

VILLE10D - VILLE D'IDEES

Projet National de Recherche

Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable Décliné
Dans une Dynamique « Dessus / Dessous »

RAPPORT D'ETAPE

Jean-Pierre PALISSE

R/17/V10D/035
LC/16/V10D/84

Mars 2017

Site internet : www.ville10d.fr

Président : Jean-Claude BOUCHERAT

Directrice Générale : Monique LABBE

Directeur Opérationnel : Jean-Pierre PALISSE

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

1. Sommaire

1. Sommaire	2
2. Résumé	4
2.1. Résumé	4
2.2. Abstract	4
3. Introduction.....	6
3.1. L'objectif du projet Ville 10D	6
3.2. L'objectif du présent rapport d'étape	6
3.3. L'enjeu de la ville durable.....	6
3.4. Le sous-sol, une dimension du développement métropolitain.....	7
3.5. Le sous-sol, un espace aménageable selon différents processus	7
3.6. Quand, comment et pourquoi un aménagement urbain du sous-sol.....	9
3.7. Des arguments pour les acteurs de l'aménagement urbain	10
4. Le sous-sol une dimension ressource pour aménager la ville	12
4.1. L'eau	12
4.2. L'énergie	13
4.3. Les matériaux	14
4.4. L'espace souterrain, morceau de ville.....	15
4.5. La multifonctionnalité de l'espace urbain souterrain	17
5. Evaluer l'alternative souterraine	19
5.1. De la durabilité des aménagement souterrains	19
5.2. Des outils d'évaluation et des indicateurs de durabilité	20
5.3. De la résilience des aménagements souterrains.....	21
5.4. Des outils pour évaluer la résilience des infrastructures	21
5.5. De la rentabilité des aménagements souterrains	22
5.6. Des outils pour évaluer l'intérêt socio-économique	22
6. Optimiser et sécuriser l'usage urbain du sous-sol	24
6.1. De la conception architecturale des espaces souterrains	24
6.2. Du traitement de la lumière en sous-sol	26
6.3. De la végétalisation des espaces souterrains.....	27
6.4. De l'exploitation des ressources naturelles	29
6.5. De la résilience des ouvrages	31
6.6. De la gestion des risques des aménagements souterrains	31
6.7. De la sécurité des personnes et des biens	32
7. Partager la connaissance du contexte et des projets en sous-sol.....	34
7.1. Améliorer les méthodes d'acquisition des données	34
7.2. Partager la connaissance du site et des projets	35
7.3. Naviguer en sous-sol	35
7.4. Cartographier l'espace souterrain.....	36
8. Anticiper, arbitrer, piloter, gérer les projets souterrains.....	38
8.1. Partager des outils de connaissance, d'évaluation et de projection	38
8.2. Sensibiliser et mobiliser tous les acteurs du sous-sol	38

Rapport d'étape

8.3.	Développer les démarches intersectorielles et globales.....	39
8.4.	Décloisonner la gestion du sous-sol et harmoniser ses règles.....	39
8.5.	Elargir la planification urbaine à la dimension souterraine	39
8.6.	Harmoniser et clarifier le cadre juridique et règlementaire	40
8.7.	Clarifier les statuts de la propriété et de l'exploitation des volumes souterrains	40
8.8.	Harmoniser les prescriptions et la gestion de la sécurité des espaces souterrains.....	41
9.	Un bilan provisoire.....	42
10.	Bibliographie.....	43
10.1.	Rapports de recherche du projet national Ville 10D.....	43
10.2.	Autres	44

2. Résumé

2.1. Résumé

Le projet national de recherche Ville 10D a été lancé en 2012 afin de promouvoir l'utilisation et la valorisation urbaine du sous-sol dans le contexte d'une métropole durable. Une trentaine de partenaires ont travaillé sur quatre thèmes sectoriels (socio-économique, environnemental, psycho-social, cognitif) qui ont été croisés du point de vue de la planification urbaine et du droit et confrontés à des sites d'application. Après avoir établi un état des lieux de l'aménagement de l'espace souterrain, les chercheurs ont élaboré, dans chacune des thématiques, des propositions et recommandations pour lever les obstacles à l'usage urbain du sous-sol et améliorer les conditions de son aménagement. Le présent rapport d'étape synthétise ces propositions en passant ces travaux au filtre de cinq questions que se posent les acteurs de l'aménagement urbain avant d'engager un projet mobilisant la dimension souterraine :

