'éventuelle présence de polluants dictent les conditions de cette gestion. Si le matériau peut être facilement réinséré dans le métabolisme de la ville, on peut considérer cette interaction comme synergétique. Au contraire si les coûts font peser une forte contrainte sur le projet ou sur l'environnement (par exemple en raison de la nécessité de mise en décharge), il s'agit d'un conflit.

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.

⁸ Dans ce travail, le terme décharge est utilisé indifféremment pour décrire les dépôts définitifs, les remises en culture et les décharges.

4.2.5 Interactions eau souterraine-géothermie

L'exploitation de l'eau souterraine peut entrer en conflit avec celle de la géothermie si la modification des conditions hydrogéologique entraîne de fortes modifications des

conditions géothermiques. C'est en particulier le cas si les terrains sont désaturés, les terrains saturés en eau étant thermiquement beaucoup plus conductifs que les terrains secs.

L'exploitation de l'énergie géothermique peut avoir des conséquences importantes sur les eaux souterraines (figure 9).

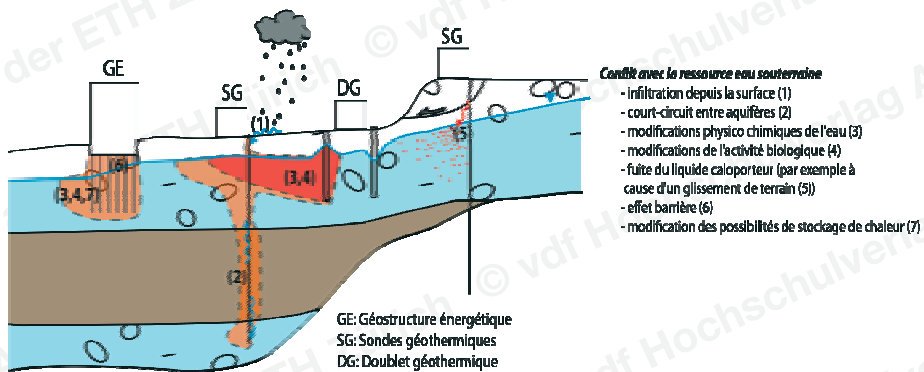


Figure 9 - Impacts de l'usage de la géothermie sur les eaux souterraines
(figure : David Bréthaut, GEOLEP)

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 :

- Lors d'une rupture, les systèmes fermés peuvent 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 a priori plus dommageable que le refroidissement. Il conduit à un dépôt de tuf dans les pores de l'aquifère par précipitation des carbonates et des désagréments techniques importants. Ces effets restent encore peu documentés.

4.2.6 Interactions eau souterraine-géomatériaux

L'exploitation des géomatériaux en milieu urbain dépend généralement de celle de l'espace. Cependant, il peut arriver que des carrières ou gravières préexistent 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.

4.2.7 Interactions entre les usages 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.

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.

4.2.8 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).

4.2.9 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. Par ailleurs, en dehors de l'interaction entre les ouvrages, une surexploitation générale du flux renouvelable de chaleur est possible.

4.3 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.

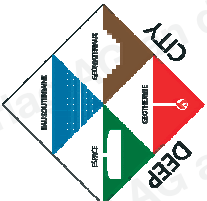
La figure 10 ci-après en présente la synthèse. Elles ont été illustrées par de nombreux cas issus de la littérature scientifique et technique. 41 types d'interactions (35 conflits et 6 synergies) ont été identifiés et documentés. Certaines peuvent être gérées par des choix de dimensionnement à l'échelle 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.

AGENT IMPACTANT		Espace	Eau Souterraine	Géothermie	Géomatériaux
	Espace	<ul style="list-style-type: none"> -Conflit d'espace -Subsidence +Mise en réseau 	<ul style="list-style-type: none"> -Concurrence hydrogéologique -Effet barrage -Pollution des eaux¹ -Court-circuits entre aquifères +Captages dans les ouvrages souterrains 	<ul style="list-style-type: none"> +Géostructures énergétiques +Valorisation thermique des flux techniques 	<ul style="list-style-type: none"> -Élimination des matériaux d'excavation +Valorisation des géomatériaux
	Eau Souterraine	<ul style="list-style-type: none"> -Infiltration dans les ouvrages -Poussée d'archimède -Subsidence et soulèvement -Corrosion et détérioration des ouvrages 	<ul style="list-style-type: none"> -Concurrence hydrogéologique 	<ul style="list-style-type: none"> -Desaturation des terrains 	
	Géothermie	<ul style="list-style-type: none"> -Conflit d'espace -Modifications thermo-mécaniques -Gel du terrain -Impact des prélèvements 	<ul style="list-style-type: none"> -Concurrence hydrogéologique -Effet barrage -Pollution des eaux¹ -Modifications de l'activité biologique -Modification des paramètres physico-chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> -Interaction des plumes de froid ou de chaud -Surexploitation du flux thermique 	
	Géomatériaux	<ul style="list-style-type: none"> +Coordination extractions-constructions 	<ul style="list-style-type: none"> -Modifications du bilan hydrogéologique -Effet barrage -Court-circuits entre aquifères -Pollution des eaux¹ 		

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

Figure 10 - Synthèse des interactions entre les usages du sous-sol urbain

Les signes + indiquent les synergies d'usage, les signes – les conflits. L'agent impacté désigne l'usage qui est modifié par les effets d'un autre usage: l'agent impactant

Une intensification de l'usage du sous-sol passe par des facteurs d'acceptation de ses spécificités tant sociologiques qu'économiques. Aussi, afin d'appréhender ces paramètres, plusieurs enquêtes sociologiques ont été menées pour voir comment le sous-sol est perçu par les acteurs amenés à le fréquenter ou à le promouvoir. D'autre part, une étude économique a été conduite pour comprendre les différences de coûts entre la valorisation de l'espace de surface et de l'espace souterrain. Une étude analytique a été réalisée sur un bâtiment type. Si elle ne permet pas de quantifier l'ensemble des situations d'usage que l'on peut rencontrer, elle permet toutefois de mieux comprendre quels sont les facteurs spécifiques qui différencient les deux options de construction.

5.1 Perceptions, usages et formes de l'espace souterrain

Les représentations associées à l'espace souterrain sont la plupart du temps négatives. Pourtant, si le sous-sol repousse et effraie, il ne laisse pas insensible et fascine. On peut dès lors s'interroger sur ses usages et les perceptions qu'en ont ses usagers. Comment perçoit-on les espaces souterrains ? Quels sentiments génèrent-ils ? Pour traiter ces questions, une méthodologie scientifique a été élaborée. Elle s'appuie sur une distinction entre les espaces de type flux (ouvrage de passage) et ceux de type lieux (ouvrage de destination). Elle distingue également trois thèmes d'étude : la perception, l'usage et les formes de l'espace souterrain. Trois enquêtes ont été réalisées :

- une enquête auprès des abonnés de la fondation des parkings à Genève,
- une analyse de la perception des auditoires accueillant des étudiants,
- une étude auprès de personnes ayant la phobie des souterrains.

5.1.1 La perception des ouvrages de passage : résultats de l'enquête menée auprès des abonnés de la fondation des parkings à Genève

Cette première enquête repose sur un échantillon de près de 1'000 personnes dont près des deux tiers fréquentent régulièrement des parkings souterrains. Ces personnes ne constituent pas un échantillon caractéristique de la population dans son ensemble. Les différentes surreprésentations amènent à constituer un échantillon plutôt marqué par des automobilistes actifs vivant dans l'ensemble de l'agglomération franco-genevoise.

Les résultats de cette enquête apportent des éléments sur la perception du souterrain. Il en ressort notamment que le souterrain est plutôt perçu de manière négative. Il est clairement identifié comme laid et sombre. Les personnes ayant répondu à l'enquête fréquentent régulièrement cet espace. Le sentiment de peur n'est donc pas exprimé de manière massive. Toutefois, quand il est effectif, il est plus lié aux aptitudes et caractéristiques physiologiques des personnes qu'aux critères de perception de cet espace. En effet, l'expression de sentiment de peur varie plus en fonction de critères tels

que le sexe et la claustrophobie, que la beauté, le bruit et la propreté des espaces souterrains.

L'enquête révèle également des enseignements en lien avec les usages des espaces souterrains. Ainsi quand on demande aux personnes interrogées quels types d'ouvrages leur paraissent les plus susceptibles d'être transférés en sous-sol, il apparaît que les lieux dont la densité humaine est la plus faible sont privilégiés (figure 11)

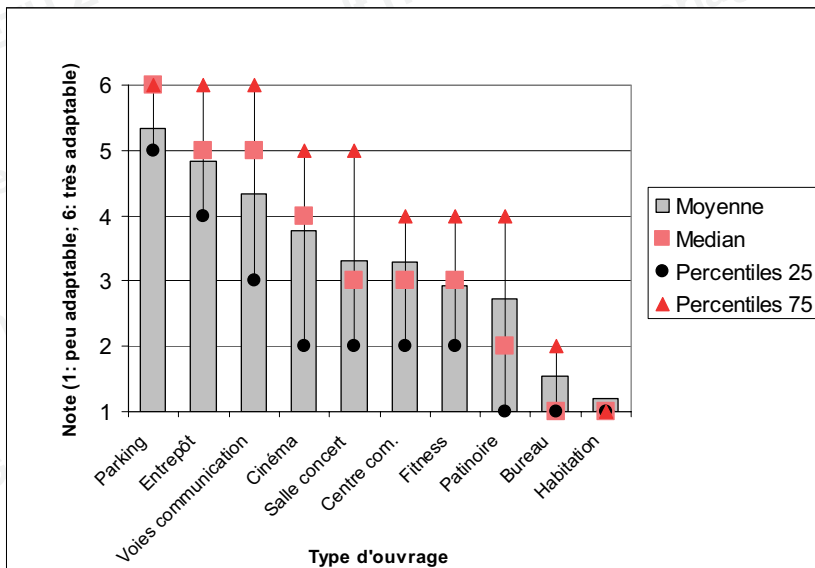


Figure 11 - Perception de la pertinence à réaliser différents ouvrages en souterrain

Ensuite, les formes des parkings souterrains sont analysées. L'accessibilité, les liens avec les transports publics et la situation sont jugés plus importants que le type et la convivialité des parkings.

5.1.2 La perception des ouvrages de destination : résultats de l'enquête menée auprès d'étudiants fréquentant des auditorios souterrains

Environ 800 questionnaires ont été remplis par des étudiants fréquentant des auditorios souterrains (64 %), borgnes (10 %), ou avec des fenêtres (26 %). Comme pour l'enquête menée sur les parkings genevois, une série d'adjectifs dichotomiques qualifiant les parkings a été proposée dans un questionnaire. Cette méthode fait apparaître que l'espace souterrain est perçu comme inconfortable (laid, sombre et sale : figure 12). Il est toutefois également envisagé comme un lieu refuge. Le sentiment de peur liée au souterrain est relativement faible. Quand on interroge les usagers de ces espaces sur le transfert possible de fonction en souterrain, ils privilégient les lieux de stockage, puis ceux de communication. L'analyse des formes du souterrain montre que le facteur beauté est la variable la plus importante dans la perception du souterrain par ce type

d'usagers. Enfin, les auditorios borgnes ou en souterrains sont jugés moins lumineux, moins propres et moins beaux que celui doté de fenêtres.

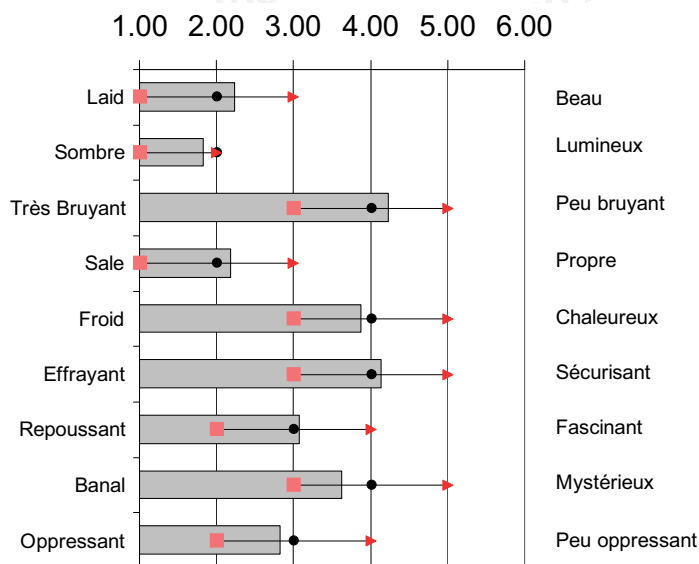


Figure 12 - Perception de l'espace souterrain

Questions dichotomiques "Pour vous le souterrain est plutôt ..." sur une échelle de 1 à 6

5.1.3 La phobie du souterrain : résultats de l'enquête menée auprès d'étudiants fréquentant des auditorios souterrains

Afin de mieux comprendre la peur que certaines personnes ont des milieux souterrains, des interviews approfondies ont été réalisées auprès de personnes présentant cette caractéristique. Ces travaux font apparaître très clairement la claustrophobie et la peur de l'agression comme des causes.

5.1.3.1 La claustrophobie

La claustrophobie se caractérise par un sentiment d'oppression, de manque d'air, voire par des bouffées de chaleur, des picotements ou des vertiges.

Pour l'expliquer, les qualités architecturales ont une grande importance. Le volume de l'espace, la hauteur des plafonds, et les choix des matériaux sont déterminants. La lumière et l'air sont d'autres aspects importants : une lumière abondante et si possible naturelle est plus appréciée. Un puits de lumière a deux autres avantages : il donne l'impression d'avoir une issue et il peut amener de l'air naturel, nettement plus apprécié que l'air ventilé. Par ailleurs, la visibilité et le nombre de sorties sont très importants. Le lieu doit donc être bien balisé. Étonnamment, la profondeur est un sujet qui divise. Pour certains, le fait d'être en souterrain est oppressant que ce soit au premier niveau de

sous-sol ou au cinquième, alors que d'autres préféreront être le plus près possible de la surface afin de pouvoir en sortir le plus vite possible en cas de crise d'angoisse.

5.1.3.2 La peur de l'agression

Cette peur est liée principalement à deux éléments. La première est l'image d'un lieu dangereux. La seconde est le fait d'être comme une proie piégée, à l'abri des regards. Dans ce cas, les qualités architecturales rendent les lieux plus rassurants. En fait, les principaux efforts devraient surtout se porter sur les aspects sécuritaires. Des caméras de surveillance seules ne suffisent pas et peuvent même être un signe de dangerosité des lieux. La présence de personnes est un des points clés pour rassurer. Le type de population est aussi un facteur important : des familles et des couples sont nettement plus rassurants que des hommes seuls. Une foule trop dense peut également être perçue comme oppressante. Mais de manière générale, des lieux comme un supermarché souterrain ne provoquent pas de sentiment de peur. Dans les lieux à faible densité humaine, comme les parkings, la présence d'au moins un gardien rassure. Si celui-ci peut vérifier ce qu'il se passe sur des écrans, c'est encore mieux. La meilleure solution consisterait en fait à avoir un deuxième gardien qui effectue des rondes ou qui accompagne les personnes angoissées jusqu'à leur véhicule. Les aspects liés à la luminosité sont particulièrement importants. Une orientation de qualité (visibilité des sorties, fléchage des itinéraires, etc.) rassure également.

5.1.4 Éléments de synthèse sur la perception du souterrain

Un lien entre la peur du souterrain, le genre et la claustrophobie existe. Il permet de définir des populations moins susceptibles de se rendre en souterrain et auxquelles il faut prêter plus d'attention lors de la conception des milieux souterrains. L'image du souterrain est globalement celle d'un milieu laid, sombre et sale. Toutefois, le nombre de personnes ayant peur du souterrain n'est pas rédhibitoire et laisse présager un développement du souterrain plus important. Afin de contrer cette image plutôt négative, il s'agira de développer des formes bâties adéquates. L'enquête qualitative révèle que les personnes claustrophobes et celles ayant peur de se faire agresser ont l'impression d'être prises au piège en souterrain. Cette impression est difficile à faire évoluer et ces personnes privilégieront toujours des stratégies d'évitement du sous-sol.

