

Gestion durable des ressources souterraines de la ville : le concept “Deep City”

Urban sustainable underground resources management: the “Deep City” concept

Huan-Qing LI
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
huanqing.li@epfl.ch

Aurèle PARRIAUX
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
aurele.parriaux@epfl.ch

*La version originale anglaise de cet article a été publiée dans les comptes-rendus du Congrès de l’AFTES à Lyon, 2011 /
The original English version of this paper was published in the proceedings of the 2011 AFTES Congress in Lyon.*

L’urbanisation posant de nombreux problèmes environnementaux en surface, la solution consistant à utiliser l’espace souterrain urbain suscite de plus en plus d’intérêt chez les urbanistes : le but est de rendre la ville plus compacte en implantant en souterrain des infrastructures et des bâtiments. Cependant, la quantité de sous-sol utilisable se heurte à des difficultés croissantes dues à la “congestion” des couches supérieures et à des problèmes géo-environnementaux tels que la pollution des eaux et les tassements. Tous ces aspects négatifs imposent :

1/ de définir un cadre intégré de planification et de gestion de l’espace souterrain.

D’abord, les interventions publiques doivent être clarifiées au sein d’une structure centrale permettant d’exercer une fonction régaliennne de coordination. Ensuite, une étude économique générale doit être lancée, basée sur l’analyse des besoins socio-économiques et l’évaluation de l’offre d’espace souterrain disponible. Enfin, des stratégies administratives et managériales doivent guider l’urbanisme souterrain.

2/ d’avoir une approche globale de la gestion du sous-sol urbain. Ainsi, la méthode “Deep City” tient compte de tous les types de ressources : l’espace 3D disponible en sous-sol, l’eau souterraine potable, les matériaux excavés susceptibles d’être valorisés, et la ressource géothermique utilisable pour le chauffage et la climatisation. Dans le processus d’urbanisation, de nombreux conflits peuvent opposer ces quatre éléments (ainsi, lors des

Since urbanization has been causing numerous environmental problems on the surface land, the solution of urban underground space development gained more and more interest of urban planners, by placing infrastructures and buildings below the surface land to make the city more compact. However, the attractive subsurface faced more and more problems such as subsurface congestion at the shallow layers, and many geo-environmental issues like groundwater pollution and land subsidence. All of these negative effects call for:

1) An integrated planning and management framework of underground space use.

Firstly, institutional interests will be clarified within a stakeholder structure, enabling to activate governmental regulatory coordination mechanism.

Secondly, a comprehensive economic assessment study will be put forward, composed of socio-economic demand analysis and potential evaluation of geo-space supply.

Finally, administrative and management strategies will be proposed to guide the subsurface urbanism.

2) A holistic approach of urban underground resources management (named DEEP CITY methodology), for the resources including the underground space to construct, the groundwater for drinking use, the excavated geomaterial to be reused and the geothermal energy for domestic heating and cooling. During urban development, many conflicts happened between these elements (for example, metro construction caused groundwater

travaux de construction d'un métro, un aquifère peut être pollué suite au percement d'une couche étanche protectrice) mais beaucoup de synergies et d'opportunités gagnantes-gagnantes existent entre eux (par exemple les structures géothermiques intégrées au génie civil). Pour les urbanistes, les décisions optimales imposent d'avoir une vision claire sur les perspectives à long terme d'un développement durable.

pollution by crossing the protective soil layers); however, there are also many synergies as opportunities to attain "win-win" goals between different services (for example, energetic geos-structures integrated into underground construction).

For urban planners, optimal decision-making of urban development depends on clear vision on the long term perspectives directing to sustainability.

1 - Introduction : l'interdépendance entre la ville et le sous-sol

La ville est considérée comme un moteur économique du monde ; cependant, sa croissance est limitée par les ressources naturelles. Il y a une centaine d'années, pour le choix d'un site de ville nouvelle, l'environnement géologique était reconnu comme un facteur critique pour le développement à long terme. La géologie urbaine influence la création urbaine et son exploitation à long terme par des facteurs tels que la nature des sols de fondation des immeubles, une quantité suffisante de matériaux pour l'industrie de la construction, la sécurité de l'approvisionnement en eau pour les besoins industriels et domestiques, des ressources minérales proches - telles que pétrole et métaux - pour les activités de production et de bonnes conditions de sécurité vis-à-vis des catastrophes naturelles. Malheureusement, l'espace souterrain urbain s'est toujours trouvé au-delà de notre visibilité jusqu'à ce que nous ayons à faire face à un appauvrissement de ses ressources naturelles et à subir des catastrophes géo-environnementales telles que séismes, glissements de terrain, intrusions d'eau de mer ou tassements. Il en résulte que le développement urbain sur le long terme doit commencer par une reconsidération du modèle de planification dans l'espace et de gestion des ressources naturelles, en particulier du modèle qui permet un développement synergique de la ville et de son sous-sol.