- Quelle peut-être la contribution du sous-sol à la réalisation d'un projet urbain dans le cadre d'une métropole durable ?
- Comment évaluer l'impact et l'intérêt de sa prise en compte dans le projet urbain dans la perspective d'un développement durable ?
- Comment optimiser l'aménagement du sous-sol pour le rendre attractif, adaptable, sûr et résilient ?
- Comment faciliter la décision en donnant à connaître et à voir l'état actuel et futur des sites de projet dans leur environnement ?
- Comment permettre à la gouvernance urbaine, lorsqu'elle conçoit et met en œuvre sa stratégie d'intensification urbaine, de prendre en compte la globalité des potentiels en incluant la dimension souterraine ?

Le rapport met ainsi en évidence les avancées du projet national Ville 10D mais aussi les approfondissements nécessaires. Il constitue le socle sur lequel sera construit, en partenariat avec des acteurs de l'aménagement urbain, la phase finale de la démarche dont l'objectif est de diffuser largement la connaissance des bénéfices de l'aménagement du sous-sol et des moyens de le valoriser au profit de la ville durable.

Mots clés : développement durable, intensification urbaine, projet urbain, aménagement souterrain.

2.2. Abstract

The Ville 10D national research project was launch in 2012 to improve use and urban development of the underground within the context of a sustainable metropolis. About thirty partners had work on thematic issues (socio-economic, environmental, psycho-social, cognitive), had cross those with urban planning and legal aspect and had confront their results to implementation sites. Having draw up an inventory of underground urban development, researchers have developed proposals and recommendations in each thematic to remove obstacles in the underground use and to improve his development conditions. The present report synthesizes these propositions filtering the work through five questions asked by urban development stakeholders before to start a project involving the underground dimension:

- What could be the underground contribution to build an urban project in a sustainable metropolis?
- How to assess the impact and the interest to involve underground in an urban project in the aim of a sustainable development?
- How to optimize the underground development to make it attractive, adaptable, safe and resilient?
- How to make easier the decisions, giving to know and to see the present and future state of the projects in their environment?

- How to allow the urban governance to take into account all the potentials including the underground dimension when it conceives and implements his urban intensification strategy?

The report reveals the contribution of the national project Ville10D and the needs of deepening. It makes up the base on which to build, in a partnership with the urban development stakeholders, the final stage of the processes in the aim to spread widely the knowing of the underground development benefits and the way to improve it in a sustainable city.

Key words: sustainable development, urban intensification, urban project, underground development.

3. Introduction

3.1. L'objectif du projet Ville 10D

Le Projet National Ville 10D, lancé en 2012, a pour ambition de promouvoir une utilisation et une valorisation plus optimale de l'espace souterrain dans l'aménagement urbain des métropoles. A cette fin, il révèle les bénéfices d'un aménagement intelligent et multifonctionnel de l'espace souterrain dans la perspective de construire une ville durable et il cherche les moyens pour surmonter les obstacles et les freins à sa valorisation et rendre le sous-sol plus attractif en tant qu'espace urbain.

Les deux premières tranches du projet ont été conduites dans la perspective d'une démarche systémique croisant approches thématiques et approches transversales. Quatre champs de recherche thématiques ont été retenus : économique (thème 1), environnemental (thème 2), psycho-social (thème 3), cognitif (thème 4). Deux champs transversaux ont été traités en thème 5, problématique juridique et cyndinique et planification urbaine. Plusieurs sites d'application en région parisienne ou lyonnaise ont permis de confronter les travaux de recherche au terrain et d'engager un dialogue avec leurs aménageurs.

La première tranche de travaux a été principalement consacrée à un état des lieux par thème. La deuxième tranche s'est attachée prioritairement à construire des méthodes, des propositions innovantes et des recommandations.