Par contre, il est possible de rendre leur séjour en souterrain plus agréable en veillant à plusieurs aspects : le nombre de sorties, l'orientation générale aisée, la générosité et la clarté des espaces

Cette enquête suggère également que les usages les mieux acceptés par la population pour un développement souterrain sont les ouvrages à faible présence humaine (parking, entrepôt et voies de communication). Il s'agit également des lieux que le public a plus l'habitude de rencontrer en souterrain. Les espaces borgnes de surface (cinéma, centre commercial ou salle de concert) révèlent un certain potentiel.

La comparaison des ouvrages de type lieu et de type flux révèle des différences. En effet, dans les ouvrages de types lieu, la luminosité et le type (surface/souterrain)

influencent l'appréciation du lieu. Les personnes étant plus longtemps dans les lieux ont probablement plus le temps d'apprécier ces aspects et leur confort. Dans un ouvrage de type flux, ces variables ont moins d'importance, car les personnes n'y séjournent qu'un court instant. Dans les deux cas, les impressions générales (beauté et propreté) sont importantes.

5.2 Spécificités économiques et énergétiques de l'espace souterrain

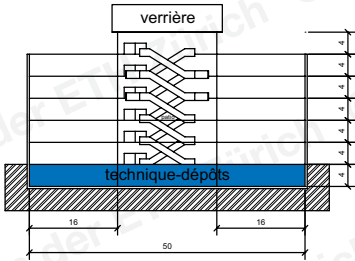
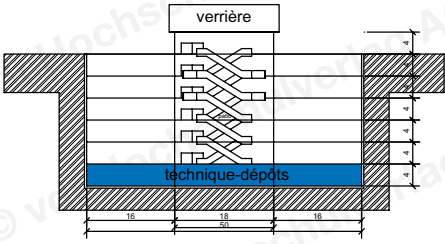
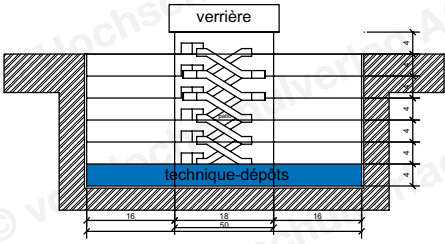

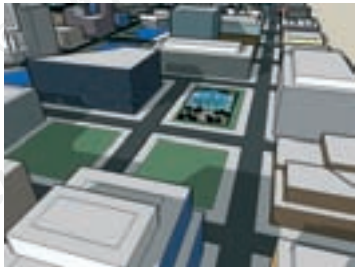
Les enjeux économiques de la construction souterraine apparaissent comme un levier important pour une intensification de l'usage du sous-sol. En effet, construire en souterrain n'est pas tant une question de faisabilité technique (les techniques de construction ayant fortement évolué au cours du 20^e siècle), mais plus une question de coût. La construction en surface est à priori plus simple techniquement, financièrement et administrativement (Edelenbos et al., 1998). Aussi, un des objectifs de ce projet a été d'évaluer à l'aide d'une étude de cas, quelles pouvaient être les différences de coûts entre une solution de surface et une solution de sous-sol. Partant de l'idée qu'une approche uniquement basée sur les coûts de construction est incomplète, notre étude de cas intègre un volet d'évaluation énergétique, les coûts de chauffages, climatisation, etc. pouvant jouer un rôle important dans l'ensemble des coûts sur le cycle de vie d'un ouvrage. Seules les principales conclusions de ces études sont présentées dans le présent document. L'étude énergétique complète se trouve dans Poux (2008), l'étude économique dans (Maire, 2010 [à paraître]).

5.2.1 Étude de cas

Notre analyse porte sur un bâtiment commercial⁹ de 6 étages ayant une emprise au sol de 30*50 m. Le choix d'un bâtiment commercial est en partie lié au fait que, ces ouvrages ne bénéficiant généralement pas de lumière naturelle, ce sont de bons candidats pour un transfert en souterrain. Les caractéristiques architecturales de ce bâtiment sont telles qu'il peut être réalisé en sous-sol et en surface avec des caractéristiques sensiblement identiques. Pour la variante enterrée, deux contextes géologiques ont été considérés : un contexte « difficile » (type moraine de fond saturée) avec une variante de construction en parois moulées, un contexte « facile » (type molasse). Sur le plan énergétique, il a été considéré que le bâtiment de surface correspondait à un bâtiment labellisé Minergie®. Les trois variantes sont présentées dans le tableau 3. Une différence importante entre les variantes enterrées et la variante de surface est que seule cette dernière nécessite un matériau de couverture en façade. Il a été choisi de réaliser un choix de matériaux relativement simple pour que les différences de coûts entre les différentes variantes ne soient pas « écrasées » par les choix architecturaux. Pour les trois variantes de bâtiments, les calculs de génie civil ont été réalisés par le bureau d'ingénieur Emch+Berger SA.

⁹ Ce bâtiment n'est pas construit. Il a été dessiné spécifiquement pour cette étude, avec comme objectif d'être réalisable facilement aussi bien en surface qu'en souterrain.

Tableau 4 - Bâtiment commercial : trois variantes

Variante 1	Variante 2	Variante 3
Surface	Souterrain	Souterrain
	Géologie « difficile »	Géologie « facile »
	Parois moulées	Parois clouées
		
		

5.2.2 Coûts de construction

Les coûts de construction des trois variantes ont été calculés par l'Institut Économique de la Construction (IEC SA). La méthode utilisée pour l'estimation est la méthode des codes des frais par éléments (CFE) avec une marge d'erreur de 10 % (tableau 5).

À la construction, les deux variantes enterrées sont plus onéreuses que la variante de surface. Cette dernière coûterait 30,5 mios CHF, contre 37,6 mios CHF pour la variante 2 et 33,4 mios CHF pour la variante 3 ; soit un surcoût de 10 à 23 % suivant le contexte géologique. Par ailleurs, l'analyse des coûts en macroéléments traduit les différences entre bâtiments souterrains et de surface, c'est-à-dire que l'essentiel des surcoûts est lié aux travaux préparatoires (qui comprennent la réalisation des blindages de fouilles) et aux travaux de fondation, alors que les travaux liés aux parois (dont les choix architecturaux pour les matériaux de façade) et le gros œuvre intérieur sont légèrement moins chers. Pour ce dernier, la différence est expliquée par le plus faible coût d'isolation.

Enfin, il est intéressant de noter que selon les estimations de l'ingénieur, le temps de réalisation de chantier est sensiblement plus court en surface (50 semaines) qu'en souterrain (74 semaines pour la variante 2, 70 semaines pour la variante 3).

**Tableau 5 - Analyse des coûts de construction par macroéléments
(estimations IEC SA, en CHF)**

Macroélément	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Travaux préparatoires	500'000	5'140'000	2'040'000
Fondations	1'000'000	2'780'000	2'780'000
Parois extérieures	2'675'000	1'940'000	1'940'000
Toitures	2'000'000	2'000'000	2'000'000
Gros œuvre intérieur	3'022'000	2'610'000	2'610'000
Installations	5'740'000	5'490'000	5'490'000
Aménagement intérieur	4'900'000	4'900'000	4'900'000
Frais secondaires	1'000'000	1'250'000	1'090'000
Honoraires d'ouvrage	4'750'000	4'900'000	4'900'000
Honoraires autres	125'000	800'000	500'000
Comptes d'attente	2'600'000	3'100'000	2'825'000
TVA	2'152'000	2'653'000	2'362'000
Total	30'464'000	37'563'000	33'437'000

5.2.3 Consommation énergétique et analyse de cycle de vie

Les coûts énergétiques des trois bâtiments ont été estimés par simulation à l'aide du logiciel LESOSAI¹⁰. Les résultats en terme de consommation des trois variantes sont présentés dans le tableau 6. On observe que les deux tiers de la consommation énergétique sont liés à l'éclairage et sont similaires dans les trois variantes. Toutefois, les variantes enterrées sont plus efficaces en terme d'isolation, si bien que leur consommation totale est légèrement inférieure. Ainsi, les solutions enterrées sont

¹⁰ LESOSAI est un programme de calculs des bilans thermiques et de certification de bâtiments comportant une ou plusieurs zones chauffées ou refroidies. Il permet d'effectuer le calcul des impacts environnementaux (écobilan) de l'énergie consommée en tenant compte des vecteurs énergétiques utilisés, mais également en considérant les matériaux de construction du bâtiment. Ce calcul est basé sur une approche cycle de vie d'un bâtiment.

comparables en consommation (et meilleure sur le plan thermique) à un bâtiment Minergie®.

Tableau 6 - Consommation énergétique des trois variantes de bâtiment (MJ/m²/an)

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Éclairage	192.3	192.6	192.6
Ventilation	20.5	20.5	20.5
Appareils	22.5	22.5	22.5
Besoins de chauffage	47	25.7	29.7
Besoins de refroidissement	15.9	12.3	9.5
Auxiliaires	1	1	1
Total	299.2	274.6	275.8

Il est également intéressant d'analyser le coût énergétique des différentes variantes sur l'ensemble de leur cycle de vie, c'est-à-dire en tenant compte non seulement des phases d'utilisation, mais aussi de construction et de démantèlement. Pour cette dernière phase, les résultats sont à interpréter avec prudence. En effet, l'analyse est réalisée sur la base d'hypothèses standard dans la construction, qui ne sont pas forcément valides pour un bâtiment souterrain (l'hypothèse d'un démantèlement complet de l'ouvrage n'étant à priori pas très réaliste). Le cycle de vie est analysé sur une période de 60 ans et les résultats sont exprimés en énergie primaire, c'est-à-dire en tenant compte de l'ensemble du cycle de vie de production de l'agent énergétique (ceci intègre donc les « pertes » de production, transport, utilisation, etc.). La figure 13 présente les résultats de cette évaluation. L'essentiel du coût énergétique est lié à la phase d'utilisation. Les trois variantes sont proches, ce qui n'est pas étonnant en regard de leurs performances énergétiques (tableau 6). En phase de construction, les bâtiments enterrés consomment plus d'énergie primaire, en particulier la variante 2. Ceci est lié essentiellement aux quantités de matériaux (en particulier de béton) plus importants dans la solution technique des parois moulées par rapport aux autres options. La phase de démantèlement pèse peu dans le bilan global. Finalement, sur l'ensemble du cycle de vie, les trois variantes sont comparables (en chiffres absolus, les deux solutions enterrées sont légèrement meilleures). Ainsi, on observe qu'écologiquement, en terme de consommation énergétique totale, les bâtiments souterrains sont comparables à un bâtiment de surface de type bâtiment Minergie®.

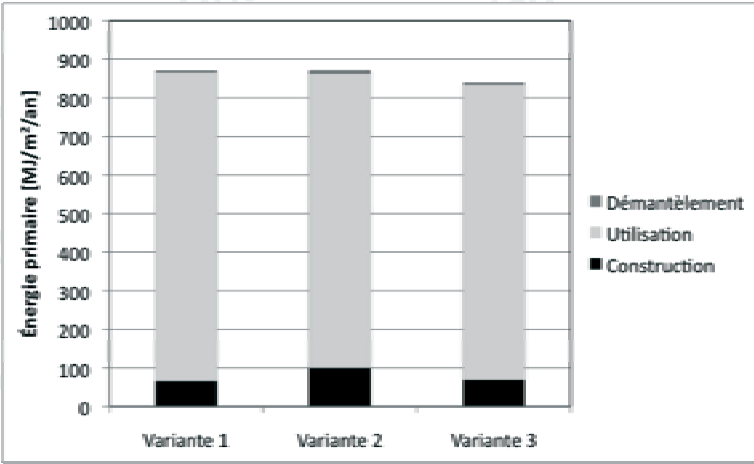


Figure 13 - Bilan énergétique des trois variantes sur l'ensemble du cycle de vie

5.2.4 Bilan des coûts sur le cycle de vie de l'ouvrage

La différence de coûts de construction peut paraître un frein important à la construction souterraine. En effet, pour notre cas d'étude, elle représente un surcoût allant jusqu'à 23 % pour le bâtiment souterrain. Mais le coût d'un bâtiment ne se limite pas à son coût de construction. Il faut tenir compte au moins encore de l'acquisition du terrain et de sa consommation énergétique au cours de son utilisation. Le tableau 7 montre que la différence de coûts entre la variante 1 et la variante 2 se réduit à 14 %, lorsque ces autres coûts sont pris en compte.

Tableau 7 - Bilan des coûts des trois variantes sur le cycle de vie des bâtiments

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 2 / Variante 1	Variante 3 / Variante 1
Coûts construction	30'464'000	37'563'000	33'437'000	1,23	1,10
Coûts énergie sur 50 ans	2'988'200	2852'400	2'866'500	0,95	0,96
Coûts du terrain	15'465'000	15'465'000	15'465'000	1	1
Coûts totaux	48'917'200	55'880'400	51'768'000	1,14	1,06

Pour être complet, il faudrait également prendre en compte les coûts d'entretien de ces trois variantes de bâtiments. Malheureusement, l'étude Deep City n'a pas pu chiffrer ces coûts pour le bâtiment en question. Néanmoins selon Sterling et Godard (2001), les infrastructures souterraines ont une plus grande longévité, étant donné qu'elles sont moins exposées aux agents de détérioration. La différence de coûts entre les variantes devrait donc en être encore plus réduite.

Par ailleurs, la construction souterraine offre des opportunités de densification qui permettent d'augmenter la rentabilité du foncier. En effet, il semble tout à fait possible pour revenir au cas de notre bâtiment commercial de construire d'autres étages en surface au-dessus du bâtiment souterrain (pour un usage commercial ou une autre affectation). Une telle situation permet ainsi de réduire le coût du foncier par surface de plancher de bâtiment. Enfin, si la surface au-dessus d'un bâtiment est laissée libre pour des usages récréatifs (espace vert, espace de détente, etc.), une plus-value sociale est dégagée de la solution de construction souterraine. Des exemples et des éléments complémentaires d'analyse sur l'évaluation des coûts sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage souterrain sont présentés dans Maire (2010 [à paraître]).

5.3 Synthèse du chapitre

Les solutions de développement en souterrain sont sujettes à de nombreux a priori qui sont souvent avancés comme des freins à leur réalisation. Sur le plan sociologique, le sous-sol jouit d'une image généralement moins bonne que l'espace de surface. On peut toutefois noter que ses usages les plus fréquents (transport, parking, stockage) sont bien acceptés par la population. Globalement, le sous-sol est associé par les personnes interrogées à des espaces de faible qualité architecturale. Aussi, la gestion des espaces et de la lumière en particulier apparaissent comme des leviers possibles à une meilleure appréciation des constructions souterraines. Tous les usages ne sont pas acceptés de la même manière par les sondés : les espaces de flux sont globalement plus faciles à transférer en sous-sol alors qu'il existe plus de réticences vis-à-vis des espaces de destination. Ceux dans lesquels la population est appelée à rester longtemps (en particulier les bureaux et le logement) ne devraient pas être construits sous terre. Seule une faible partie de la population ressent une réelle phobie vis-à-vis des ouvrages souterrains. Cette phobie s'explique principalement par des facteurs liés à la claustrophobie et à la sécurité vis-à-vis des agressions.

Économiquement, construire en souterrain est généralement plus cher qu'en surface. En revanche, les solutions souterraines sont intéressantes sur le plan de la consommation énergétique et présentent des performances écologiques comparables à celle de bâtiment de surface de bonne qualité. Ainsi, l'espace souterrain présente un certain nombre de qualités intrinsèques en regard de la physique du bâtiment. Enfin, la construction souterraine offre des opportunités pour construire des espaces urbains denses de qualité ou pour optimiser la valorisation du foncier.