1.1 - Le sous-sol urbain

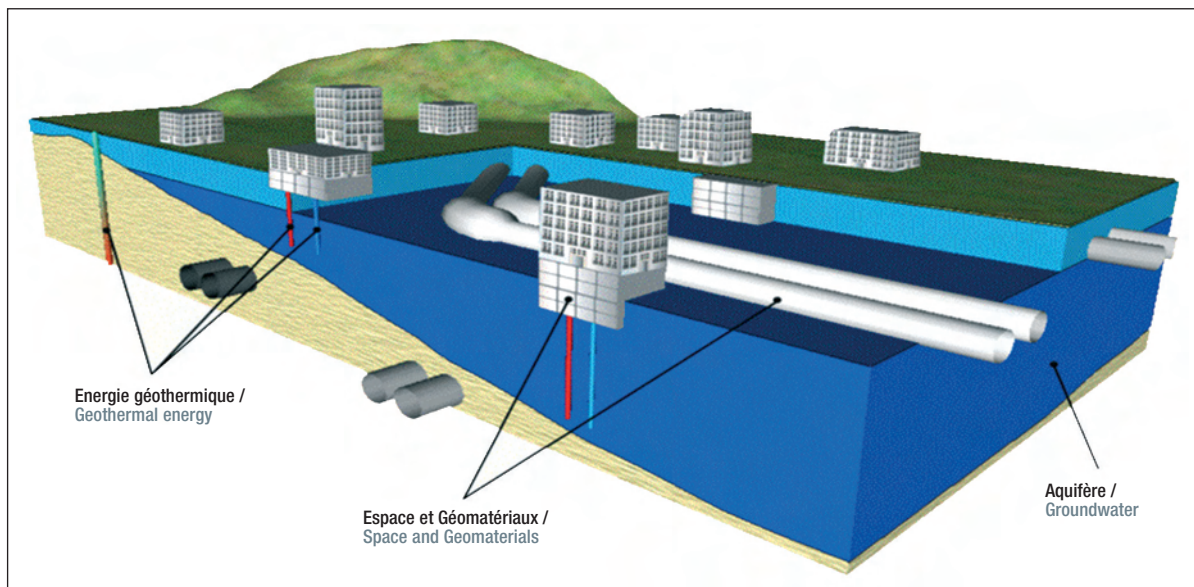
En 2050 près de la moitié de la population mondiale vivra dans des villes [1]. Comment absorber ces migrations démographiques et préserver leur rang social dans une sphère économique en progrès, c'est le souci primordial des hommes politiques. Les activités humaines et les fonctions urbaines sont de plus en plus diversifiées, ce qui appelle une utilisation très intégrée de l'espace urbain. Les activités humaines et les fonctions urbaines sont de plus en plus diversifiées et appellent ainsi à un usage fortement intégré de l'espace urbain. La construction de gratte-ciel est une option, mais pas la seule ; l'espace souterrain suscite un intérêt de plus en plus grand pour les architectes [2] et les urbanistes. Divers bâtiments commerciaux et institutionnels peuvent être placés dans le sous-sol urbain afin de préserver plus d'espace en surface et de bénéficier ainsi de plusieurs avantages au plan environnemental (isolation vis-à-vis du bruit, température stable, économies d'énergie, protection du paysage, etc.) [3]. Les infrastructures publiques peuvent également être placées entièrement en sous-sol afin d'économiser sur les demandes d'urbanisation en surface telles que systèmes de transport, réseaux de services publics et installations de stockage ou de dépôts [4]. On estime que le potentiel de gain offert par l'utilisation du sous-sol est de 5-15 % en périphérie de ville jusqu'à 100 % pour les zones

1 - Introduction: the interdependency between city and subsurface

City is considered as an economic engine of the world; however, its growth is constrained by natural resources. Site selection to plan new cities about 100 years ago has been recognized the geological environment as a critical factor for long-term development. Urban geology influences urban generation and stable exploitation, by providing soil foundation for buildings, sufficient material for construction industry, secure groundwater provision for domestic and industrial need, proximate mineral sources such as oil and metal for production activities, and safe conditions against natural disasters. Unfortunately, urban subsurface territory has been always beyond our visibility until we encounter shortage of these resources and suffer geo-environmental disasters (such as earthquake, landslide, seawater intrusion and land subsidence). As a result, long-term development of cities should start by rethinking the pattern of spatial planning and resources management, especially the pattern to enable synergetic development of the city and its subsurface.

1.1 - Urban Subsurface

By the year of 2050, there will be nearly half of the world population living in cities [1]. How to absorb these demographical migrations and retain their social dignity inside the advancing economic sphere are essential concerns for policy makers. Human activities and urban functions are becoming more and more diversified, which call for highly integrated usage of urban space. High-rise building is an option but not the only, below-ground level is gaining more and more attention among architects [2] and city planners. Various commercial and institutional buildings can be placed under urban surface, for the purpose of gaining more surface land and benefiting environmental advantages (noise isolation, stable temperature, energy saving, protect landscape, etc) [3]. Public infrastructures can be also placed totally underground to economize urban land supply, such as transport systems, utility networks, and storage or deposit facilities [4]. It is estimated that the possible gain offered by subsurface in urban space ranges from 5-15% for city environments, up to 100% for infrastructure areas [5]. This figure will be attractive for land administrators, who are responsible to allocate scarce land resources rationally, particularly to protect farmlands conversion for the aim to ensure national food provision security. Meanwhile, spatial planners are also attracted by the economic potential of subsurface utilization [6]. The scale of subsurface construction has been growing rapidly among world metropolises, including Paris, Tokyo, Montreal, Helsinki, Shanghai, etc. Their functional types evolve from unique infrastructure (metro, road, pipeline, shelter) to social place (shopping center, theater,



d'infrastructures [5]. Ce chiffre devrait être attrayant pour les urbanistes qui sont chargés d'allouer les ressources foncières de façon rationnelle et, en particulier, de protéger les terres agricoles afin d'assurer la sécurité de l'approvisionnement alimentaire national. Quant aux urbanistes, ils sont également attirés par le potentiel économique de l'utilisation du sous-sol [6].

Le niveau de construction en sous-sol a connu une croissance rapide dans les grandes métropoles mondiales telles que Paris, Tokyo, Montréal, Helsinki, Shanghai, etc. Leurs types de fonctionnalité vont des seules infrastructures (métro, route, pipeline, abri) aux lieux publics (centre commercial, théâtre, musée, centre sportif), conférant ainsi une dimension de plus en plus vivante à l'espace souterrain. Avec l'augmentation du nombre de logements pour absorber la population urbaine, les services sociaux connexes deviennent indispensables pour créer des quartiers agréables à vivre et l'exploitation rationnelle de l'espace souterrain aura un rôle important à jouer pour accompagner la croissance urbaine.