Une confrontation et un croisement périodiques des approches thématiques ont été conduits dans le cadre de réunions de coordination, de séminaires et d'ateliers afin d'assurer la transversalité du projet et d'interroger sa capacité à répondre aux attentes des acteurs de l'aménagement de l'espace souterrain. Ces rencontres ont amorcé l'approche systémique qui reste à développer en troisième tranche.

3.2. L'objectif du présent rapport d'étape

A l'issue de ces deux premières tranches de travaux il est apparu nécessaire de dresser un bilan des acquis et de recadrer les perspectives de finalisation du projet dans sa phase conclusive. Il s'agit donc de mettre en évidence les réponses apportées par le projet aux décideurs de l'aménagement urbain et de proposer pour la troisième tranche une méthode de fertilisation en mettant en œuvre un processus de conception de projet en collaboration avec les acteurs de l'aménagement de sites exemplaires. Il s'agira de construire un discours convainquant et constructif en formulant les messages capables d'intéresser à la valorisation du sous-sol les acteurs de l'aménagement urbain (les élus et leurs conseils, les maîtres d'ouvrages publics ou privés, les maîtres d'œuvre, les investisseurs, les opérateurs urbains).

3.3. L'enjeu de la ville durable

En ce XXI^{ème} siècle toutes les grandes villes doivent faire face à un processus mondial de métropolisation qui en fait les lieux de focalisation du développement économique et social et par conséquent de concentration urbaine.

Dans ce contexte, leur stratégie urbaine doit répondre à une exigence paradoxale. Elles doivent intensifier l'usage des villes par la densification de leur tissu, la concentration de leurs services, le maillage de leurs réseaux. Mais elles doivent en même temps économiser l'espace et les ressources naturelles, préserver la qualité de leur environnement et l'équilibre de leur écosystème. Pour consommer moins d'espaces ouverts, elles doivent mieux exploiter la dimension verticale pour éviter l'étalement urbain. Elles peuvent aménager en hauteur à condition de ne pas étouffer la ville et dégrader un paysage qui fait l'attractivité de son espace urbain mais aussi, ce que propose Ville 10D, aménager leur sous-sol pour économiser l'espace ouvert et valoriser ses ressources. Le sujet n'est pas tant de créer un ouvrage emblématique que de créer une ville pluridimensionnelle en utilisant aussi l'espace souterrain, en le faisant participer pleinement à l'espace urbain.

3.4. Le sous-sol, une dimension du développement métropolitain

Les métropoles mondiales ont compris depuis longtemps que leur sous-sol pouvait contribuer au développement urbain. Certaines, comme au Canada ou au Japon, ont développé de véritables quartiers de ville souterrains. D'autres, en Suisse ou en Finlande, ont mis en œuvre une planification urbaine efficace de leur sous-sol. A Moscou, Singapour ou New-York, les projets de développement et de valorisation urbaine du sous-sol se multiplient¹.

Les métropoles françaises sont, comme les autres, en quête d'intensification urbaine et s'intéressent aussi à leur sous-sol. Le Grand Paris a déjà une pratique importante de l'aménagement souterrain autour de nœuds de transport et de pôles culturels et touristiques ou économiques comme le Louvre, les Halles ou la Défense. Aujourd'hui, avec le projet engagé du métro automatique du Grand Paris Express qui entraîne la création de nombreuses gares souterraines, s'ouvrent des opportunités exceptionnelles de valorisation de l'espace souterrain, opportunités qu'il ne faut pas manquer d'exploiter. Les métropoles régionales, comme le Grand Lyon ou Marseille, ne sont pas en reste qu'il s'agisse de mieux intégrer leurs tunnels à la Ville ou d'étendre leurs pôles urbains en exploitant l'espace souterrain.