L'analyse des modes de développement passé du sous-sol (chapitre 3), l'importance des interactions entre ses usages (en particulier des conflits, chapitre 4), sa relativement faible attractivité sociale et la méconnaissance de son économie (chapitre 5) traduisent bien le fait que le sous-sol est quelque part un « parent pauvre » du développement territorial. Malgré cela, il n'en est pas totalement absent. La dépendance des villes vis-à-vis de certaines ressources (nécessité de s'approvisionner en eau, impérativité de développer des transports efficaces dans un tissu bâti dense, etc.) a rendu nécessaire le développement de mesures régulatrices (même si elles s'inscrivent dans un cadre de développement sectoriel). Aussi, avant d'aborder la place du sous-sol dans les processus d'aménagement, il semble important de pouvoir dresser un panorama de ces mesures. Pour ce faire, une analyse du contexte suisse a été portée autour de deux axes principaux : la propriété des ressources et la régulation des interactions entre leurs usages.

6.1 Propriété des ressources du sous-sol urbain

Il n'existe pas de loi propre aux ressources souterraines, ni de base constitutionnelle. Il est donc nécessaire de chercher les régimes régissant le sous-sol dans diverses lois, aussi bien à l'échelon cantonal que fédéral. Au niveau fédéral, on peut citer des lois telles que celles relevant de l'aménagement du territoire, de la protection des eaux souterraines, du Code civil. Alors qu'au niveau cantonal, on peut les trouver dans les domaines de la police des constructions, du régal des mines ou dans la législation sur le domaine public. On peut également noter que certains traités internationaux concernent le sous-sol, ceci principalement dans le domaine de la protection des sols et des lois sur les eaux souterraines, utiles par exemple lorsqu'une nappe phréatique s'étend sur deux pays.

6.1.1 Propriété de l'espace souterrain

En préambule, on peut noter que l'espace souterrain est mal défini par le législateur. Il existe un amalgame important entre les termes *sol* et *sous-sol* ainsi que leur traduction allemande *boden* et *untergrund* qui sont utilisés indifféremment pour le sol pédologique et le sous-sol géologique¹¹. Par ailleurs, les traductions d'une langue officielle vers l'autre ne sont pas non plus univoques.

¹¹ Il est intéressant de noter que même parmi les techniciens, ces termes ne sont pas toujours définis de manière univoque. Ainsi pour le géologue, le sol se réfère à l'horizon pédologique, le « sol vivant », c'est-à-dire l'horizon supérieur cultivable et le sous-sol se réfère à tous les horizons plus profonds (c'est cette définition qui est retenue dans le présent travail) ; alors que pour le géotechnicien, le terme sol englobe l'ensemble des terrains qui ne sont pas rocheux (par exemple, les horizons graveleux, sableux ou argileux).

La propriété du sous-sol est définie par l'art.677 du Code civil :

« al.1 : La propriété du sol emporte celle du dessus et du dessous, dans toute la hauteur et la profondeur utile à son exercice ; al.2 : Elle comprend, sous réserve de restrictions légales, les constructions, les plantations et les sources. »

Cette définition diffère de la conception romaine de la propriété foncière, « *cujus est solum, ejus est usque ad sidera, usque ad inferos* » ; dans laquelle la propriété s'étend du centre de la Terre au ciel sans limites verticales. Cette conception a été reprise pour définir de nombreux droits fonciers occidentaux. L'auteur du texte suisse, Eugène Hubert, justifie ainsi le choix de limiter la propriété à une « profondeur utile » : « *Des expropriations de terrain pour le percement de tunnels à quelques centaines de mètres de profondeur ne peuvent s'étendre à toute la hauteur, jusqu'au sommet de la montagne, et ce n'est pas le seul cas dans lequel la solution admise rendra des services* ».

Selon Knapp (1987), le sous-sol peut ainsi être défini en deux couches principales :

- La couche susceptible de propriété. « elle comprend trois strates : la strate construite ou utilisée selon le régime de la zone ou susceptible de l'être ; la strate des fondations et autres constructions structurelles permettant la réalisation de la première strate ; la strate correspondant à l'exercice du droit d'interdiction ou de prévention envers les actes de tous les tiers. » La troisième strate permet d'avoir une zone de tampon évitant les éventuelles nuisances (tassement, vibrations dans le cas d'un tunnel ferroviaire, etc.) qu'une construction sous la propriété pourrait causer.
- La couche hors propriété. C'est le canton qui détient la souveraineté de ce volume du sous-sol (art. 664 du Code civil et ATF 119 Ia 390).

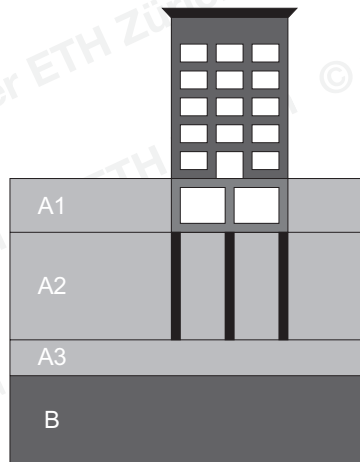


Figure 14 - Division de la propriété du sous-sol (adapté de : Knapp, 1987)

La couche susceptible de propriété (A) et ses 3 strates: Construite (A1), fondations (A2), prévention (A3); la couche hors propriété (B)

Si la définition suisse de la propriété foncière permet d'éviter certains conflits d'intérêts, la notion de « profondeur utile » reste toutefois bien peu précise. Dans la pratique, on peut observer qu'à plus de 5 m de profondeur, les maîtres d'ouvrages souterrains n'entreprennent pas de démarches particulières d'expropriation. Notons également la réponse du Conseil Fédéral au Conseiller national Rémy Scheurer : « *Sur la base de l'ATF 122 II 427, on peut conclure que la propriété foncière s'étend jusqu'à une profondeur de 7 à 8 mètres au moins.* ». Toutefois, l'évolution technologique (par exemple la réalisation de sous-sol et d'ouvrages souterrains plus profonds ou dans des terrains difficiles faisant appel à des fondations ou des ancrages profonds) et le développement de certains usages nouveaux du sous-sol, en particulier les captages géothermiques, changent la perception de cette « profondeur utile ».

6.1.2 Propriété des géomatériaux

En droit suisse, la propriété des géomatériaux doit être distinguée selon qu'il s'agit :

- de matériaux d'excavation résultant de travaux de construction,
- de matériaux exploités en tant que tels indépendamment de constructions.

C'est essentiellement le premier cas qui se présente en milieu urbain. Les matériaux sont alors considérés comme déchets au sens de l'OTD (Ordonnance sur le Traitement des Déchets). Ils appartiennent alors au maître de l'ouvrage qui est tenu d'en assurer la valorisation ou le stockage selon les plans de gestion cantonaux et les directives fédérales (en particulier : OFEFP, 1999).

Dans le deuxième cas de figure, les possibilités d'exploitation et la propriété des matériaux minéraux sont régulées par les législations cantonales, en particulier les régals des mines et les lois sur les carrières et gravières.

6.1.3 Propriété de l'eau souterraine

L'article 73 de la Constitution répartit les pouvoirs sur les ressources en eau entre la Confédération et les cantons. La Confédération assure une utilisation rationnelle de l'eau (p.ex. : art. 30-35 de la Loi fédérale sur la protection des eaux, LEaux) et veille à sa protection en fixant les principes applicables aux interventions humaines dans le cycle hydrologique (p. ex. : annexe 1, 2, 4 de l'Ordonnance sur la protection des eaux, OEaux). Les cantons ont le pouvoir de disposer de l'eau dans le cadre légiféré par la Confédération. Le Code civil spécifie notamment le régime auquel sont soumises les sources, notamment l'art. 667 al.2 (source comprise dans la propriété) et l'art. 704 : « *Al.1: Les sources sont une partie intégrante du fonds et la propriété n'en peut être acquise qu'avec celle du sol où elles jaillissent. Al.2 : Le droit à des sources jaillissant sur fonds d'autrui est constitué en servitude par son inscription au registre foncier. Al.3 : Les eaux souterraines sont assimilées aux sources.* »

Ces deux articles laissent à penser que les sources et les eaux souterraines sont liées au bien-fonds si elles se trouvent à une profondeur correspondant aux critères de l'étendue en profondeur de la propriété (art. 667 CC). Le tribunal fédéral a même tranché dans ce sens à deux reprises (ATF 43 II 152, ATF 93 II 170). Mais la doctrine a critiqué cette jurisprudence et a proposé de distinguer les sources privées des sources qui forment dès le départ un cours d'eau. Elle propose ainsi d'inclure les sources de ruisseau au cours

d'eau lui-même plutôt qu'au bien-fonds (Liver, 1977, Haab, 1977, Guisan, 1942, Deschenaux et Jaggi, 1959).

Dans ses décisions les plus récentes, le tribunal fédéral a suivi cette opinion de la doctrine (ATF 97 II 333, ATF 106 II 311, ATF 122 III 49), ceci afin de préserver des masses d'eau pouvant être utilisées par la collectivité. Dans ce cas, c'est l'art. 664 CC qui s'applique. Il revient donc aux cantons de déterminer ce qu'est un cours d'eau. Les cantons édictent les règles et les critères qui dessinent la limite entre les eaux souterraines du domaine public et du domaine privé

6.1.4 Propriété de la géothermie

Deux doctrines s'affrontent au sujet de la géothermie. La première considère que la géothermie n'étant pas une chose¹², la propriété de droit privé ne peut s'y appliquer, elle doit être soumise au droit public, particulièrement au droit régalien au même titre que le pétrole et le gaz. La seconde estime que, la géothermie étant assimilable à une force de la nature, elle peut être considérée comme appartenant au domaine privé. Elle s'appuie sur l'article 713 du Code civil : *« La propriété mobilière a pour objet les choses qui peuvent se transporter d'un lieu dans un autre, ainsi que les forces naturelles qui sont susceptibles d'appropriation et ne sont pas comprises dans les immeubles. »*

Matthey (1986) souligne que l'exploitation géothermique et l'exploitation minière sont si différentes qu'il n'est pas possible d'étendre le monopole cantonal sur les mines à la géothermie. Il indique qu'*« il est permis de considérer l'exploitation de la chaleur souterraine comme un attribut servant à la pleine utilisation de l'immeuble. Le propriétaire y a un double intérêt. D'une part, elle lui permet de chauffer sa maison. D'autre part, cette utilisation, pour demeurer efficace, doit rester l'apanage du propriétaire. À défaut, la rentabilité de l'installation risque d'être diminuée »*.

Cette deuxième doctrine est la plus communément acceptée. Il est toutefois intéressant de noter qu'elle s'applique essentiellement à la géothermie de faible profondeur. Aussi, les droits régalien les plus récents (Berne) ont inclus la géothermie profonde dans les monopoles de l'État.

6.1.5 Commentaires sur le régime de propriété

À l'heure actuelle, des conflits nouveaux apparaissent dans l'utilisation des ressources souterraines. Ils trouvent leur origine dans l'évolution des possibilités de maîtrise des ressources par les acteurs des domaines privés et publics. Zufferey (2004) cite un certain nombre d'exemples :

- Les propriétaires privés trouvent un intérêt à utiliser de plus en plus profondément leur sol et ils considèrent cela encore comme une prérogative inhérente à leur droit de propriété ; exemples : les pompes à chaleur qui se multiplient ; ou un vigneron encaveur souhaite installer ses entrepôts en dessous de sa surface de vente.
- Une commune veut exploiter les eaux chaudes qui coulent dans son sol, elle craint que les propriétaires privés perturbent ce projet par leur utilisation de leur parcelle.

¹² Une chose, dans le droit civil suisse, est un objet impersonnel, défini et physique, existant pour lui-même, et qui est humainement maîtrisable.

- Certains gisements traditionnellement trop petits pour être exploités gagnent à nouveau en intérêt pour la fabrication des composants électroniques.
- Les progrès scientifiques en matière de géothermie laissent entrevoir des possibilités prometteuses d'exploiter cette source de chaleur.
- Les grands travaux souterrains actuels en Suisse produisent de gigantesques quantités de matériaux réutilisables et qui ont donc une certaine valeur commerciale ; les collectivités et les entreprises impliquées s'en disputent la propriété.
- La Confédération veut entreprendre des forages à un endroit où elle pense pouvoir installer un dépôt de déchets nucléaires ; la question se pose de savoir quelle procédure doit être suivie, dès lors que le sous-sol ne lui appartient pas.

Étant donné qu'au-delà de la propriété privée, le sous-sol devient du domaine public, les conflits concerneront surtout la limite entre le domaine public et le domaine privé. Zufferey (2004) souligne ce problème et plus précisément les limites que l'État doit se fixer : « *Pour la collectivité, la délimitation défensive et protectrice d'un domaine public devient difficile à justifier dès l'instant où son gérant ne se contente plus d'en être le gardien, mais qu'il se met à en exploiter les richesses matérielles (voire immatérielles), en d'autres termes à se comporter comme un propriétaire privé.* »

Dans ces conditions, les limites de propriété, en particulier de la propriété foncière, telles que définies dans le Code civil peuvent apparaître comme une difficulté à la mise en place de projets destinés à valoriser les richesses du sous-sol. Aussi, certains auteurs (Thorens, 1970, Knapp, 1987) proposent d'objectiver la propriété en sous-sol afin de faciliter l'arbitrage de situations conflictuelles. Une telle objectivation serait basée sur les droits de l'aménagement du territoire, le droit des constructions et le droit civil. Il permettrait « *aux juges appelés à trancher un litige d'appliquer les mêmes règles dans les mêmes zones en fonction des circonstances et des conditions locales. La limite en profondeur de la propriété foncière ne changerait donc pas selon les propriétaires, mais selon ces circonstances et ces conditions.* » (Thorens, 1970). Matthey (1986) propose même qu'une telle objectivation soit réalisée en fonction des possibilités locales d'exploitation de la chaleur du sous-sol.

6.2 Prise en compte des interactions entre les usages des ressources du sous-sol

Malgré la prédominance de l'approche sectorielle dans les développements du sous-sol, plusieurs textes de loi fixent des principes et des conditions qui contribuent à conserver l'intégrité de ce patrimoine ressource. Ce contexte législatif a fait l'objet d'une attention détaillée (voir : Blunier, 2009 chapitre 5.2.2 et annexe C).

6.2.1 Synthèse du cadre législatif

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 (Loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des Eaux) et l'OEaux (Ordonnance du 28 octobre 1998 sur la protection des eaux). Leur mise en application est décrite dans les recommandations de l'OFEV (Office fédéral de l'environnement) (OFEFP, 2004, OFEV, 2009). La mise en œuvre de ces instruments 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. 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 imbriqués, 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, l'autorité définit :

- Les aires d'alimentation Zu : 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 üB : 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 1991¹³.

Les recommandations de l'OFEV précisent les conditions dans lesquelles l'espace souterrain et la géothermie peuvent être exploités à l'intérieur de chacun des instruments.

Par ailleurs, la législation fédérale (en particulier la législation environnementale) fixe un certain nombre de principes et de valeurs cibles qui précisent les conditions d'interactions décrites dans ce chapitre. D'autre part, les normes édictées par les associations professionnelles (en particulier les normes SIA) fixent les standards de qualité pour la construction d'ouvrages souterrains.

6.2.2 Commentaires sur les interactions dans le droit suisse

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

¹³ 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.

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 15 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.

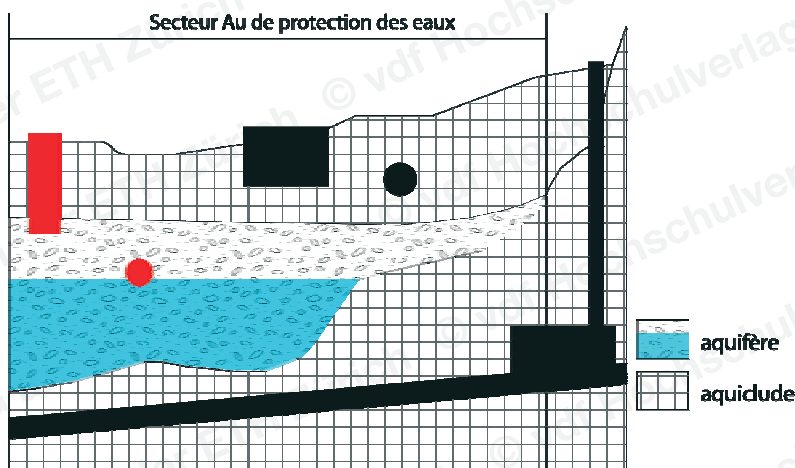


Figure 15 - Insertion d'ouvrages dans un profil géologique contenant une nappe protégée

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

6.3 Synthèse du chapitre

En droit suisse, la définition de la propriété des ressources du sous-sol est définie de manière peu précise. C'est en particulier le cas pour la propriété tréfoncière. Cet état de fait est un choix délibéré du législateur visant à permettre le développement de projets en souterrain en limitant le recours à l'expropriation. Toutefois, dans ce contexte, l'arbitrage entre les intérêts privés et publics n'est pas toujours évident, si bien que certains auteurs proposent une objectivation des limites du domaine privé. Une telle objectivation n'implique pas forcément un changement de législation, mais une plus grande systématique et une plus grande transparence dans la manière d'interpréter le droit (celui qui concerne la propriété et celui qui régle les usages) en fonction du contexte.