1.2 - Ressources souterraines

Outre ses ressources en tant que volume utilisable, le sous-sol représente un espace riche qui possède de nombreuses ressources naturelles précieuses pour aider à la vie urbaine [7].

1) Les eaux souterraines : de nombreuses villes dépendent des eaux souterraines pour leurs besoins de consommation domestique, et la préservation locale de ces eaux, tant en quantité qu'en qualité, représente d'énormes économies financières par rapport au coût d'adductions à longue distance et d'un traitement excessif. Face à la croissance démographique, cette question devient une priorité dans la sphère du bien-être social. La plupart des nappes situées sous des zones construites sont polluées alors que leur recharge naturelle et la dissémination de la pollution peuvent prendre du temps. Pour éviter de souffrir dans l'avenir d'une crise de manque d'eau, la protection de ces ressources devrait figurer au plus tôt sur les agendas politiques.

2) Les géomatériaux : les déblais devraient être recyclés et réutilisés comme

museum, sports center), representing a more and more lively dimension of subsurface territory. Along with the increasing housing provision to absorb urban population, related social services become indispensable to form livable neighborhoods. Rational exploitation of underground space will play an important role for urban growth.

1.2 - Underground Resources

Besides space resources, subsurface is a rich territory possessing other valuable natural resources to support urban life [7].

1) Groundwater: as many cities rely on groundwater for domestic drinking need, its local conservation of quantity and quality represents huge economic savings from long-distance water conveyance and excessive treatment. Facing population increase, this issue becomes a priority within social welfare sphere. Most of the groundwater beneath construction area is polluted, while natural recharge and dissimilation take time. To avoid suffering from future water crisis, protection of these resources should be on the nearest political agendas.

2) Geomaterial: excavated material should be recycled and reused as an input for construction industry. As reported from the city of Geneva, most of the excavated material during civil works is not recycled and generated large pressure for landfills. Paradoxically, the shortage of construction material is urgent due to limited quarries exploitation. Municipal initiatives have to be launched in order to sensitize contractors and project owners, in terms of reducing landfills, increasing recycling and promoting material valorization1.

3) Geothermal energy: shallow ground source is a clean and renewable energy, which is developed widely in European countries like Sweden, Austria and Switzerland[8]. Facing the trend of reducing the share of fossil fuels utilization due to its threat to climate change, geothermal energy exploitation will be an economically attractive option for domestic heating and cooling, which represents 40% of urban power demand.

To illustrate the underground management issues, section 2 will focus on the planning and management framework of urban underground space, drawing

apport à l'industrie de la construction. A Genève, par exemple, la plupart des matériaux excavés lors des travaux de génie civil ne sont pas recyclés, ce qui génère de gros problèmes au niveau des sites de décharges. Paradoxalement, le problème de la pénurie en matériaux de construction se pose de manière urgente en raison de la limite d'exploitation des carrières. Des initiatives municipales doivent être lancées afin de sensibiliser les entrepreneurs et les maîtres d'ouvrage sur les questions de diminution des décharges et d'augmentation du recyclage et la valorisation des matériaux.

3) L'énergie géothermique : c'est une source d'énergie peu profonde, propre et renouvelable, largement exploitée en Europe dans des pays tels que la Suède, l'Autriche et la Suisse [8]. Face à la tendance à réduire la part d'utilisation des énergies fossiles en raison des menaces qu'elle représente pour le changement climatique, l'exploitation de l'énergie géothermique est une option économiquement intéressante pour le chauffage et la climatisation domestiques qui représentent 40 % de la demande électrique urbaine.

Pour illustrer ces problèmes de gestion de l'espace souterrain, le paragraphe 2 met l'accent sur le cadre de planification et de gestion de l'espace souterrain urbain, élaboré à partir des implications économiques et des préoccupations institutionnelles relatives au développement de l'utilisation du sous-sol; quant au paragraphe 3, il portera sur la gouvernance globale des ressources souterraines pour une croissance urbaine durable.

2 - Cadre de planification et de gestion de l'utilisation de l'espace urbain d'un point de vue économique et institutionnel

Considérant que la planification de l'espace souterrain urbain implique de multiples facteurs environnementaux, socio-économiques et institutionnels, le cadre de planification doit être pragmatique et exhaustif afin d'impliquer toutes les parties prenantes dans le processus décisionnel. Cette partie est divisée en 3 sections : l'analyse de la réglementation et des intervenants, puis l'évaluation économique, enfin les procédures administratives et les stratégies de gestion.

2.1 - Analyse des règlements et des intervenants

Pour réussir un projet de construction en sous-sol, que ce soit pour un investissement public de grande envergure ou un investissement privé plus modeste, divers facteurs de nature "matérielle" ou "immatérielle" doivent être nécessairement intégrés. Les facteurs "matériels" comprennent la mise à disposition des terrains, la technologie utilisable, le capital financier disponible, la qualification de la main d'œuvre, les parties prenantes, tandis que les facteurs "immatériels" incluent les directives réglementaires, les autorisations légales et les outils de gestion. L'autorité administrative, en tant que propriétaire, joue un rôle de premier plan dans tous les grands projets de transformation urbaine ; les intérêts de cette autorité, à plusieurs niveaux hiérarchiques, déterminent les cadres réglementaires de ces projets et les modes de réflexion. Une structure de réseau institutionnel et de règlements connexes est décrite dans le tableau 1 ci-après.

through economic implications and institutional concerns of subsurface development; section 3 will focus on integrated governance of urban underground resources for sustainable urban growth.