La valorisation urbaine du sous-sol s'est faite d'abord en utilisant des cavités naturelles puis les volumes creusés pour l'exploitation des matériaux. Cet urbanisme troglodytique est, en France, resté assez limité et exceptionnel. Au XIX^{ème} siècle l'aménagement urbain haussmannien a eu largement recours au sous-sol mais en limitant son usage aux infrastructures techniques, adduction d'eau, assainissement, notamment. La fin du siècle a vu l'implantation sous la ville du réseau de transport métropolitain puis au XX^{ème} siècle celui de tunnels routiers et de parkings pour faire face à l'explosion de l'automobile. Aujourd'hui la compacité de la ville et les techniques de creusement conduisent à diversifier ses usages.

3.5. Le sous-sol, un espace aménageable selon différents processus

L'aménagement du sous-sol se réalise selon six processus différents.

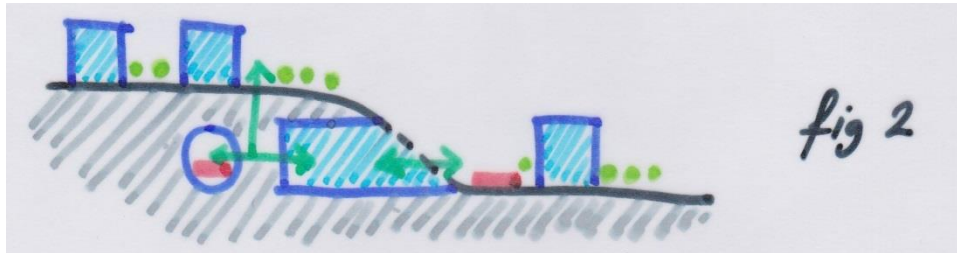
Le premier consiste à travailler en tranchées couvertes. Ce processus a été analysé par le projet national CANOPEE. Il est principalement utilisé pour implanter en premier niveau de sous-sol des infrastructures (voies ferrées ou routes) qui sont ensuite recouvertes d'une dalle qui supporte des aménagement urbains, espaces publics mais aussi bâtiments. L'aménagement de la ZAC Seine Rive Gauche à Paris en est un exemple remarquable.²



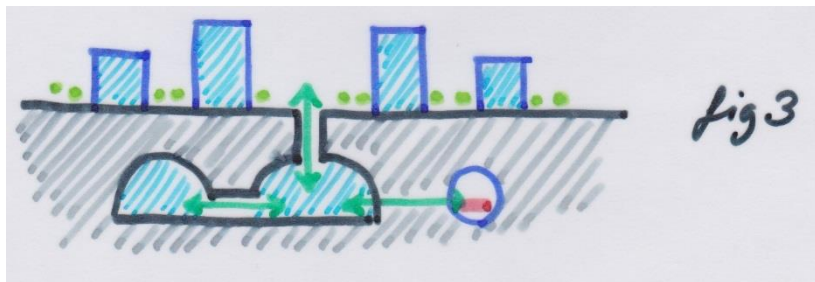
¹ IAU-IdF, NOTE RAPIDE 697, Vers un nouvel urbanisme souterrain : des métropoles engagées, septembre 2016.

² Projet ANR CANOPEE, rapport final, IREX, avril 2016.

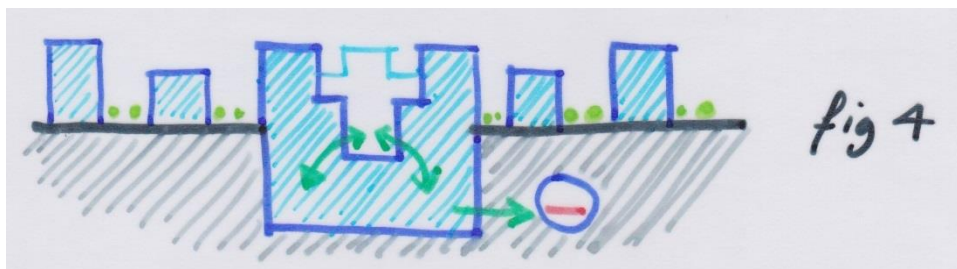
Le deuxième consiste à exploiter une topographie de coteaux ou de falaises en profitant des dénivelés de la surface pour ouvrir les volumes enterrés vers la lumière et le niveau naturel du sol. Les villages troglodytes de la vallée de la Loire en sont un exemple déjà ancien mais ce processus est aussi celui de réalisation plus récente comme l'université d'Eiwa à Séoul.