Le cadre légal de protection de l'environnement permet globalement une bonne protection des ressources, en particulier celles en eau. Il n'est toutefois pas dénué de lacunes. La prise en compte du caractère volumique du sous-sol est en particulier insuffisante. D'autre part, il est plus adapté à une réflexion de contraintes portées à l'échelle du projet qu'à une réflexion proactive permettant réellement d'anticiper les enjeux de développement et de coordination pour les ressources du sous-sol.

Ainsi, on peut affirmer qu'une régulation plus transparente de la propriété et des usages du sous-sol passe par une meilleure connaissance du contexte géologique et bâti ainsi que par une gestion plus transversale de la mobilisation de l'ensemble de ses ressources.

Chapitre 7 Démarche pour l'aménagement concerté des ressources du sous-sol urbain

Les expériences passées de développement des ressources du sous-sol ainsi que la compréhension du sous-sol comme un système au sein duquel les usages interagissent, traduisent la nécessité d'appréhender la gestion de ces ressources à une échelle qui dépasse celle du projet. Pour prévenir les conflits et favoriser les synergies, il faut développer une réelle vision territoriale qui mette en évidence la « ville souterraine » dans son ensemble. Ce chapitre présente la démarche de mise en application d'une telle vision développée dans le cadre du projet de recherche Deep City. Cette démarche prend racine dans le contexte général du développement territorial, plus particulièrement le développement des politiques menées en Suisse. Aussi, dans un premier temps, les pratiques d'aménagement du territoire sont évaluées ; la place des ressources du sous-sol au sein de ces pratiques est considérée avec attention. Sur la base de cette analyse et des cadrages théoriques et empiriques développés dans les chapitres précédents, une démarche conceptuelle est proposée, puis appliquée. La ville de Genève a servi de terrain pour valider cette nouvelle approche¹⁴.

7.1 Planification, aménagement du territoire souterrain

Pour préserver les ressources naturelles et concilier les différents usages du sous-sol, des démarches de planification du territoire s'imposent. Elles s'appliquent à diverses échelles et développent des outils stratégiques et réglementaires. Quelle est la place du sous-sol dans les politiques d'aménagement du territoire ? Comment celle-ci peut-elle être améliorée ? Les développements qui suivent aborderont successivement les méthodes et outils développés dans les expériences observées par le passé, puis porteront un regard critique sur les outils d'aménagement suisse. Enfin, des pistes d'évolution seront proposées.

7.1.1 Planification du sous-sol dans les expériences étrangères et passées

Les expériences des villes étudiées ont permis d'identifier plusieurs types d'outils et de méthodes de planification du souterrain.

7.1.1.1 *Le paradoxe français*

Les premières expériences modernes d'intervention publique sur le souterrain ont lieu à Paris. En effet, la multiplication des excavations a conduit à la fin du 18^e siècle à la création du service de l'inspection générale des carrières dont le rôle était de créer et d'alimenter un atlas des carrières et de mener des travaux pour la stabilisation des zones à risques. Les actions de ce service ont notamment conduit à la fermeture des carrières

¹⁴ Dans ce document, plusieurs exemples sont tirés de cette étude de cas, mais pour alléger le propos, elle n'a pas été entièrement reproduite de manière systématique. Le lecteur intéressé par plus de détail peut se reporter à Blunier (2009).

parisiennes en 1813. Par la suite, l'encombrement du sous-sol parisien a été largement critiqué et a constitué une contrainte pour le développement urbain. Pour autant, le sous-sol urbain parisien n'a jamais été intégré dans l'urbanisme opérationnel. Il souffre ainsi de deux maux principaux : sa désorganisation et sa méconnaissance (Barles, 1995, Barles et Jardel, 2005). Les outils législatifs mis en place visent à limiter les impacts de la surutilisation des ressources du souterrain. Plus récemment, le 14 janvier 2000, sous l'impulsion de l'association Espace Souterrain, une proposition de loi relative à l'amélioration de la connaissance et de l'aménagement du sous-sol¹⁵ a été présentée. Ce texte visait l'intégration du sous-sol dans le code de l'urbanisme et la création d'un établissement public dédié à la gestion du sous-sol : une agence de valorisation du sous-sol dont les missions auraient porté sur :

- « la promotion, la mise en valeur et l'aménagement durable du sous-sol par des études, actions, ou prestations de service, (...) ; »
- « l'élaboration des outils informatiques de collecte et de diffusion de toute nature relatives au sous-sol à des fins de prévention des risques, d'urbanisme et d'aménagement du territoire ; »
- « de contribuer à l'objectif de gestion rationnelle du sol et du sous-sol défini par l'article L. 110 du code de l'urbanisme et à son application par l'article L. 121-10 du même code relatif aux documents d'urbanisme (...) »

À plusieurs reprises, l'association Espace souterrain a également milité pour l'élaboration de schémas directeurs ou de plans d'urbanisme du sous-sol (Barles, 2006). Elle a en effet montré que le sous-sol français échappait à la planification urbaine valable pour la surface. Pourtant, son développement est incité implicitement par d'autres dispositions réglementaires et par les tendances de l'urbanisation. L'idée avait donc été développée d'intégrer le sous-sol dans la planification urbaine à travers un zonage souterrain à trois dimensions qui puisse déterminer les usages du sous-sol en fonction de sa localisation, mais aussi de sa profondeur.

Au final, malgré le dynamisme des associations professionnelles pour la promotion du sous-sol urbain, la France n'a développé aucun outil d'aménagement spécifique pour gérer le sous-sol. Sa connaissance en reste limitée. La thématique appartient plutôt au domaine des ingénieurs, les urbanistes semblant s'y désintéresser.

7.1.1.2 Montréal : l'intégration du sous-sol dans les opérations d'aménagement et le développement d'outils incitatifs

Il est étonnant d'observer que malgré son importance, la Ville Intérieure montréalaise n'a jamais fait l'objet de planification d'ensemble. Le développement du souterrain s'y est fait par opérations successives. Pour cela, une palette d'outils visant, notamment à encourager le partenariat public-privé a été développée.

Les prémices de la Ville intérieure s'expliquent entre autres par l'importance des propriétés foncières de la Ville. Elles avaient été acquises lors de la création du réseau ferroviaire transcontinental. Par la suite, la Ville a pu développer un ensemble d'opérations en partenariat avec des entreprises privées. Les outils d'aménagement élaborés visent donc le plus souvent à réguler une relation entre la collectivité publique qui promeut des espaces de qualité répondant aux besoins des citoyens, et des intervenants privés dont le but est de maximiser les profits et de tirer le meilleur parti de leurs

¹⁵ <http://www.senat.fr/leg/pp199-160.html> - Consulté le 8 octobre 2008

investissements. Dans ce contexte, le principal outil utilisé pour développer la Ville intérieure a été le bail emphytéotique (équivalent du droit de superficie en Suisse). Il s'agit d'une autorisation d'utilisation à long terme du foncier appartenant à un tiers pour un utilisateur. Dans les contrats de bail, la Ville peut ainsi préciser les clauses d'utilisation et notamment l'utilisation du sous-sol.

Des corridors situés sous les rues et donc appartenant au domaine public ont souvent été loués à des investisseurs privés qui ont ainsi pu développer des couloirs desservant des espaces commerciaux notamment. Inversement, sous les espaces privés, la Ville a négocié des servitudes de passage. De plus, jusqu'en 1992, la superficie des sous-sols n'était pas incluse dans le calcul de la Surface Brute de Plancher (équivalent du CUS Suisse). Ce « bonus de densité » a favorisé le développement de la Ville intérieure en lien direct avec les projets de développement de la surface. Enfin, dans le cadre de projet de grande ampleur, la Ville négocie directement avec les promoteurs pour modifier les dispositions réglementaires sur l'utilisation des sols.

Plusieurs tentatives de planification d'ensemble du développement souterrain ont été menées, mais ont échoué. Dans les années soixante, lors du développement d'une des principales opérations de la Ville souterraine, la place Ville-Marie, l'urbaniste Vincent Ponte avait cherché à formaliser les principes de son intervention dans un plan de développement. Sa proposition n'a pas été ratifiée par les autorités locales. En 1984, un masterplan a été développé par les services municipaux. Il n'a pas été validé officiellement, mais tacitement et partiellement appliqué. En 1992, le premier masterplan régulant l'urbanisation de la totalité de la ville abordait la question du souterrain. Il s'agissait de la mise en œuvre des projets et de la gestion des espaces publics. Plus récemment, en 2003, le développement du Quartier International a fait l'objet d'un plan spécial. Le souterrain y était appréhendé, notamment au sujet de l'utilisation du domaine public pour les couloirs souterrains.

7.1.1.3 Helsinki : amélioration de la connaissance du sous-sol et des dispositifs de planification

Depuis près de 20 ans, les réflexions relatives au développement du souterrain se sont passablement développées en Finlande. Cela a conduit à l'amélioration des outils d'information géographique du sous-sol et à la remise en cause des outils de planification pour une meilleure intégration du souterrain dans les outils existants.

Depuis 1983, la collecte d'informations relatives au sous-sol a été systématisée. Les risques liés aux eaux souterraines ont fait l'objet de travaux approfondis. Ces démarches ont ensuite été complétées par l'élaboration d'une carte des potentiels du soubassement rocheux. Le traitement cartographique permet d'identifier la possibilité d'exploitation du sous-sol pour la construction, en précisant notamment la profondeur et la nature des travaux possibles.

Parallèlement, des réflexions importantes ont été menées sur les outils de planification. Dès 1986, la Ville a adopté un plan d'affectation de l'espace souterrain dans le but de préserver des volumes en sous-sol pour la construction d'ouvrages publics. En 1996, une étude approfondie de la manière de traiter le sous-sol dans la planification a été réalisée. Ses conclusions ont été prises en compte et appliquées. Il a notamment été décidé de :

- mettre en place une procédure d'indemnisation et d'expropriation du sous-sol dans le cas de construction d'ouvrages souterrains. La possibilité de limiter la propriété de manière tridimensionnelle constitue une alternative moins pragmatique à ce principe.
- inclure le souterrain dans les documents de planification territoriale afin de préciser les usages, la profondeur, les impacts et les liens avec la surface des espaces souterrains existants et à développer.

7.1.1.4 Tokyo : contrôle du souterrain profond et tentative de planification

L'exemple tokyoïte est assez riche, car il montre comment une collectivité peut successivement contrôler ou encourager le développement du souterrain. Les principales démarches menées sont :

- les intentions de planification qui visent à faire émerger les secteurs stratégiques de développement du souterrain,
- à y identifier les potentiels de développement,
- à engager les premières réflexions sur le développement du souterrain.

Les autorités publiques japonaises ont également souhaité distinguer le développement du sous-sol superficiel de celui plus profond. Elles souhaitaient ainsi contrôler les constructions dans le souterrain profond afin d'y implanter en priorité des ouvrages d'intérêt public.

7.1.1.5 Synopsis des outils d'aménagement et de planification développés dans les villes étudiées

Au sein de l'ensemble des expériences étudiées, des outils et méthodes mis en œuvre pour développer le souterrain ont été développés. Il s'agit principalement des leviers suivants :

- la maîtrise foncière de la part des collectivités : cela leur permet de négocier plus facilement avec les promoteurs et d'influencer les projets.
- la distinction entre le sous-sol superficiel et le sous-sol profond : cela permet de préserver une zone « d'intérêt public » pour les ouvrages de grande ampleur.
- les démarches d'amélioration de la connaissance du souterrain : cela permet d'envisager le développement du souterrain de manière plus adaptée, notamment pour préserver les ressources et leurs interactions.
- l'émergence de conditions attractives pour la mise en place de partenariat public-privé. Des outils incitatifs financiers ou réglementaires permettent de promouvoir des valorisations du souterrain modulables selon les besoins et les attentes de la collectivité (négociation de la forme, du contenu et de la fonction des ouvrages). Ces conditions attractives peuvent également prendre un caractère implicite.
- Les tentatives d'intégration de la thématique du sous-sol dans les documents de planification : c'est là un objectif difficile à atteindre, mais essentiel pour que l'urbanisation du souterrain soit conduite en cohérence avec le développement de la surface et que les différents usages ne nuisent ni au développement futur de la ville, ni à la qualité des ressources contenues dans le souterrain.

7.1.2 Stratégies et outils d'aménagement du territoire en Suisse

7.1.2.1 Les outils existants

L'aménagement du territoire 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 » (extrait du projet refusé en consultation de loi sur le développement territorial). Plusieurs échelles et niveaux de planification sont imbriqués pour créer un cadre d'action. En Suisse, la LAT¹⁶ (Loi sur l'Aménagement du Territoire) 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.

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).

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. Sa réalisation ne dispose d'aucune base 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 distinguent les zones à bâtir des zones de non-bâtir et définissent les droits des propriétaires quant à l'utilisation du sol. Ils règlent par

¹⁶ La LAT est appelée à être révisée prochainement. En 2009, le projet de nouvelle loi sur le développement territorial a été rejeté en consultation, à la faveur d'une révision en deux étapes de l'actuelle LAT. Dans ce document, certaines propositions de la LDter sont toutefois explicitement décrites à titre informatif.

ailleurs la mesure de l'utilisation du sol. 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).

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. 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 prévalent sur ceux des niveaux inférieurs et il existe une coordination entre les niveaux, le niveau supérieur étant l'autorité d'acceptation des niveaux inférieurs.

Les principaux outils d'aménagement du territoire stratégiques et réglementaires mis en œuvre en Suisse sont récapitulés à la figure 16.

Niveau stratégique		Niveau réglementaire	
		Objectifs sectoriels	Développement territorial
Confédération	Agglomération Espace fonctionnel rural	Conception (p.ex. conception paysage suisse) Plan sectoriel (p.ex. dépôts en couches géologiques profondes)	Projet de territoire Suisse
Canton		Plan directeur sectoriel (p.ex. chemins piétons)	Plan directeur cantonal
Commune			Plan directeur communal
Quartier			masterplan / périmètre d'urbanisme Plan directeur de quartier
			Projet d'agglomération Plan d'usage foncier mixte
			(Plan d'affectation)
			Plan d'affectation Règlement de construction
			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 16 - Principaux outils d'aménagement du territoire et échelle de réalisation

À aucun des niveaux de planification présentés dans le tableau ci-dessus, le sous-sol ne fait l'objet d'appréhension suffisamment importante pour que l'usage de ses ressources soit envisagé de manière suffisante.

En effet, au niveau fédéral, il existe des plans sectoriels, dont un portant sur les dépôts en couches géologiques profondes qui traite d'une question très spécifique (et polémique) et ne concerne pas directement le sujet de souterrain. À ce niveau, si l'élaboration d'un plan sectoriel du souterrain n'apparaît pas comme essentielle, il faut relever l'absence totale de cette thématique dans la Loi sur l'Aménagement du Territoire.

Au niveau cantonal, la réalisation du plan directeur cantonal s'appuie sur des études de base (art. 6, LAT). Il comprend les études et plans sectoriels ainsi que les lignes directrices de la future organisation du territoire cantonal. Ces études s'attachent en particulier à séparer le territoire à urbaniser de celui qui ne doit pas l'être. Les plans directeurs cantonaux ne portent pas de regard spécifique sur le sous-sol.