2 - Planning and management framework of urban underground space use: from economic and institutional point of view

Considering that the planification of urban underground space refers to multiple environmental factors, broad socio-economic factors and different institutional factors, a framework for planning practices should be comprehensive and pragmatic to involve all the stakeholders into decision-making process. This section is divided into 3 sub-sections: stakeholder and regulation analysis, economic assessment, administrative procedure and management strategies.

2.1 - Stakeholder and regulation analysis

In order to succeed an underground construction project, no matter for large scale government-invested ones or smaller private-invested ones, different components as "hardware" and "software" are to be necessarily integrated. The "hardware" includes land disposition, feasible technology, available financial capital, labour qualification and operation bodies, while the "software" here includes regulatory guidelines, legal permission and management tools. Government as a city owner is playing a leading role through all the major urban transformation projects. Intra-governmental interests upon different hierarchies determine their regulatory patterns and mental modes. Structure of the institutional network and related regulations as showed on table 1.

1 - Project ECOMAT_GENEVA : http://etat.geneve.ch/dt/environnement/ecomat/ecomat_829.html

Intervenants / Stakeholder parties	Objectifs principaux / Main objectives	Règlements correspondants / Related regulations
Commission économique pour la planification / Economic Planning Commission	Promotion de la croissance économique urbaine par approbation de projets potentiels à des promoteurs qualifiés / Promotion of urban economic growth by delivering approval for potential projects to qualified developers.	Plan macro-économique, Agenda économique national, Plan de financement public, Règles d'investissement, etc / Macro-economic plan, National Economic agenda, Public finance plan, Investment regulations, etc.
Département de l'Aménagement du territoire / Land Management Department	Allocation des ressources foncières, en insistant sur la protection des terres agricoles. Gestion des droits de propriété par un système de transaction et d'enregistrement fonciers / Allocation of land resources, emphasizing on farmland protection. Management of property rights under land transaction and registration system.	Règlement de l'Administration du Territoire, Code civil sur les droits de propriété, Régulation du marché de la propriété foncière, etc / Law of Land Administration, Civil Code on property rights, Regulation on Land property market, etc.
Département du Plan d'urbanisme / Urban Planning Department	Promotion de l'accroissement d'espaces utilisés par attribution de fonctions urbaines (commerciales, industrielles, résidentielles, espaces publics) à la zone désignée. Elaboration d'un plan détaillé et de lignes directrices pour la conception de projets de construction afin d'en assurer la qualité / Promotion of spatial growth by allocating urban functions (commercial, industrial, residential, public space) on designated area. Establishment of detail planning and design guidelines for construction projects to ensure quality.	Règlement sur la planification de l'espace urbain, Normes relatives au plan d'urbanisme et lignes directrices, etc. / Law on spatial planning, Urban Planning standards and guidelines, etc.
Département de la Construction Urbaine / Urban Construction Department	Gestion des travaux de construction en suivant des lignes directrices opérationnelles pour les travaux de génie civil. Standardisation de la gestion des projets de construction urbaine pour les entrepreneurs et les maîtres d'ouvrage / Management of construction works by establishing operational guidelines for civil engineering. Standardization of urban construction project management for contractors and owners.	Règlement de construction urbaine, Règles de construction, Règlements sur la consommation énergétique des ouvrages, Loi sur la protection incendie et la sécurité, etc / Law on urban construction, Building standards, Building energy consumption standards, Law on Fire Protection and Security, etc.
Département du secteur immobilier et du logement / Real Estate and Housing Department	Gestion des propriétés immobilières par création de droits et obligations / Management of real properties by establishing obligations and rights.	Loi sur les propriétés immobilières, etc / Real Estate Law, etc.
Département des infrastructures urbaines / Urban Infrastructure Department	Fourniture d'équipements publics, y compris moyens de transport, alimentation en eau, égouts, distribution d'énergie et réseaux de communication. Normalisation de la conception des infrastructures publiques pour garantir de bonnes prestations sociales / Provision of public facilities, including transport system, water and sewage system, energy utility, and communication networks. Standardization of public infrastructure project design to ensure social benefits.	Loi sur les infrastructures urbaines, Règlements sur les concessions d'infrastructures publiques, etc / Law on urban infrastructure, Regulations on concessions for public infrastructures, etc.
Département de la Protection de l'Environnement / Environmental Protection Department	Rapport sur les contrôles de l'impact environnemental des projets de construction. Promotion de la protection des ressources naturelles en imposant des normes adaptées à chaque situation / Control environmental impact assessment for construction projects. Promotion of natural resources protection by imposing related standards according to natural carrying capacities.	Loi sur la protection de l'environnement. Loi sur la gestion des déchets, Règles d'évaluation des impacts environnementaux, etc / Law on Environmental Protection, Law on Waste Management, Regulations on Environmental Impact Assessment, etc.
Département de la Défense Civile / Civil Defense Department	Fourniture d'abris de première urgence et de systèmes d'évacuation en cas de catastrophe et d'urgence / Provision of basic shelters and evacuations during disaster and emergency.	Loi sur la Défense civile, etc / Law on civil defense, etc.

Tableau 1 - Structure des intervenants et règlements / Stakeholder structure and regulations.

De même que pour les projets de construction conventionnels en surface, tout projet de développement en sous-sol doit passer par tous les organismes municipaux compétents, afin de permettre d'éviter les conflits avec des infrastructures ou ouvrages existants ainsi que les incompatibilités vis-à-vis de l'environnement.

Etant donné que, au cours de ces dernières décennies, de plus en plus de pays cherchent à promulguer des lois de planification sur le développement de l'espace souterrain, le cadre réglementaire devrait donc être plus largement développé. Dans ce cadre, l'harmonisation des intérêts intra-gouvernementaux pourrait contribuer à faciliter les projets de construction et à promouvoir le développement durable de l'espace souterrain.