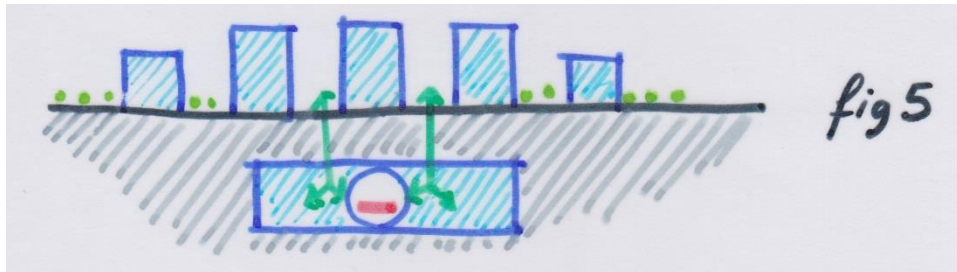
Le troisième processus consiste à aménager des cavités anthropiques (anciennes carrières, tunnels désaffectés) ou, plus rarement, des cavités naturelles pour y implanter des fonctions urbaines tel que de la logistique, des activités ou des équipements publics. L'exemple le plus emblématique est celui de Subtopolis à Kansas-City mais on peut aussi citer les thermes de Jonsac, le projet de parc souterrain de la Low line à New-York ou le projet Science City à Singapour.



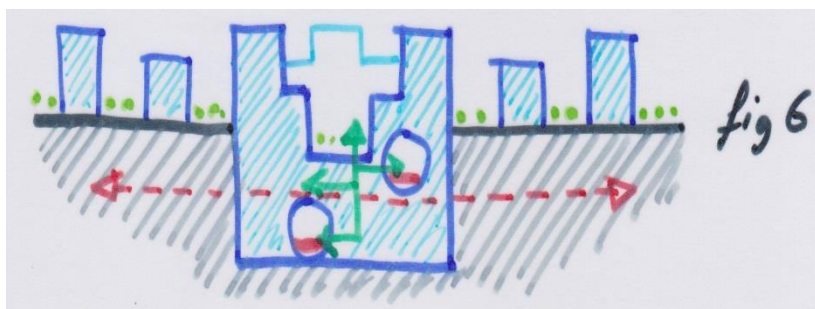
Le quatrième consiste à étendre un ensemble urbain existant en creusant son sous-sol et en créant parfois des connexions vers d'autres sites souterrains ou vers des réseaux de transport souterrain existant. Ce processus est particulièrement utilisé en milieu urbain très dense surtout lorsque le patrimoine bâti en surface doit être préservé. Il est de plus en plus utilisé dans les cœurs de métropole comme Londres ou Paris. Le Carrousel du Louvre est représentatif de ce type d'aménagement, de même que le centre Grimaldi à Monaco.



Le cinquième consiste à profiter des accès et des flux souterrains engendrés par une gare pour aménager des volumes accueillant des fonctions associées à ces flux, services, équipements, commerces. La plupart des principaux pôles d'échanges parisiens ont développé ce processus : Gare Hausmann-Saint-Lazare, Gare Montparnasse, Gare du Nord, Gare de Lyon. Le projet du Grand Paris Express fait émerger de nouveaux sites où ce concept pourrait être exploité à l'occasion de la réalisation de ses gares.



Le sixième processus combine les précédents dans un ensemble urbain de forte densité constituant un pôle d'échange et de centralité en trois dimensions articulant et intégrant les niveaux en sous-sol et la grande hauteur dans le cadre d'un aménagement urbain continu du souterrain à l'aérien en incluant les stations intermodales. Les sites des Halles et de la Défense en sont les exemples parisiens, mais c'est au Japon ou au Canada que l'on trouve les expériences les plus poussées de ce processus, celui qui répond le mieux à une stratégie d'intensification pour une métropole durable.