À l'échelon communal, les documents de planification directrice et d'affectation sont élaborés. Ils n'abordent pas spécifiquement la question du souterrain.

Enfin, à l'échelle des quartiers et des opérations d'aménagement, des planifications directrices et des procédures d'affectation infracommunales sont élaborées. L'étude de la prise en compte du sous-sol dans ces outils s'est concentrée sur le cas genevois. Des entretiens avec les responsables cantonaux de l'affectation ont été réalisés. Les résultats des enquêtes montrent que la prise en compte du sous-sol dans les plans localisés et de quartier (PLQ) passe principalement par la planification des réseaux techniques (adduction d'eau, énergie, etc.), et des caves et garages. Les PLQ sont élaborés par des promoteurs qui négocient « en bonne entente » avec l'administration cantonale. La construction du sous-sol représente d'abord une contrainte économique pour les promoteurs-constructeurs qui souhaitent plutôt l'étalement du souterrain sous les constructions que sa construction en profondeur. Cela a des impacts sur la surface notamment pour la plantation d'arbres au-dessus des espaces construits en sous-sol. Un des enjeux de la construction d'ouvrages sous-sol est donc l'emprise au-delà des bâtiments. Hors des PLQ, le sous-sol n'est pas planifié, car il n'existe pas de besoins spécifiques en la matière. Le gabarit des ouvrages en sous-sol n'est pas fixé. Il n'existe pas d'outil spécifique pour la planification du souterrain, car les demandes sont rares. Un outil pourrait être envisagé si les demandes étaient amenées à se multiplier. Par ailleurs, la valorisation du sous-sol est envisagée à une vision lointaine (10-15 ans). Pour développer des réflexions de qualité à cette échéance, il apparaît nécessaire de se doter de nouveaux outils réglementaires et opérationnels. Ils permettront de développer et d'améliorer la connaissance du sous-sol et de ses potentiels de valorisation.

À aucun de ces niveaux, le sous-sol ne fait l'objet d'appréhension suffisante dans les instruments de planification. Pour cette raison, des propositions d'évolution du cadre légal régissant l'aménagement du territoire ont été formulées.

7.1.2.2 Propositions d'évolution des outils d'aménagement du territoire suisse

Le territoire suisse connaît actuellement d'importantes mutations liées à sa forte métropolisation et à son développement économique. Le modèle de développement actuel qui favorise le développement des périphéries des villes et les déplacements en véhicule individuel est caduc, en particulier car il engendre une pression inacceptable sur l'environnement. La Loi sur l'aménagement du territoire, texte primordial dans le domaine, sera prochainement soumise à révision. Dans ce contexte, nous formulons des propositions pour faire évoluer le contexte législatif¹⁷. Leur objectif général est de promouvoir la gestion du territoire dans la 3^e dimension notamment en préservant et valorisant les ressources et en prévenant les conflits d'usage. Quatre propositions sont formulées.

- Affirmer le principe du caractère tridimensionnel de l'aménagement et garantir l'interdépendance entre ces deux dimensions.

Cela permet de garantir l'intérêt que l'aménagement du territoire doit porter au caractère tridimensionnel de l'espace. Une proposition au stade des principes est assez forte et laisse présager des déclinaisons opérationnelles. Pour affirmer le caractère indépendant du sol et du sous-sol, il a été proposé de mentionner explicitement la nécessité d'une planification conjointe entre la surface et le sous-sol. Il s'agit ainsi d'associer les mesures prises pour la surface à celles proposées pour le sous-sol. Ainsi, l'aménagement peut jouer son rôle de mise en cohérence des différentes dimensions du territoire.

- Améliorer les outils de connaissance du sous-sol et les intégrer dans les démarches de planification territoriale

Il est proposé de donner un caractère obligatoire aux outils de connaissance du sous-sol lors de l'élaboration des plans directeurs cantonaux. Ce document de planification s'appuie sur des études de bases thématiques qui identifient la répartition géographique et les potentialités de développement des thématiques traitées. Une étude de base portant pour le sous-sol doit permettre d'identifier les potentiels de valorisation, les besoins de protection du sous-sol, et de faire émerger les secteurs particulièrement stratégiques.

- Prendre en compte le sous-sol dans les mesures d'affectation dans les documents de planification

Afin de mettre en œuvre les principes évoqués, il a été proposé de mieux prendre en compte le sous-sol dans les procédures d'affectation. Ainsi, il est proposé que les plans d'affectation puissent régler le mode d'utilisation du sol et du sous-sol. Cela permettrait d'appréhender de manière assez souple cette question tout en laissant la possibilité aux planificateurs de réguler la constructibilité en souterrain dans les secteurs qui le méritent.

¹⁷ Un premier projet de Loi sur le Développement Territorial a été développé par les services de la Confédération et rejeté par les cantons. Dans ce contexte, les propositions formulées dans ce chapitre avaient déjà été formulées et intégrées au projet de loi. Le thème du sous-sol n'a pas fait l'objet de remarques particulières lors de la consultation et du rejet de la nouvelle loi.

7.2 Démarche conceptuelle pour la gestion des ressources du sous-sol urbain

La proposition du chapitre 7.1 qui vise à développer une étude de base spécifique aux ressources du sous-sol est particulièrement importante et demande le développement de démarches pratiques de réalisation. Une telle étude de base permettra de réaliser des planifications stratégiques cohérentes avec les conditions du sous-sol et par répercussion de développer 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 0). Les principales étapes de mise en œuvre d'une telle étude de base sont présentées à la figure 17 et font l'objet de développements dans les chapitres 7.3 et 7.4. 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.

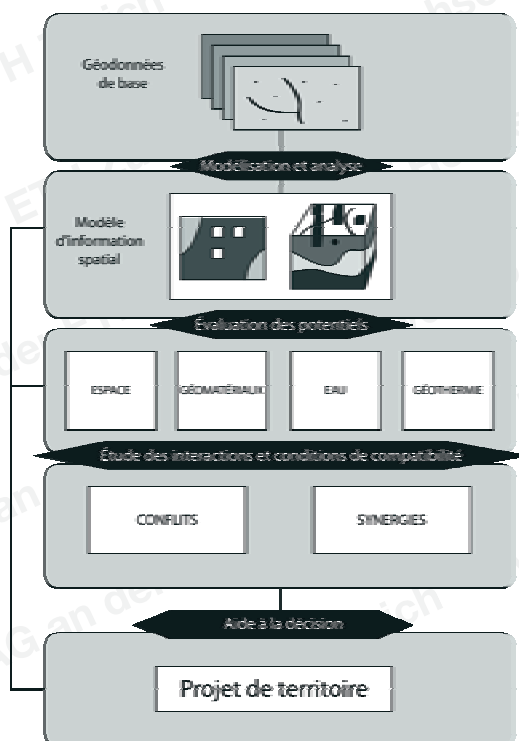


Figure 17 - Diagnostic et évaluation des potentialités pour le développement des ressources du sous-sol : « Des ressources aux besoins »

Remarque : les autres études de base qui permettent de réaliser un « projet de territoire » ne sont pas représentées sur ce schéma

7.3 Intégrer et valoriser la connaissance du sous-sol

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 (bureaux d'études, offices fédéraux, offices cantonaux, etc.). 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 (par exemple Genève et Vaud). 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 allant 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 (Systèmes d'Information Géographiques) sont mis en œuvre pour assurer leur représentation et leur gestion.

7.3.1 Géologie

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 ville, l'étude des affleurements peut être rendue difficile par l'urbanisation 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 levé (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 interprétées 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.

Ces données géologiques de bases ne sont toutefois pas toujours facilement exploitables par l'ensemble des acteurs concernés par l'aménagement du territoire. La carte géologique est un document scientifique fondamental. Toutefois, le niveau d'information qu'il présente n'est pas dédié à la gestion territoriale. Par ailleurs, si au sein d'une même carte, l'information est représentée de manière homogène, il n'est pas rare de disposer de notations différentes d'une carte à l'autre. En effet, 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 (Brodaric et al., 2004). Cette hétérogénéité peut être déroutante pour le profane. En ce qui concerne les logs de sondages, cette hétérogénéité est encore plus forte. Les logs de sondage sont pourtant une source d'information très importante en milieu urbain. Ce sont eux qui permettent essentiellement d'observer la géologie dans sa 3^e dimension.

Au vu de ces constats, il apparaît nécessaire de disposer d'une échelle cohérente pour l'information géologique. L'existence d'une telle échelle permet aux non-spécialistes de disposer d'informations préalablement interprétées par les spécialistes. La méthode des géotypes (Parriaux et Turberg, 2007) codifie ce processus de conversion. La figure 18 présente l'échelle de représentation géotype parmi d'autres échelles informatives, classiquement utilisées sur la carte géologique (formation) ou dans les logs de sondage (couche). Les géotypes¹⁸ sont un nombre restreint de grands groupements typiques auxquels peuvent se rapporter les différents terrains rencontrés dans la nature et sur les

¹⁸ L'ensemble des géotypes développés sont présentés dans Parriaux et Turberg PARRIAUX, A. & TURBERG, P. (2007) Les géotypes, pour une représentation géologique du territoire. Tracés, 133, 11-17. ainsi que dans Blunier BLUNIER, P. (2009) Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain. Lausanne, EPFL. en annexe D, le chapitre 6.2.1.3 et l'annexe E de ce document présentent également un exemple de transformation de données géologiques de base en géotypes dans la ville de Genève.

cartes géologiques. Deux familles de géotypes sont définies : les géotypes des terrains rocheux et ceux des terrains meubles.

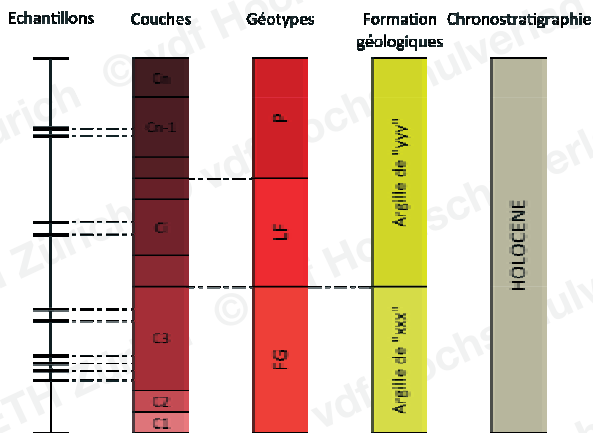


Figure 18 - Les géotypes parmi les différentes échelles de caractérisation du milieu géologique (Parriaux et Turberg, 2007)

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 (figure 19). Des méthodes et outils mathématiques ont été développés pour réaliser cette modélisation (par exemple : Galera et al., 2003, Mallet, 1997, Mayoraz, 1993) et des produits informatiques sont disponibles sur le marché (une revue de ces outils et méthodes sort du cadre de ce travail). On notera 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).

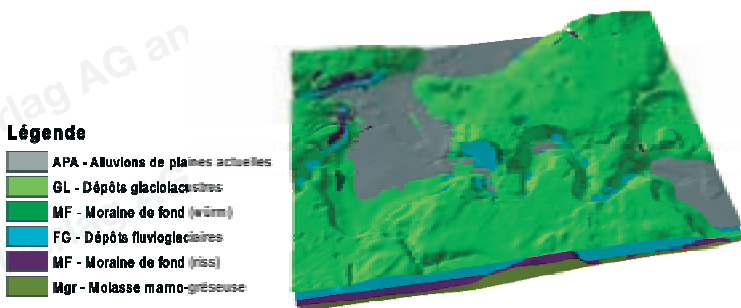


Figure 19 - Exemple de modèle de géotype 3D pour la ville de Genève (exagération verticale = 2)

7.3.2 Hydrogéologie

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 contact entre les eaux souterraines et les 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.

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.). Ces informations peuvent ensuite être intégrées dans le modèle spatial tridimensionnel au sein de la géologie (figure 20).

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 (riess)
Mgr - Molasse marno-gréseuse

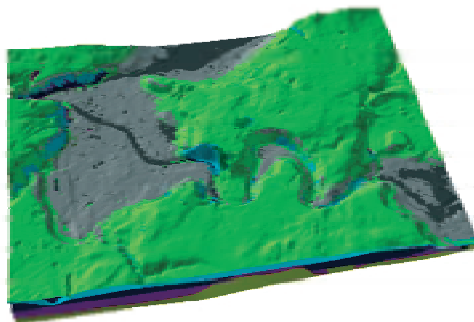


Figure 20 - Modèle 3D intégrant l'hydrogéologie en situation de hautes eaux (Genève)

D'après modélisation numérique (Parriaux et al., 2004) et interpolation statistique, exagération verticale = 2

7.3.3 Milieu bâti

L'usage actuel du sous-sol urbain et de la surface donne lieu au développement de nombreuses infrastructures dans le sous-sol urbain. 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 en 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, 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). Par exemple, lors du cas d'étude genevois, les profondeurs des bâtiments n'étaient pas connues. Par analyse spatiale, il a été possible de reconstruire une partie de ces données (par exemple en croisant avec les données sur les ouvrages géotechniques, tels que les pieux et les parois). Toutefois, les informations ainsi reconstruites restent lacunaires et difficiles à valider.

7.3.4 Contexte de surface et contraintes

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 développés 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. Par exemple, 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

Par ailleurs, la prise en compte des risques naturels et anthropiques est importante. D'une part, car les caractéristiques du sous-sol peuvent influencer ces risques, d'autre part car les usages qui sont faits de ses ressources peuvent être vulnérables aux dangers naturels de manière différente des usages de la surface¹⁹. La vulnérabilité et les risques spécifiques pour les infrastructures souterraines doivent faire l'objet d'une évaluation spécifique en fonction du contexte. À Genève, par exemple, les caractéristiques du territoire ont amené à considérer spécifiquement le risque lié aux inondations, les mouvements de terrain et le cadastre des sites pollués.

7.3.5 Gestion de l'information : vers un SIG pour le sous-sol

Les SIG 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). Les SIG se sont imposés comme un outil très important pour la gestion de l'information territoriale dans les dernières décennies (Lardon et al., 2001, Theriault et Prélaz-Droux, 2001). Leur fonction fédérative²⁰ (Prélaz-Droux, 1995) est particulièrement importante pour assurer une gestion et une analyse transversale des problématiques territoriales, elle répond particulièrement bien aux enjeux de partage de l'information liés au sous-sol urbain.

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 :

¹⁹ Sans rentrer dans les détails, il est intéressant de noter que les infrastructures souterraines sont généralement moins vulnérables aux dangers naturels que celles de surface (Sterling et Godard, 2000). Lors du tremblement de Terre de Kôbé en 1995, les tunnels et bâtiments souterrains ont ainsi été moins endommagés que les ouvrages de surface.

²⁰ Le SIG fédératif 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.

- 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 (Modèles Numériques d'Altitude) 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, réellement volumiques, complémentaires des modèles classiques des SIG 2D et 2,5D. Plusieurs efforts sont menés dans ce sens et ont permis l'implantation de fonctions volumiques dans des outils spécialisés (par exemple les modélisateurs géologiques). La transition vers des outils SIG permettant la gestion de l'ensemble du cycle de vie de l'information n'est toutefois 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).