2.2 - Évaluation économique

Le développement de l'espace souterrain, en tant que solution durable pour le renouvellement de centres urbains surpeuplés et la modernisation d'infrastructures publiques, devrait être économiquement viable. L'optimisation de l'utilisation de l'espace souterrain doit prendre en compte les demandes socio-économiques ainsi que les possibilités d'exploitation des ressources du sous-sol.

2.2.1 - Côté "demande" - valeur commerciale de l'espace souterrain

Les technologies de construction souterraine continuant à progresser, le coût de la construction, part importante de l'investissement initial, a tendance à décroître. Toutefois, en matière de planification urbaine, le modèle et l'amplitude de l'usage de l'espace souterrain ne sont pas exactement alignés sur les innovations techniques. L'évaluation économique exhaustive doit prendre en compte d'autres déterminants forts tels que les besoins et les préférences des usagers quant à leurs préoccupations en matière d'espace, d'environnement ou encore d'énergie.

Selon les différentes motivations de construction, le développement en souterrain peut être classé en trois typologies:

1) (type classique) - Infrastructures naturellement situées en souterrain :

Exemples : réseaux de distribution d'eau potable et réseaux d'eaux usées, abris de défense civile, installations géothermiques...

2) (situation de congestion) - Infrastructures publiques placées en souterrain en raison d'une situation de congestion en surface :

Exemples : métro, tunnel routier, réseau piétonnier...

3) (type optionnel) - Constructions publiques et privées qui s'avèrent mieux situées en souterrain vis-à-vis de critères divers tels que l'apparence physique, la protection du paysage, l'isolation acoustique, la stabilité thermique, la transparence :

Exemples : parking, centre commercial, stockage d'énergie, services publics, stockage de produits alimentaires, dépôt de marchandises, lieu culturel, centre sportif, salle de conférence, laboratoire scientifique...

Afin d'aider à prévoir la demande pour ces types d'utilisation de l'espace souterrain, le tableau 2 propose une série d'indicateurs urbains qui donnent un aperçu des diverses implications.

Similar to conventional surface construction projects, subsurface development should go through all related management bodies within municipal institutional structure, for the aim to avoid conflicts with existing infrastructures and buildings, as well as to avoid incompatibility with natural environment. Since during the latest decades, more and more countries are trying to establish planning laws on underground space development, the regulatory framework should be enlarged to a broader extent. Harmonizing the intra-governmental interests within the framework could help to facilitate construction projects and promote sustainable subsurface exploitation.

2.2 - Economic assessment

Developing Urban subsurface as a sustainable option for renewing congested urban centers and for updating public infrastructures, should be economically viable. Optimization of underground space use has to take into account social-economic demand and possible supply of geo-space resources.

2.2.1 - Demand side – commercial value of subsurface

Because underground construction technologies keep advancing, construction cost as an important part of initial investment is decreasing. However, for urban planning practices, the pattern and quantity of using underground space is not perfectly aligned with engineering innovation. Other dynamic determinants have to be integrated into the comprehensive economic assessment, such as the needs and preferences of the users on spatial and environmental concerns, as well as energy concerns.

According to different construction motivations, below-ground development can be classified into three typologies:

1) (conventional type) Infrastructures naturally placed underground:

Examples: water and sewage utility, civil defense shelter, geothermal probes;

2) (congestion type) Public infrastructures placed underground due to surface congestion:

Examples: subway, road tunnel, pedestrian network;

3) (optional type) Public and private constructions that are better placed underground due to miscellaneous preferences (such as physical appearance, landscape protection, sound isolation, stable temperature, seamless structure):

Examples: parking, shopping center, energy storage and utility, food storage, merchandise deposit, cultural place, sports center, conference room, scientific laboratory.

To forecast the demand for these underground types, a series of urban indicators (showed on table 2) could provide insight implications:

Densité d'urbanisation / Urban density
Prix des terrains / Land prices
Taux de croissance démographique / Population growth rate
Taux de croissance de l'emploi / Employment growth rate
Contraintes d'utilisation des terrains / Land use pressure
Sensibilité du public à l'esthétique urbaine / Social sensitivity to urban aesthetics
Sensibilité politique aux économies d'énergie / Political sensitivity to energy saving

Tableau 2 : Système d'indices socio-économiques / Socio-economic index system.

Le coût de construction est également un facteur important pour les décisions relatives à un projet. Construire en souterrain est plus coûteux que construire en surface en raison des structures de fondation plus importantes et des risques géotechniques. Cependant, compte tenu de l'augmentation du prix des terrains en centre ville, la part du coût de construction devient faible par rapport à l'investissement total. Les villes vont connaître différents scénarios quant à leur niveau socio-économique, allant d'une croissance économique forte vers une croissance moyenne, puis faible. Les problèmes liés aux investissements varieront au cours de ces périodes, avec un apport important de capitaux et une production au plus haut niveau de qualité pendant les périodes de forte croissance économique. Une étude plus approfondie de ces facteurs pourrait aider les urbanistes à comprendre quels types de développement souterrain sont nécessaires en fonction des conditions spécifiques, et à décider de la part optimale d'utilisation du sous-sol qui permet de répondre à ces besoins et à ces choix.

2.2.2 - Côté "offre" - constructibilité du sous-sol

L'espace souterrain étant partie intégrante du « géo-environnement », son développement est limité par les conditions naturelles et les constructions existantes. Une étude géologique fournit des informations utiles aux administrateurs fonciers pour évaluer le potentiel en qualité et en quantité de l'espace souterrain à urbaniser.

Alors que l'évaluation de la demande définit la valeur commerciale et les besoins sociaux de développement du sous-sol en milieu urbain, l'évaluation de l'offre fournira aux administrateurs fonciers une vision de la gestion de l'espace souterrain. Le potentiel constructible peut être visualisé sur un modèle 3D pour définir les couches de terrain et les volumes de sol ou de rocher excavables. Pour faire la synthèse des informations géologiques et géotechniques avec des indicateurs compréhensibles pour des non-spécialistes, notre étude considère deux grandes catégories pour qualifier et quantifier le potentiel physique d'un espace souterrain ².