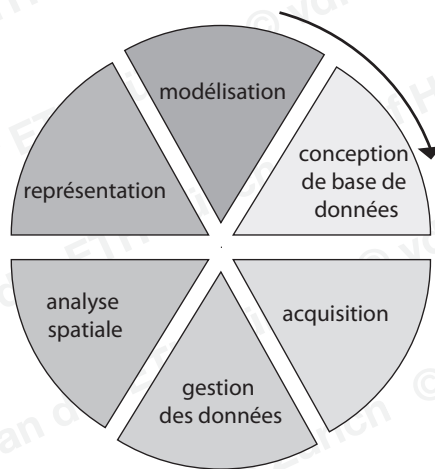
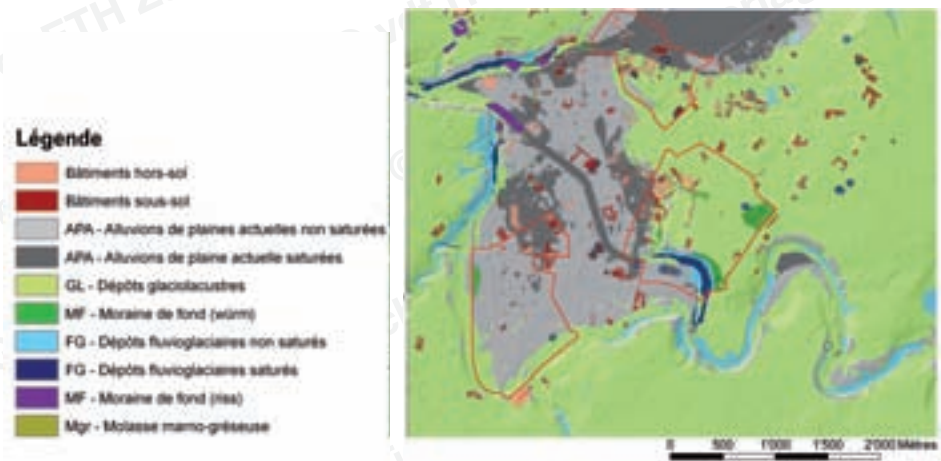


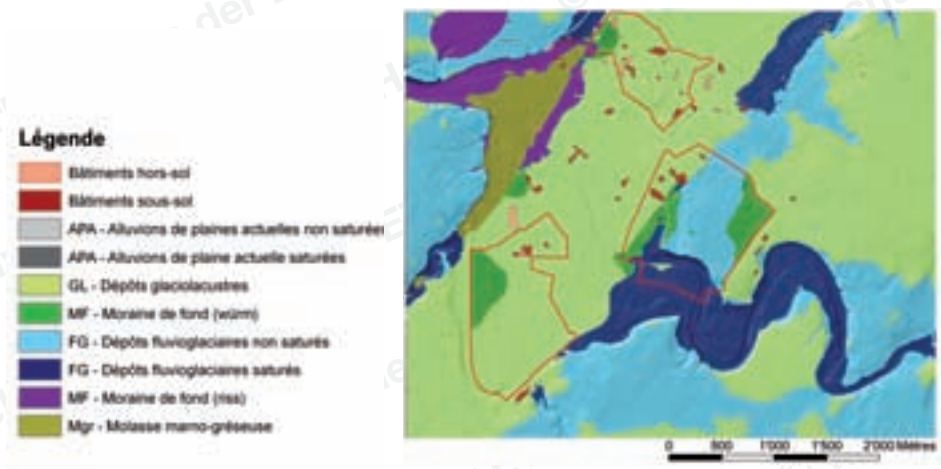
Figure 21 - Cycle de vie de l'information spatiale (adapté de Pointet, 2007)

Ainsi, 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 (par exemple dans le contexte genevois, 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 (Worboys et Duckham, 2004). Devant ce constat, il semble pragmatique de promouvoir une approche 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.

Une telle approche a été mise en œuvre dans le cadre de l'étude de cas genevoise. Les outils 3D ont été utilisés pour l'interpolation et la modélisation géologique et hydrogéologique (domaines dans lesquels ils sont matures et efficaces). Les données ont été générées sous forme de modèles numériques d'altitudes (2.5D) et introduites dans un outil SIG « classique » : ArcGIS, sous forme de coupes de profondeur constante (figure 22). La troisième dimension a ainsi été représentée à l'aide d'étages de données. Cette approche a pu être mise en œuvre aisément avec des outils maîtrisés. Toutefois, elle présente un certain nombre de désavantages qui pourraient être mieux gérés à l'aide d'outils volumiques : une redondance des étapes d'analyse, la difficulté de mise à jour des données (en particulier, coupes géologiques et hydrogéologiques) et une redondance dans le stockage de l'information.



(a) Étage -2 : profondeur 3 à 6 m



(b) Étage -7 : profondeur 18 à 21 m

Figure 22 - Présentation de deux étages de données (Genève)

7.4 Évaluer le potentiel d'un sous-sol urbain

Les développements présentés au chapitre 7.3 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 17, 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 d'établir des cartes de restriction ou de possibilité de synergies. Les interactions sont évaluées sur la base de l'analyse présentée au chapitre 4 et des bases légales étudiées au chapitre 6.2.

Enfin, des stratégies de traduction de ces potentiels en projet de développement territorial sont présentées.

7.4.1 Potentiel brut d'usage des ressources

Dans ce chapitre, nous nous contentons de décrire les indicateurs développés. Des exemples d'application peuvent être trouvés dans Blunier (2008).

7.4.1.1 Espace

Les développements technologiques du 20^e siècle permettent d'envisager la construction d'ouvrages souterrains dans presque tous les contextes géologiques. Aussi, il est 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.).

Des critères d'évaluation 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 (Blunier, 2009). 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 eux,

certaines 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 :

- Analyse et synthèse 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.
- Sur la base de cette synthèse, classement des différents terrains par des professionnels de la construction souterraine familiers du contexte. Si une échelle ordinale est nécessaire pour comparer les variantes (par exemple dans le cas d'analyse multicritères), elle peut être construite par exemple à l'aide de la méthode des comparaisons par paires (Bickel et al., 1996).

L'indicateur proposé permet de prendre en compte des facteurs quantitatifs, mais aussi qualitatifs et de comparer 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, si l'on utilise une échelle ordinale, 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.

7.4.1.2 Géomatériaux

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. Pour différencier ces situations, une classification en 6 classes a été développée (figure 23), de la plus avantageuse à la plus désavantageuse :

- 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.

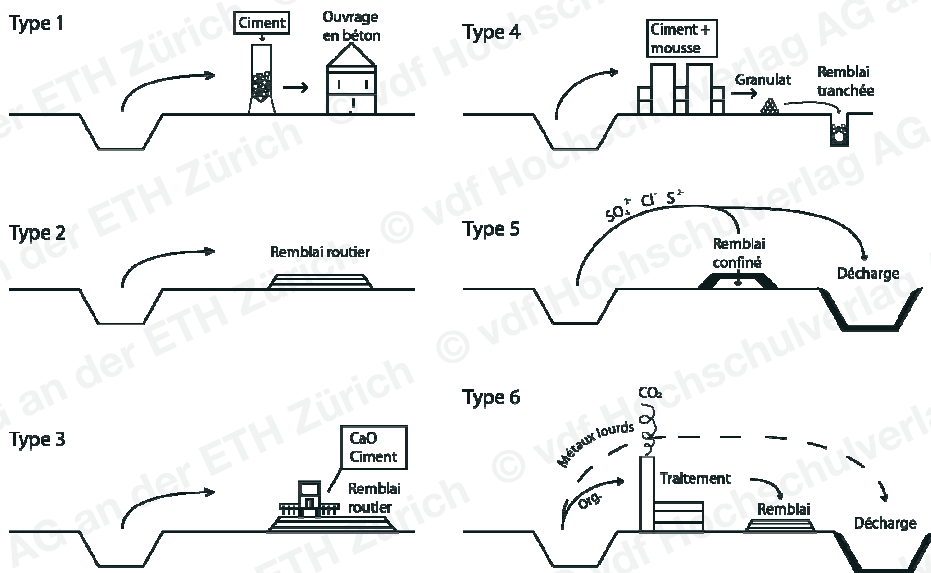


Figure 23 - Mode de valorisation possible des géomatériaux

Le potentiel d'usage des géomatériaux peut ainsi être 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 le fait que les transactions sont généralement gérées de manière cloisonnée, sans coordination entre les maîtres d'ouvrages de chantiers différents, voire entre les acteurs d'un même chantier. Rochat et al. (1980) 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.

Dans le cadre du projet Deep City, la méthode de traduction des géotypes en classe de revalorisation a été essentiellement centrée sur les 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 contrôlée 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 donnée locale de forage (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 : Rochat et al., 2006).

La valorisation des terrains meubles dépend essentiellement de trois paramètres :

- le potentiel de pollution : les méthodes de valorisation doivent être évaluées à l'échelle du projet. Les sites contaminés connus (cadastre) sont à priori associés au type 6 de valorisation.
- la granulométrie,
- la teneur en eau.

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

Des critères pour la granulométrie ont été développés en synthétisant les recommandations issues de la littérature scientifique et technique (SN 670 120 b, Descoedres et al., 2002). Ces critères ont été dérivés en organigramme d'aide à la décision (figure 24).

La teneur en eau joue un rôle important pour les matériaux avec une teneur élevée en fractions granulométriques fines, 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 (Houmard, 2004). La norme ISO 14 688-2 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 4²¹.

²¹ 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.

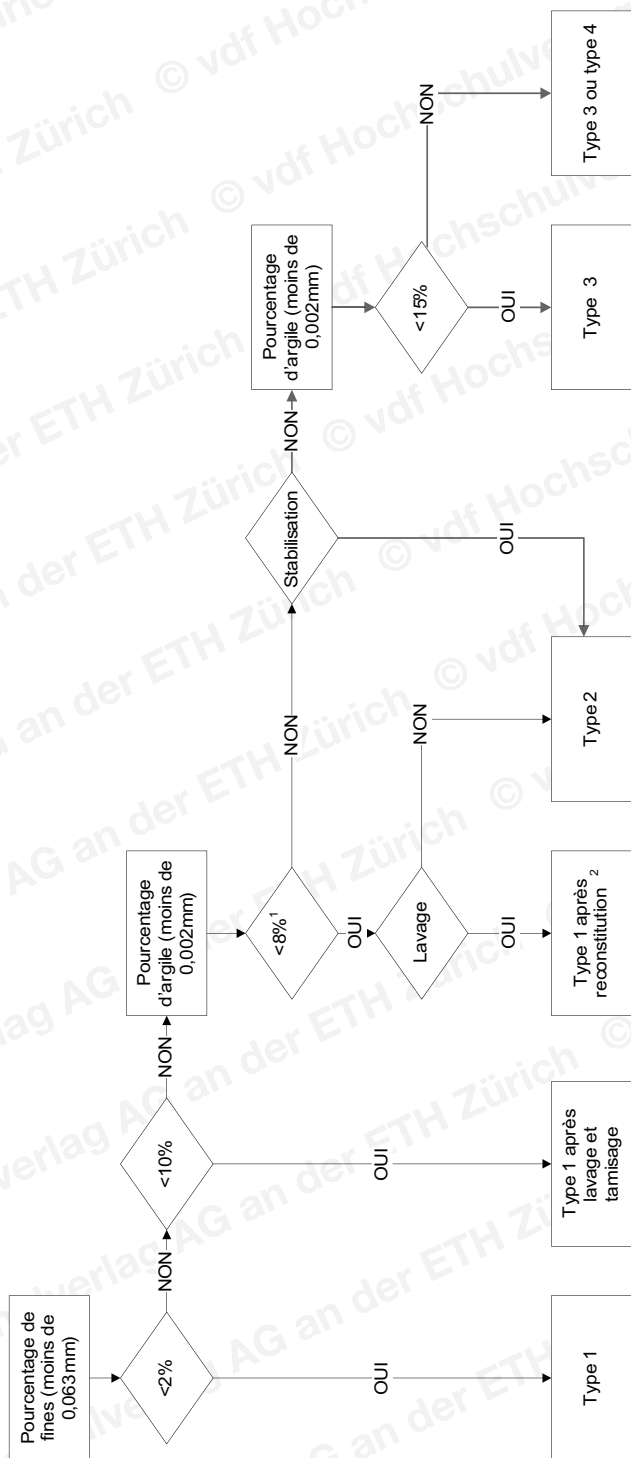


Figure 24 - Granulométrie et mode de valorisation des géomatériaux

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)

7.4.1.3 Eau souterraine

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 à l'aide de la typologie hydrogéologique du tableau 8.

Tableau 8 - 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 de boisson.

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 fluvioglaciaires
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]

Le potentiel est déduit ainsi :

- 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 usages²² :
 - réseau de distribution secondaire selon les ressources et les besoins de la ville,
 - besoins industriels,
 - géothermie par des systèmes ouverts.

7.4.1.4 Géothermie

Le potentiel des systèmes géothermiques ouverts dépend essentiellement du flux hydraulique exploitable, donc du contexte hydrogéologique. Le calcul de la puissance théorique d'une pompe à chaleur permet d'estimer que les besoins géothermiques de bâtiments typiques peuvent être couverts par l'exploitation des aquifères de type Q2 et Q3 (tableau 8).

L'évaluation du potentiel des systèmes fermés, en particulier des sondes géothermiques a été 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,
- la conductivité thermique du matériel géologique.

Signorelli (2000) 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). Au regard de ces corrélations, il semble possible de ne conserver qu'un des paramètres. L'altitude est un paramètre facile à cartographier en Suisse compte tenu de la couverture et de la précision des modèles numériques de terrains. 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

²² 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.

4°C pour celle des eaux souterraines (Signorelli, 2004). 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 des conductivités pondérée par l'épaisseur des différentes couches. Cette évaluation peut être réalisée pour plusieurs longueurs de sondes ou de géostructures énergétiques (exemple à la figure 25).

À titre indicatif, pour l'interprétation des cartes on peut fournir les classes de conductivité de la norme allemande VDI 460 :

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

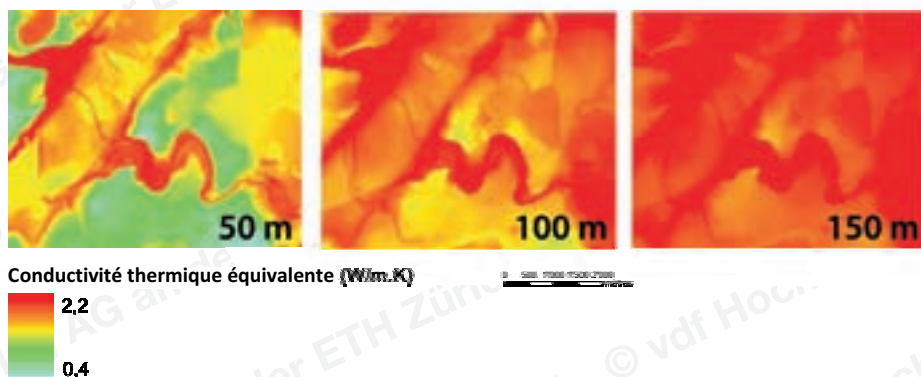


Figure 25 - Exemple de cartes de conductivité thermique équivalente

Carte réalisée pour la ville de Genève pour des profondeurs de sondes de 50, 100 et 150 m

7.4.2 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.

Les interactions entre les usages des ressources du sous-sol ont été analysées au chapitre 4 dans un cadre de réflexion systémique. L'objectif de ce chapitre est de présenter comment les prendre en compte dans un contexte géologique et urbain donné. Aussi, la méthode est illustrée directement autour du cas d'étude genevois.

7.4.2.1 Analyse du contexte

Une fois que le modèle d'information spatiale du sous-sol urbain a été développé (chapitre 7.3), il est possible de déterminer globalement le contexte naturel et construit de l'espace urbain considéré. Par exemple, dans le cas de la ville de Genève, une coupe verticale traversant toutes les situations géologiques et hydrogéologiques rencontrées dans le sous-sol a été développée (figure 26). On y distingue les formations fortement aquifères (Q3u : aquifère des dépôts fluvioglaciaires FG) et les nappes superficielles (Q2 : aquifères des alluvions de plaines actuelles APA). Il existe des zones de superposition de ces nappes (indiquées en rouge sur la coupe) dans lesquelles un court-circuit hydrogéologique est possible. 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.).

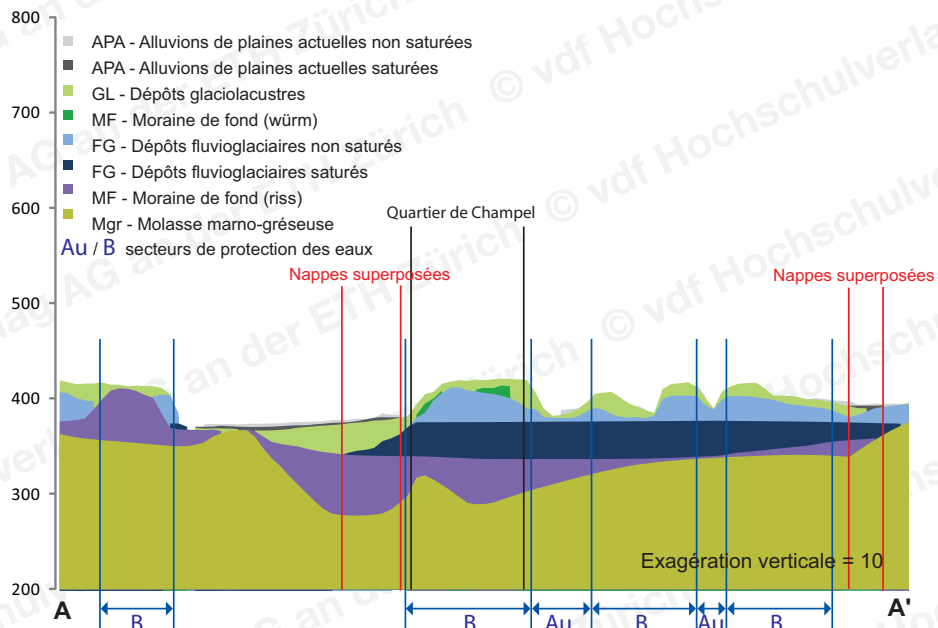


Figure 26 - Profil géologique traversant la ville de Genève

Une analyse de la dynamique de ces nappes a également été réalisée. Elle montre que les niveaux phréatiques des nappes principales FG sont bien stabilisés environ 5 m sous le niveau « naturel » et qu'un fort rebond de cette nappe est peu probable.

7.4.2.2 Conflits entre les usages du sous-sol

La description du contexte et la connaissance des interactions entre les ressources du sous-sol (chapitre 4) permettent d'identifier et de localiser les possibles conflits d'usage entre les ressources du sous-sol. Il convient ensuite de qualifier ces situations afin d'en tirer des conséquences pour l'aménagement du territoire. En effet, les risques liés à chacun des types de conflits ne sont pas équivalents. Pour cela, il est proposé de distinguer quatre niveaux, par analogie avec les recommandations de l'OFEV (Allen et al., 2003, OFEV, 2009) : interdiction, forte restriction, restriction modérée et absence de restriction (tableau 9). L'évaluation de ces niveaux de restriction est réalisée en accord avec les prescriptions légales (OFEFP, 2004 annexe C) et avec l'état de connaissance des situations de conflits (chapitre 4).

Tableau 9 - Niveaux de restriction proposés et correspondance avec les recommandations de l'OFEV

Niveau de restriction	Correspondance OFEV
Interdiction	- Interdit
Forte restriction	- ^b Interdit ; l'autorité compétente peut admettre une dérogation, après examen du cas particulier. - ⁿ 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	b ⁿ 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. b 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. + ^b En principe sans problème ; autorisation nécessaire en vertu de l'art. 32 OEaux. + ⁿ 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.

Dans le cas de Genève, les principales situations conflictuelles à prendre en compte lors de la planification des usages sont ainsi :

- 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. On peut ainsi déterminer les conditions de compatibilité entre l'eau et l'espace et entre l'eau et la géothermie.

Il est ainsi possible de déterminer à partir du contexte les situations et la localisation des conflits. Par exemple, le tableau 10 montre l'évaluation réalisée à Genève pour les conflits entre la géothermie et l'eau souterraine. La figure 27 est une cartographie de ces conditions de conflits spécifiques aux sondes géothermiques.

Tableau 10 - Conflits géothermie-eau souterraine : conditions de compatibilité

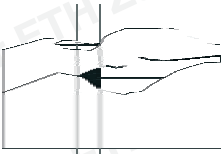
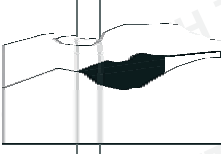
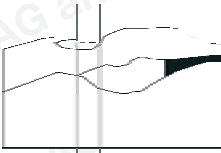
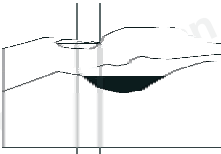
Conditions	Usage de la géothermie	Restriction	Justification
Aquifère FG : zone de superposition des nappes 	Sondes et géostructures	Interdiction	Courts-circuits
Aquifère FG: nappe et zone superposée 	Sondes et géostructures	Interdiction	Risque d'infiltration d'eau de ruissellement, fuite du liquide caloporteur, 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



Figure 27 - Exemple de carte de restriction : sondes géothermiques

7.4.2.3 Synergies entre les usages des ressources du sous-sol

Les situations de synergies sont évaluées sur la même analyse du contexte que les conflits. Ainsi, 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 (pompages réalisés pour des raisons de maintien structurel ou fonctionnel de l'ouvrage),
- 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 pompages techniques sont nécessaires. Toutefois, de tels pompages ayant un fort coût énergétique sur le long terme, une telle mesure ne devrait être favorisée que lorsque les pompages sont indispensables.

Le potentiel de valorisation des géomatériaux a été évalué sur la base du chapitre 7.4.1.2. 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.

7.4.3 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 donnés 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, pour assurer la transition du diagnostic au projet territorial, il conviendra d'accompagner les décideurs en mettant en œuvre des démarches d'aide à la décision. Les outils de l'aide à la décision multicritère (voir par exemple : Maystre et al., 1994, Roy et Bouyssou, 1993, Saaty, 1980, Schärli, 1996) associés aux SIG (voir par exemple : Blunier, 2009, Boroushaki et Malczewski, 2008, Joerin et al., 2001, Malczewski, 2006, Malczewski, 1999, Marinoni et Hoppe, 2006) sont une précieuse aide lors de ce processus de traduction. Dans le cadre du projet Deep City, l'intérêt de différentes méthodes a été discuté et une application d'une méthode (AHP-OWA) a été réalisée comme illustration pour l'implantation d'ouvrages souterrains étanches. Le choix d'une méthode spécifique devra faire l'objet d'une évaluation par les spécialistes qui accompagnent le processus de décision en fonction du type de décision à réaliser (choix d'un site d'implantation, caractérisation du territoire, etc.) ainsi que de la complexité du processus de choix (nombre d'indicateurs, types de contraintes, etc.).

7.5 Synthèse du chapitre

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), 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. 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.

Plusieurs propositions ont été formulées pour intégrer le sous-sol à l'aménagement du territoire. En particulier, il est important 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. La réalisation de ces études de base passe par la collecte, l'interprétation et la mutualisation des données descriptives du sous-sol.

Une démarche pratique a été développée pour cette mise en œuvre et expérimentée sur la ville de Genève. Elle repose sur une meilleure intégration de l'information relative au sous-sol. En s'appuyant sur les outils de l'information spatiale et sur des approches de traduction et d'uniformisation des données, il est possible de développer des outils qui jouent un rôle fédérateur pour la planification et la gestion. Une telle approche devrait permettre notamment aux professionnels qui ne sont pas spécialistes du sous-sol de mieux le connaître. Dans un deuxième temps, il est nécessaire de transposer cette connaissance en potentialités d'usage du sous-sol. Ces potentialités tiennent compte des spécificités de chaque ressource, mais aussi et surtout des interactions qui gouvernent leurs utilisations combinées. La démarche ainsi développée se présente donc comme un véritable outil pour appuyer la prise de décision sur le territoire et anticiper les changements liés à l'utilisation des ressources du sous-sol urbain.

8.1 Synthèse générale

Les propos qui précèdent sont fondés 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 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.

Un usage plus intense et mieux coordonné des ressources du sous-sol urbain passe par une meilleure acceptabilité, tant sociologique qu'économique. Le sous-sol apparaît aujourd'hui comme un espace relativement peu attractif, mais surtout méconnu. Les acteurs qui le pratiquent en ont une perception globalement plus positive que les autres. Sur le plan qualitatif, une réelle architecture du sous-sol avec en particulier un travail sur les volumes et la lumière permettrait d'en augmenter l'attractivité. Économiquement, les coûts de construction en souterrain restent plus élevés que ceux en surface, toutefois une réflexion sur l'ensemble du cycle des coûts et non seulement sur les coûts d'investissement, semble réduire de manière importante le surcoût des solutions souterraines. C'est en particulier vrai, car les bâtiments souterrains sont efficaces sur le plan thermique (comparables à des standards Minergie® dans l'étude de cas développée) et que les coûts d'acquisition du terrain peuvent être rentabilisés par le développement d'autres usages en surface (d'intérêt privé ou public).

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 traduite dans des plans et des outils réglementaires. À l'heure actuelle, les ressources du sous-sol sont peu intégrées dans ces processus. Les travaux de recherche aboutissent à des propositions pour modifier cet état de fait. En particulier, la proposition d'établir un diagnostic, une étude de base pour le dévelop-

pement d'approches de planification stratégique a été développée et consolidée. 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.

Une démarche pratique a été développée pour appuyer la planification territoriale. Le sous-sol est connu des spécialistes que sont les géologues et les ingénieurs. Toutefois, cette connaissance est mal transférée auprès d'autres acteurs (autres techniciens, politiques, citoyens, etc.) et souffre de la dispersion des informations. Aussi, la démarche du projet Deep City s'appuie sur les outils SIG et sur 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.

La démarche Deep City 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 a montré qu'elle est applicable avec des données et des outils existants et maîtrisés par les milieux professionnels. Il démontre la pertinence de la prise en 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 Trois messages clés

1. Des ressources du sous-sol mésestimées

Le sous-sol est ignoré dans le processus d'aménagement du territoire urbain. Or, le sous-sol est une source de richesse pour le développement durable de la ville. Par son potentiel de ressources à usages multiples (espace, géomatériaux, eau, géothermie), il doit être inclus dans un aménagement du territoire volumique. On ne peut envisager un développement durable de la ville sans cette composante.

2. Le sous-sol une opportunité pour la densification

La densification des villes peut bénéficier d'un bon usage du sous-sol en y reportant des activités qui encombrant inutilement la surface et, par là, donner plus d'espaces conviviaux en surface et de meilleures conditions environnementales.

3. Des sous-sols adaptés à l'Homme

Par une amélioration de leur qualité architecturale, les espaces en sous-sol peuvent devenir psychologiquement et sociologiquement acceptables pour toute une série d'usages : parking, voies de communication, dépôts, centres commerciaux, salles de spectacles, etc.

8.3 Recommandations

Améliorer la connaissance et la diffusion des informations sur les ressources du sous-sol

Une base de données géologique, en particulier de forages, est un préalable indispensable à la connaissance du territoire. Les situations cantonales sont variées dans ce domaine. Les expériences du canton de Vaud et de Genève montrent que la mutualisation de ces données et la réalisation de bases de données sont des outils précieux. Ces deux cantons ont adopté des lois pour rendre obligatoire le transfert de l'information levée sur le terrain. L'utilisation d'une échelle de traduction uniformisée comme celle des géotypes est également indispensable pour exploiter une telle information.

Au modèle géologique devraient être ajoutées les infrastructures souterraines existantes. L'emprise des infrastructures récentes est connue par les plans de mise à l'enquête lors de la construction. En revanche, beaucoup d'anciens ouvrages restent indéterminés de ce point de vue. La levée de leur emprise n'est souvent pas simple et il s'agit à chaque opportunité de compléter cette information.

L'ensemble de ces données devrait être exploité pour développer un modèle 3D du sous-sol urbain, base d'analyse indispensable à la planification de l'usage de ses ressources.

Intégrer la problématique des ressources du sous-sol aux projets d'aménagement dès l'étape du diagnostic

Le sous-sol peut contraindre le développement du territoire, en profondeur comme en surface. Mais il peut aussi créer de nouvelles opportunités pour le développement durable. Aussi, des études de base sur les potentialités des ressources du sous-sol devraient être menées de manière systématique dans les projets de développement territorial. Elles doivent être prises en compte dans le cadre d'une évaluation des usages multiples du sous-sol en tenant compte des synergies et des conflits.

La réalisation de telles études permettra de sortir de la vision sectorielle du développement du sous-sol, d'éviter un gaspillage de ressources sur le long terme et d'assurer aussi tôt que possible la faisabilité des projets d'aménagement. Il y a en effet un fort besoin de changer de paradigme et de développer des projets qui tiennent compte de la réalité géologique du sous-sol et non pas d'essayer d'adapter cette réalité aux projets.

Dépasser les approches sectorielles

Le sous-sol urbain est un système complexe. Ses ressources et leurs usages sont en interactions. Aussi, il n'est pas possible d'assurer un développement durable de ces ressources en développant des actions et des projets à l'échelle d'une seule ressource. Des actions sur une ressource impactent la qualité et les potentiels d'une autre. La notion d'usages multiples doit être prise en compte de manière systématique. Par ailleurs, la sectorialité disciplinaire est aussi problématique. Les spécialistes de l'aménagement et ceux du sous-sol doivent collaborer beaucoup plus tôt dans les projets d'aménagement urbain.

Favoriser les synergies d'usage

Les usages combinés de plusieurs ressources au sein d'un même projet (par exemple espace et géothermie) offrent des opportunités nouvelles pour des projets plus respectueux de l'environnement, mais aussi plus efficaces sur le plan économique. Si la Suisse dispose d'une base légale pour prévenir une partie des conflits d'usage, il n'en existe aucune pour promouvoir les synergies. De nombreux projets en souterrain sont encore construits sans évaluer la possibilité d'utiliser une autre ressource. Par exemple, dans un projet de tunnel, la possibilité de développer des géostructures énergétiques devrait être évaluée systématiquement. Pour cela, un cadre incitatif devrait être mis en place, par exemple à l'aide d'outils réglementaires et économiques, mais aussi par une meilleure information (lien avec la recommandation 5).

Mettre en place une politique de promotion et de préservation des ressources du sous-sol

La notion de contrainte (technique, économique, légale, etc.) est bien plus fortement associée à l'image du sous-sol que celle d'opportunités. Des expériences en Suisse et à l'étranger montrent que l'usage du sous-sol peut aboutir à des solutions avantageuses pour le développement durable. Aussi, il convient de passer outre les à priori pour développer une image plus objective du sous-sol de nos villes. En Suisse, la mise en place d'un observatoire du sous-sol chargé de diagnostiquer les pratiques de gestion des quatre ressources permettrait de réaliser un pas dans cette direction. Des démarches pilotes pourraient être encouragées.

Adapter les outils d'aménagement urbain aux enjeux de développement du souterrain

Les villes qui ont développé leur sous-sol se sont dotées d'outils et d'instruments d'aménagement urbain spécifiques. Sur cette base et en s'appuyant sur des analyses spécifiques, il est recommandé de prendre en compte le sous-sol dans les documents de planification directrice à l'échelle cantonale et communale, et dans les plans d'affectation. Pour cela, il est nécessaire de veiller à ce que l'affectation du sous-sol soit envisagée en lien avec la surface, que les règles relatives au gabarit (CUS, COS, recul, prospects, etc.) puissent être un outil de gestion du sous-sol. Enfin, des mécanismes incitatifs de valorisation de qualité pourraient être envisagés, notamment dans les centres des principales villes du pays.