1) Indicateur qualitatif - Degré de difficulté

Il est déterminé par les conditions naturelles, en tenant compte des paramètres géologiques, hydrogéologiques et géotechniques ; un système d'indexation des degrés de difficulté est présenté dans le tableau 3 ci-après :

	Indices	Profondeur / Depth
Etat de stabilité régional et conditions sismiques et géologiques / Regional stability and seismic geologic condition	Faillles actives / Fault activity	0-100
	Intensité sismique / Seismic intensity	
	Classification du site vis-à-vis de la constructibilité / Site classification for construction	0-20
Topographie et géomorphologie / Topography and geomorphology	Unité géomorphique / Geomorphic unit	0-100
Propriétés géotechniques / Geotechnical engineering properties	Propriétés et épaisseur des sols tendres / Properties and thickness of soft soil	0-30
	Indice de liquéfaction des sols sableux / Liquefaction index of sandy soil	0-20
	Épaisseur de la couche de sol liquéfiable / Thickness of liquefaction soil layer	0-20

Construction cost is also an important determinant for project decisions. Underground construction is more costly than surface construction, due to additional soil foundation structures and geo-engineering risks. However, compared to the boosting land prices in central urban area, the share of construction cost becomes small in the total project investment. Cities will go over different levels of social economic scenario, from strong economic growth, to average economic growth, then down to weak economic growth. Investment concerns differ during these transitions, with abundant capital input and the highest quality output during strong economic growth period.

A more profound study for these factors could help city planners to understand which types of underground development are needed based on specific conditions, and to decide optimal subsurface quantity allocation to meet these needs and preferences.

2.2.2 - Supply side - constructability of subsurface

Since underground space is an integral part of geo-environment, its development is constrained by natural conditions and existing built environment. Geological survey provides useful information for land administrators to evaluate potential quality and quantity of underground space to be urbanized.

While demand evaluation reveals the commercial value and social need of subsurface development in urban area, supply evaluation will provide land administrators a vision of subsurface land management. The potential to construct can be visualized on 3D model to know the layer and volume of excavatable soil or rock. To synthesize the geological and geotechnical information into understandable indicators for non-experts, our study put forward two main categories to qualify and quantify the physical potential of subsurface land ².

1) Qualitative indicator - Difficulty degree

It is determined by natural conditions, taking into account geological, hydro-geological, and geotechnical factors, possible difficulty degree index system is show on table 3:

Conditions hydrogéologiques / Hydrogeology condition	Caractéristiques et répartition des nappes aquifères / Aquifer characteristics and distribution	0-100
	Débit d'un puits isolé / Inflow of single well	
	Causticité des eaux / Groundwater causticity	
	Faillles aquifères dans le bed-rock / Watery faults in bed rock	
Topographie et géomorphologie / Topography and geomorphology	Unité géomorphique / Geomorphic unit	0-100
Risques géologiques / Geological hazards	Zone karstique / Karst area	0-100
	Ancienne mine / Goaf area	
	Fissure / Ground fissure	

Tableau 3 : Système d'évaluation du degré de difficulté / Difficulty degree evaluation system Indices.

2 - D'après le projet de recherche en cours « Deep City China » en collaboration avec l'Institut de l'Espace souterrain et de Géo-environnement de Nanjing (IUSG – Université de Nanjing). Les conditions géologiques du site de recherche sont essentiellement des dépôts alluvionnaires de sols mous / Based on the ongoing research project "Deep City China" collaborated with Nanjing Institute of Underground Space and Geo-environment (IUSG-Nanjing University). Geological condition of the research site is dominated by alluvial soft soil deposit.

2) Indicateur quantitatif - Volume potentiel

Il est déterminé par les contraintes de l'environnement bâti existant et des règlements d'urbanisme ; le tableau 4 ci-après donne un indice d'évaluation du volume potentiel utilisable.

2) Quantitative indicator - Potential volume

It is determined by existing built environment constraints and urbanism regulations; possible potential volume index system is showed on table 4:

	Profondeur / Depth
Zone protégée par habitant / Protection area per capita	0-100
Niveau de protection de la zone architecturale / Protection level of architectural area	0-100
Hauteur limite des bâtiments / Building height limit	0-100
Répartition des conduites enterrées / Distribution of underground pipelines	0-10
Conservation du patrimoine / Heritage conservation	0-100
Sensibilité de la zone éco-protégée / Sensitivity of ecological protection area	0-100

Tableau 4 : Indices d'évaluation du volume potentiel utilisable / Potential volume evaluation system Indices.

Sur la base de ces deux catégories, d'autres travaux de recherche seront menés en vue de formuler une évaluation multi-critères exhaustive combinant le Processus d'Analyse Hiérarchisée et des outils GIS pour démontrer le potentiel de constructibilité avec visualisation 2D et 3D sur la zone urbaine sélectionnée. Avoir une bonne compréhension de la zone urbaine "excavable" est essentiel pour définir une exploitation durable. Alors que les planificateurs urbains pourraient désigner un type fonctionnel et une échelle de développement du sous-sol, les gestionnaires de terrains pourraient identifier les potentiels des zones urbaines dont le sous-sol pourrait être alloué aux promoteurs. Ce processus coordonné permettrait l'exploitation rationnelle de l'espace souterrain urbain, en respectant le principe de gestion durable "des ressources aux besoins".

Based on these two categories, further research work will be carried on to formulate comprehensive multi-criteria evaluation coupling Analytic Hierarchy Process and GIS tools to demonstrate constructability potential with 2D and 3D visualization on selected urban area.