- ALLEN, A., MILENIC, D. & SIKORA, P. (2003) Shallow gravel aquifers and the urban heat island effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics*, 32, 569–578.
- APEL, M. (2004) A 3D geoscience information system framework.
- ASSOCIATION MÉTROPOLE SUISSE (2002) Charte pour l'avenir d'une Suisse urbaine. Zurich.
- BARLES, S. (1995) *L'urbanisme souterrain*, Paris, PUF.
- BARLES, S. (2006) City planning and underground space in 20th and 21th century France. *Going underground, excavating the subterranean city*. Manchester, Unpublished draft version.
- BARLES, S. & JARDEL, S. (2005) L'urbanisme souterrain : étude comparée exploratoire. Paris, Rapport de recherche.
- BERGERON, M. (1993) Vocabulaire de la géomatique.
- BICKEL, J. O., KUESEL, T. R. & KING, E. H. (1996) *Tunnel engineering handbook*, New York, Chapman & Hall.
- BLUNIER, P. (2009) Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain. Lausanne, EPFL.
- BONOMI, T. & ELLIS, B. (1999) Groundwater level evolution in the Milan area : natural and human issues. *Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality*. Birmingham, United Kingdom, International Association of Hydrological Sciences.
- BOROUSHAKI, S. & MALCZEWSKI, J. (2008) Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Computers and Geosciences*, 34, 399–410.
- BOTKIN, D. B. & BEVERIDGE, C. E. (1997) Cities as environments. *Urban Ecosystems*, 1, 3–19.
- BREHENY, M. (1997) Urban compaction: Feasible and acceptable? *Cities*, 14, 209–217.
- BRODARIC, B., GAHEGAN, M. & HARRAP, R. (2004) The art and science of mapping: computing geological categories from field data. *Computers & Geosciences*, 30, 719–740.
- BURTON, E., JENKS, M. & WILLIAMS, K. (1996) *The Compact City*, Routledge.
- CARMODY, J. & STERLING, R. L. (1993) *Underground Space Design - A guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces*, New York, Van Nostrand Reinhold.
- CORTE, J. F., FEVRE, A., HAVARD, H., JOUBERT, J. P., KERGOET, M., MOREL, G., PERROT, A., QUIBEL, A., SCHAEFFNER, M. & VEYSSET, J. (2000) Réalisation des remblais et des couches de forme. Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.
- DECKER, E. H., ELLIOTT, S., SMITH, F. A., BLAKE, D. R. & ROWLAND, F. S. (2000) Energy and material flow through the urban ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 685–740.

- DESCOEUDRES, F., DUMONTA, A. G., PARRIAUX, A., VUILLET, L., DYSLI, M., ROBYR, P., FONTANA, M. & FRANCIOSI, G. (2002) Utilisation des matériaux d'excavation de tunnels dans le domaine routier.
- DUFFAUT, P. (1980) Past and future of the use of underground space in France and Europe. *Underground Space*, 5, 86–91.
- EDELENBOS, J., MONNIKHOF, R., HAASNOOT, J., VAN DER HOEVEN, F., HORVAT, E. & VAN DER KROGT, R. (1998) Strategic study on the utilization of underground space in the Netherlands. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13, 159–165.
- EISWIRTH, M., WOLF, L. & HOLTZL, H. (2004) Balancing the contaminant input into urban water resources. *Environmental Geology*, 46, 246–256.
- ERKMAN, S. (2005) Ecologie industrielle à Genève – Premiers résultats et perspectives. Genève.
- FORSTER, A., LAWRENCE, D. J. D., HIGHLEY, D. E., CHENEY, C. S. & ARRICK, A. (2004) Applied geological mapping for planning and development : An example from Wigan, UK. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37, 301–315.
- FOSTER, S. S. D., MORRIS, B. L. & CHILTON, P. J. (1999) Groundwater in urban development-a review of linkages and concerns. *IAHS-AISH Publication*, 3–12.
- GALERA, C., BENNIS, C., MORETTI, I. & MALLET, J. L. (2003) Construction of coherent 3D geological blocks. *Computers and Geosciences*, 29, 971–984.
- GODARD, J. P. & STERLING, R. L. (1995) General considerations in assessing the advantages of using underground space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10, 287–297.
- GOLANY, G. S. & OJIMA, T. (1996) *Geo-Space Urban Design*, Toronto, John Wiley and Sons.
- GORDON, P. & RICHARDSON, H. W. (1997) Are Compact Cities a Desirable Planning Goal? *Journal of the American Planning Association*, 63, 95–106.
- GOTLIEB, C. (2003) Un projet urbain pour une nouvelle identité. *Diagonale*, 16–19.
- GRAF, A. & PARRIAUX, A. (1996) Risques de contamination du sous-sol par les sondes géothermiques. Berne, BEW.
- HENARD, E. (1903) *Études sur les transformations de Paris et autres écrits sur l'urbanisme*, Editions L'Équerre.
- HOUMARD, J.-F. (2004) Grave Naturelle, grave recyclée, matériaux d'excavation : modélisation et perspectives pour le canton de Genève. ETHZ.
- ISHII, M., ISHIMURA, K. & NAKAYAMA, T. (1992) Management and application of Geotechnical Data : the Geotechnical Data Information System of the Tokyo Metropolitan Government. *Environmental Geology and Water Sciences*, 19, 169–178.
- ITA WORKING GROUP ON MAINTENANCE AND REPAIR OF UNDERGROUND STRUCTURES (1991) Report on the damaging effects of water on tunnels during their working life. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless*, 6, 11–76.
- JELINSKI, L. W., GRAEDEL, T. E., LAUDISE, R. A., MCCALL, D. W. & PATEL, C. K. N. (1992) Industrial ecology : Concepts and approaches. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89, 793–797.
- JEONG, H. S. & ABRAHAM, D. M. (2004) A decision tool for the selection of imaging technologies to detect underground infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 175–191.
- JOERIN, F., THERIALULT, M. & MUSY, A. (2001) Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assesment. *International Journal of Geographical Information Science*, 15, 153–174.

- JOHNSON, C. R., MCKENZIE, G. L. & PRICE, H., R. (2008) GEOPHYSICAL TOOLS FOR UNDERGROUND UTILITY AND INFRASTRUCTURE ASSESSMENT. *No-Dig Conference*. Dallas.
- KASANKO, M., BARREDO, J. I., LAVALLE, C., MCCORMICK, N., DEMICHELI, L., SAGRIS, V. & BREZGER, A. (2006) Are European cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 European urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 77, 111–130.
- KAUFMANN, O. & MARTIN, T. (2008) 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*, 34, 278–290.
- KENNEDY, C., CUDDIHY, J. & ENGEL-YAN, J. (2007) The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11, 43–59.
- KNAPP, B. (1987) L'urbanisme du sous-sol. *Droit de la construction*, 2, 27–32.
- KUSTER, J. & MEIER, H.-R. (2003) Monitoring de l'espace urbain, étude thématique A1 : l'évolution des villes et des agglomérations suisses, document de synthèse. IN (ARE), O. F. D. D. T. (Ed.). Berne.
- LANKA, M., BUTLER, A. & STERLING, R. (2001) Use of approximate reasoning techniques for locating underground utilities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16, 13–31.
- LARDON, S., MAUREL, P. & PIVETEAU, V. (2001) *Représentations spatiales et développement territorial*, Hermès Science.
- LE MOIGNE, J.-L. (1977) *La théorie du système général. Théorie et modélisation*, Paris, Presses Universitaires de France.
- LERNER, D. N. (2002) Identifying and quantifying urban recharge : A review. *Hydrogeology Journal*, 10, 143–152.
- LERNER, D. N. & BARRETT, M. H. (1996) Urban ground water issues in the United Kingdom. *Hydrogeology Journal*, 4, 80–89.
- LUND, J. W. & FREESTON, D. H. (2001) World-wide direct uses of geothermal energy 2000. *Geothermics*, 30, 29–68.
- MAIRE, P. (2010 (à paraître)) Acceptabilité humaine de l'espace souterrain urbain suisse : études de cas (titre provisoire). Lausanne, EPFL.
- MALCZEWSKI, J. (1999) *GIS and multicriteria decision making*, New York, John Wiley & sons, Inc.
- MALCZEWSKI, J. (2006) GIS-based multicriteria decision analysis : A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, 703–726.
- MALLET, J. L. (1997) Discrete modeling for natural objects. *Mathematical Geology*, 29, 199–219.
- MARINONI, O. & HOPPE, A. (2006) Using the analytical hierarchy process to support sustainable use of geo-resources in metropolitan areas. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 15, 154–164.
- MATTHEY, B. (1986) *Droit et énergies nouvelles*, Lausanne, Payot.
- MAVROULIDOU, M. & WOODS, R. I. (1997) Modelling falling and rising groundwater levels in cities. IN CHILTON, J. (Ed.) *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*. Rotterdam.
- MAYORAZ, R. (1993) Modélisation et visualisation infographiques tridimensionnelles de structures et propriétés géologiques.
- MOFFATT, S. & KOHLER, N. (2008) Conceptualizing the built environment as a social-ecological system. *Building Research and Information*, 36, 248–268.

- MONNIKHOF, R., EDELENBOS, J. & VAN DER KROGT, R. (1998) How to determine the necessity for using underground space: an integral assessment method for strategic decision-making. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13, 167–172.
- MORRIS, B. L., LAWRENCE, A. R. & FOSTER, S. S. D. (1997) Sustainable groundwater management for fast-growing cities : Mission achievable or mission impossible. IN ET AL. EDITORS, C. (Ed.) *Groundwater in the Urban Environment: Problems, Processes and Management*. Rotterdam, Balkema.
- NEWMAN, P. W. G. (1999) Sustainability and cities : Extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning*, 44, 219–226.
- OFEFP (1999) Directive sur la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais. Bern, Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage.
- OFEFP (2004) Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Bern, Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage.
- OFEV (2009) Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol. Aide à l'exécution destinée aux autorités et aux spécialistes de la géothermie. Bern, OFEV.
- OFFICE DU DÉVELOPPEMENT TERRITORIAL (2008) Des villes suisse attractives et compétitives : un équilibre multisectoriel entre centres et périphéries.
- PARRIAUX, A. (2009a) *Géologie – Bases pour l'ingénieur – 2ème édition*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- PARRIAUX, A. (2009b) *Geology Basics for Engineers*, Taylor & Francis.
- PARRIAUX, A., TACHER, L., GROSJEAN, G. & PHILIPPE, É. (2004) La nappe du Genevois – Illustration de son fonctionnement et de son intérêt vital pour Genève et sa région. Lausanne, EPFL.
- PARRIAUX, A. & TURBERG, P. (2007) Les géotypes, pour une représentation géologique du territoire. *Tracés*, 133, 11–17.
- PAUL, T. & CHOW, F. C. (1999) Availability and use of geotechnical information for urban planning. *COST C7 Workshop*. Thessaloniki.
- POINTET, A. (2007) Rencontre de la science de l'information géographique et de l'anthropologie culturelle : Modélisation spatiale et représentation de phénomènes culturels.
- POULIOT, J., BADARD, T. & DANIEL, S. (2008) La 3D en lien avec le métier de géomaticien : état des lieux. *Baliz-media.com*.
- POUX, A. (2008) 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. École centrale Nantes.
- PRÉLAZ-DROUX, R. (1995) Conception d'un système d'information à référence spatiale pour l'aménagement du territoire. Approche systémique et procédure de réalisation.
- ROCHAT, D., ERKMAN, S. & CHAMBAZ, D. (2006) Le recyclage des matériaux de construction à Genève. Genève.
- RÖNKA, K., RITOLA, J. & RAUHALA, K. (1998) Underground space in land-use planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13, 39–49.
- SAATY, T. L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, New York, McGraw-Hill.
- SIA (2005) 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.
- SIGNORELLI, S. (2004) Geoscientific Investigations for the use of shallow low-enthalpy systems.

- SIGNORELLI, S., SONNENFROH, F., KOHL, T. & RYBACH, L. (2008) Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz - Ausgabe 2007. Zurich, GEOWATT AG.
- STATISTICS DIVISION - BUREAU OF GENERAL AFFAIRS (2007) Population of Tokyo (estimates) and Tokyo economic calculation.
- STERLING, R. L. & GODARD, J.-P. (2000) Geoengineering considerations in the optimum use of underground space.
- STERLING, R. L. & GODARD, J.-P. (2001) Geoengineering considerations in the optimum use of underground space.
- THERIAULT, M. & PRELAZ-DROUX, R. (2001) Utilisation des SIG en aménagement du territoire. *Revue Internationale de géomatique*.
- THORENS, J. (1970) L'étendue en profondeur de la propriété foncière. *RDS*, I, 254–280.
- UN CENTRE FOR HUMANS SETTLEMENTS (1996) *An Urbanising World : Global Review of Human Settlements*, Nairobi, Habitat.
- UN HABITAT (2008) State of the World's Cities 2008/2009 – Harmonious cities. IN PRO-GRAMME, U. N. S. (Ed.). London.
- UTUDJIAN, E. (1952) *L'urbanisme souterrain*, Paris.
- VÄHÄÄHO, I. T., KORPI, J. & ANTTIKOSKI, U. (2004) Use of underground space and geo-information in Helsinki.
- VÁZQUEZ-SUNE, E., SÁNCHEZ-VILA, X. & CARRERA, J. (2005) Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13, 522–533.
- VÁZQUEZ-SUÑE, E., SÁNCHEZ-VILA, X., CARRERA, J. & MARIZZA, M. (1997) Rising groundwater levels in Barcelona: Evolution and effects on urban structures. IN ET AL., C. (Ed.) *Groundwater in the Urban Environment : Problems, Processes and Management*. Rotterdam, Balkema.
- VÁZQUEZ-SUÑE, E., SÁNCHEZ-VILA, X. & ELLIS, B. (1999) Groundwater modelling in urban areas as a tool for local authority management : Barcelona case study (Spain). *Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality*. Birmingham, United Kingdom, International Association of Hydrological Sciences.
- VÁZQUEZ-SUNE, E. & SÁNCHEZ-VILLA, X. (2003) Urban groundwater. Barcelona city case study.
- WADE, T. & SOMMER, S. (2006) *A to Z GIS – An illustrated dictionary of geographic information systems*.
- 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. A., MORRIS, B., MANSOUR, M., SOUVENT, P., CENCUR-CURK, B., VIZINTIN, G., VOETT, U., ARRAS, A., HÖRING, K. & REHM-BERBENNI, C. (2005) Assessing and Improving Sustainability of Urban Water Resources and Systems. Karlsruhe, Eu-Project.
- WOLF, L., MORRIS, B. & BURN, S. (2006) *Urban water resources toolbox – Integrating groundwater into urban water management*, London, IWA publishing.
- WORBOYS, M. & DUCKHAM, M. (2004) *GIS : a computing perspective*, CRC press.
- YATCHINOVSKY, A. (2000) *L'approche systémique, pour gérer l'incertitude et la complexité*, ESF.
- ZERBI, S. (2008) Construction en pierre massive en Suisse. Le cas des Tre Valli au canton du Tessin. *6th Swiss Geoscience Meeting*. Lugano.

ZUFFEREY (2004) Le domaine public comme domaine juridique. Réflexion critique mais respectueuse. *Le domaine public : Journée du droit administratif 2002*. Genève—Zürich—Bâle, Schulthess.



Rapport de recherche PNR 54

Projet Deep City Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains

Dans le cadre du PNR 54 « Développement durable de l'environnement construit », le projet Deep City a montré sa spécificité et son innovation dans les domaines de la gestion des ressources et de l'urbanisme. Son originalité repose essentiellement en deux points :

- Deep City est le seul projet du programme à intégrer la dimension du sous-sol de la ville dans le développement urbain.
- Deep City a la particularité de considérer le sous-sol comme une ressource à usages multiples, servant aussi bien à la construction souterraine, à la valorisation des géomatériaux excavés, à la géothermie et à la production d'eau potable.

Considérer le sous-sol de manière holistique permet de développer des synergies entre ses différents usages et de prévenir les conflits. La démarche sectorielle qui prévaut encore aujourd'hui n'autorise pas cette synthèse et conduit à un gaspillage difficilement réparable du sous-sol et inhibe un développement harmonieux de la ville en surface. Le projet Deep City propose une méthodologie basée sur un changement de paradigme : il tend à abandonner une gestion « des besoins aux ressources » au profit d'une gestion « des ressources aux besoins », seule compatible avec un développement durable. Pour mettre en place cette nouvelle gestion, il faut introduire un aménagement du territoire à trois dimensions et non plus à deux comme aujourd'hui. Des propositions sont faites pour que cette notion soit incluse dans la Loi. Les applications de cette méthodologie dépassent beaucoup la Suisse et rendront services aux grandes zones urbaines de par le monde.

Les auteurs :

Aurèle Parriaux, Pascal Blunier, Pierrick Maire, Guillaume Dekkil, Laurent Tacher

Editeur : Fonds national suisse FNS – au service de la recherche scientifique.

Publié avec l'appui du Fonds national suisse de la recherche scientifique.