Having a good understanding of excavatable urban area is critical for sustainable exploitation. While urban planners could designate functional type and scale of subsurface development, land resources managers could identify potential urban zones and layers to allocate subsurface land disposition for developers. This coordinated process enables rational exploitation of urban underground space, respecting the sustainable management principal of "from resources to need".

2.3 - Procédure administrative et stratégies de management

2.3 - Administration procedure and management strategies

En portant une vue globale sur les facteurs économiques et institutionnels, une procédure de gestion pragmatique pourrait être formulée afin d'orienter les décideurs et les investisseurs vers l'optimisation du développement immobilier de l'espace souterrain.

After catching a global view of economic factors and institutional factors, pragmatic management procedure could be formulated to guide governors and developers the way to optimize underground space and property development.

- 1) Lancer des lignes directrices générales rédigées par des organismes législateurs visant à sensibiliser l'opinion sur le développement rationnel du sous-sol basé sur des principes économiques et des objectifs de protection géo-environnementale.
- 2) Mettre en place un comité professionnel associé à la Direction de l'aménagement du territoire, au Département de protection de l'environnement et au Département de la défense civile, pour travailler sur la cartographie du potentiel de sous-sol exploitable – en qualité et en quantité - qui sera ajouté à l'inventaire classique du système cadastral et servira de base à l'évaluation de l'espace souterrain.
- 3) Lancer un comité de recherche multidisciplinaire comprenant le Département du planning urbain, le Département des infrastructures urbaines, le Département de la construction urbaine et la Commission économique de planification, qui travaillera à l'élaboration des prévisions de demande socio-économique relative aux infrastructures souterraines et aux différents types de construction et qui attribuera des valeurs commerciales à l'espace souterrain.

- 1) Initiate general guidelines by legislation bodies to sensitize rational subsurface development based on economic principals and geo-environmental protection goals.
- 2) Establish a professional committee coupled with Land Resources Management Department, Environmental Protection Department and Civil Defense Department, working out quality and quantity potential mapping of exploitable subsurface land, which will be added to conventional inventory of land cadastral register system. It serves as a basis for subsurface land appraisal.
- 3) Launch a multi-disciplinary research committee involved by Urban Planning Department, Urban Infrastructure Department, Urban Construction Department and Economic Planning Commission, working out a socio-economic demand forecast for underground infrastructure and construction types, which will fill the subsurface land system with commercial values.
- 4) Monitor and control urban underground space development, regulate the behavior of property developers, provide professional training modules to developers for knowledge improvement.
- 5) Dynamic management, taking into account new scientific knowledge, technologies, new environmental boundary conditions, security measures and socio-economic evolution.

- 4) Surveiller et contrôler le développement de l'espace souterrain en site urbain, réglementer l'activité des promoteurs immobiliers et leur fournir des modules de formation professionnelle pour améliorer leurs connaissances.
- 5) Mener une gestion dynamique, en prenant en compte les connaissances scientifiques et les nouvelles technologies, les nouvelles conditions limites relatives à l'environnement, les mesures de sécurité et l'évolution socio-économique.

3 - Gouvernance intégrée des ressources souterraines pour atteindre l'objectif de durabilité

Cette section met l'accent sur la planification de la protection de l'environnement et des ressources énergétiques dans le processus de développement du sous-sol urbain. Parce que cette direction de recherche n'a pas été beaucoup mentionnée dans les développements des décennies précédentes, il est nécessaire aujourd'hui d'introduire la possibilité d'utilisation du sous-sol dans l'ensemble des projets d'aménagement de la ville durable.

Comme présenté plus haut § 1.2 à propos des ressources souterraines en milieu urbain (eaux souterraines, géomatériaux et géothermie), il existe un réseau de ressources naturelles sous notre espace urbain. Chacune de ces ressources possède une valeur comptable qui contribue à la vie urbaine. L'implantation en sous-sol d'infrastructures et de constructions constitue un défi vis-à-vis de ces ressources, en provoquant des effets rétroactifs sur les divers éléments de l'espace souterrain, y compris les éléments concernant l'environnement bâti et l'environnement géologique. Avoir une vue d'ensemble de ces interactions permet aux décideurs et aux projeteurs d'encourager une synergie d'exploitation (par exemple combiner la construction des fondations et du radier avec des géostructures de stockage d'énergie³) ainsi que d'éviter les conflits générés par une exploitation incompatible (par exemple pollution de l'eau potable lors du creusement d'un tunnel).

Le concept "Deep City" a été présenté dans le cadre du programme de recherche national suisse NRP54 "Développement durable dans l'environnement bâti". Ce projet nommé "Ressources souterraines et développement durable dans les zones urbaines" a développé une méthodologie de gestion pour optimiser l'exploitation multiple de ces ressources souterraines dans les périmètres urbains, avec étude de cas détaillée de la ville de Genève pour validation de la méthode. Le schéma ci-contre présente une approche méthodologique multi-usages pour la gestion des ressources souterraines en milieu urbain.

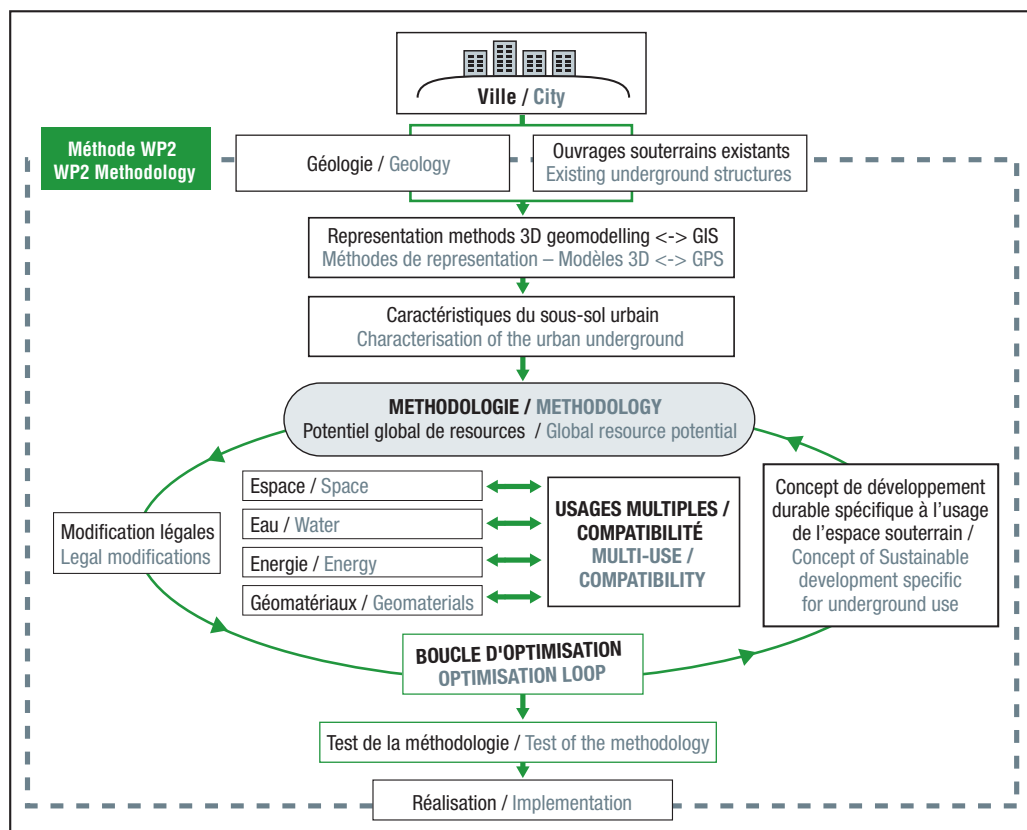
3 - Energy geostructures : <http://ims.epfl.ch/energy>.

3 - Integrated governance of underground resources to attain the goal of sustainability

This section emphasizes environmental protection planning and energy planning in the process of developing urban subsurface. Because this research direction has been not much mentioned in the previous development decades, it is necessary to embody the opportunity of going underground into the whole sustainable city transformation practice.

As presented in section 1.2 about urban underground resources (groundwater, geomaterial and geothermal energy), it exists a natural environmental network beneath our urban land. Each of these resources possesses countable value supporting urban life. Placing infrastructures and constructions underground challenges the natural state of these resources, causing feedback effects among underground agents, including the agents in built environment and geological environment. To have a comprehensive view of these feedback interactions enables urban governors and project owners to encourage synergetic exploitation (such as combine basement and foundation construction with energetic geostructures³), as well as to avoid the conflicts generated from incompatible exploitation (such as damaging drinkable groundwater during tunnel excavation).

The concept of "Deep City" was put forward in the framework of Swiss national research program NRP54 "Sustainable development in the built environment". This project named "Underground resources and sustainable development in urban areas" developed a management methodology to optimize multiple exploitation of these underground resources in city perimeters, with detailed case study for the city of Geneva for methodological validations. Methodological scheme with multi-use approach to manage urban underground resources is showed below:



Afin d'élargir l'applicabilité de ce concept "Deep City" à des villes du monde beaucoup plus grandes, un projet nommé "Deep City China", lancé avec l'Institut de l'espace souterrain et du géo-environnement de Nankin, est actuellement en cours. Cette recherche comparative entre les contextes suisse et chinois en termes de gestion des ressources souterraines en milieu urbain, mettra l'accent sur l'évaluation économique de l'espace souterrain pour le développement de zones urbaines sélectionnées dans la région du fleuve Yangtsé, et étudiera la faisabilité de sa mise en œuvre administrative et réglementaire. Pour aider ensuite à l'application du concept au niveau national, une typologie de l'espace souterrain sera définie afin d'harmoniser la gestion de l'urbanisme et celle des ressources. ◆

Remerciement :

Cette étude a été réalisée avec l'appui du SSSTC (Programme de Coopération scientifique et technologique Sino-Suisse).

In order to enlarge the applicability of this concept to much larger cities around the world, an ongoing project named "Deep City China" was launched with Nanjing Institute of Underground Space and Geo-environment. This comparative research between Swiss and Chinese contexts in terms of urban underground resources management, will focus on economic assessment of subsurface develop for selected urban areas in Yangtze River Region, and will investigate the feasibility of administrative and regulatory implementation. To guide the national application of the concept, territorial underground typology will be classified to customize urban management and resources governance. ◆

Acknowledgements :

This work was supported by the Sino Swiss Science and Technology Cooperation (SSSTC).

Références / References

- Programme, U.N.H.S., *Planning sustainable cities: global report on human settlements 2009*. 2009: Earthscan.
- Meijerfeldt, E.v., *Below ground level creating new spaces for contemporary architecture*. 2003.
- John Carmody, Ray Sterling, *Underground Building Design-commercial and institutional structures*, ed. U.o.M. *Underground Space Center*. 1983: VAN NOS-TRAND REINHOLD COMPANY.
- John Carmody, Ray Sterling, *Underground space design-a guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces*. 1993.
- Monnikhof, R.A.H., et al., *The new underground planning map of the Netherlands: a feasibility study of the possibilities of the use of underground space*. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 14(3): p. 341-347.
- Bobylev, N., *Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: A case of Urban Underground Space use*. *Land Use Policy*, 2009a.
- Aurèle Parriaux, et al., *Rapport de recherche PNR54: Projet Deep City – Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains*. 2010.
- Programme, I.H.P., *Annex 30 Retrofit Heat Pumps for Buildings - final report*. 2010, IEA Heat Pump Center: Sweden.