3.6. Quand, comment et pourquoi un aménagement urbain du sous-sol

L'origine d'un projet d'aménagement du sous-sol est donc variable, qu'il s'agisse de répondre à un besoin en espace urbanisable (Carrousel du Louvre), de profiter du potentiel de développement urbain offert par un pôle d'échange (Hausmann Saint-Lazare) ou de trouver une utilité et une rentabilité à une cavité existante (SubTropolis à Kansas City).



Carrousel du Louvre, Paris
(source : site internet du Carrousel du Louvre)



Zone de stockage à SubTropolis – Kansas City
(source : bohemianalchemy.blogspot.fr)

Par ailleurs la conception, les techniques de mise en œuvre et le fonctionnement des ouvrages d'aménagement sont très dépendants de la profondeur du projet. A une dizaine de mètres sous la surface, une réalisation en tranchée avec des parois moulées sera la solution la plus économique, les interfaces dessus dessous pourront être traités en continuité et la mise en sécurité sera facilitée par des accès directs sur l'extérieur. Aux alentours de trente mètres sous la surface (ce qui est le cas des gares du Grand Paris Express), il s'agit de creuser, de consolider et de cuveler des cavités, des tunneliers réalisant les percements linéaires. Les liaisons avec la surface doivent être assurées par des puits recevant les ascenseurs et les escaliers ou escalators et la mise en sécurité impose de pouvoir compartimenter les volumes.

Dans tous les cas le potentiel d'aménagement urbain du sous-sol est extrêmement variable selon l'environnement urbain. La nature géologique et l'état d'occupation du sous-sol ont un impact considérable sur la faisabilité et sur le coût de réalisation du projet. Les techniques de construction ne sont pas les mêmes dans un sol rocheux homogène et solide que dans des couches alluviales et la géométrie des ouvrages est grandement compliquée par la présence d'infrastructures anciennes mais toujours en service. La densité d'occupation du site urbain environnant (par exemple 60 habitants + emplois à Champigny, 220 à Issy-les-Moulineaux, 680 à la Défense) justifie en proportion le recours au potentiel souterrain, d'autant plus que la situation dans la Métropole et la proximité de ses pôles entraînent des niveaux de valeurs foncières et immobilières très élevés qui peuvent rendre acceptable des coûts de construction très importants dans la mesure où le gain de surface utile est significatif. L'ambition du projet urbain auquel participe l'aménagement souterrain est aussi à prendre en compte. Dans le cadre d'opération d'aménagement urbain stratégique, comme par exemple le site de la Défense, la contribution du sous-sol doit être évaluée au regard de la globalité de l'opération conçue comme un ensemble urbain en trois dimensions, s'étendant vers le bas autant que vers le haut.

3.7. Des arguments pour les acteurs de l'aménagement urbain

Dans ce contexte prometteur mais complexe, la trentaine de rapports qui a été produite par les partenaires du projet Ville 10D apporte des clarifications et des propositions de méthodes, de processus ou d'outils qui peuvent contribuer à inciter les acteurs de l'aménagement urbain à prendre davantage en compte les potentiels de l'espace souterrain. Encore faut-il aller au bout de la démarche et dépasser les cloisonnements thématiques, qui étaient inévitables pour approfondir des questions très techniques et parfois pointues, pour adopter l'approche systémique.

A ce stade du projet Ville 10D nous proposons donc une lecture synthétique et transversale des travaux réalisés en se plaçant du point de vue qui pourrait être celui des décideurs et acteurs de l'aménagement urbain : élus des collectivités publiques compétentes en urbanisme, maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre de l'aménagement urbain, gestionnaires et opérateurs de la ville et de son système de transport, promoteurs immobiliers, entreprises du BTP, etc. Dans les chapitres qui suivent les rapports ont donc été passés au filtre de cinq questions clés pour ces décideurs :

- Quelle peut-être la contribution du sous-sol à la réalisation d'un projet urbain dans le cadre d'une métropole durable ?
- Comment évaluer l'impact et l'intérêt de sa prise en compte dans le projet urbain dans la perspective d'un développement durable ?
- Comment optimiser l'aménagement du sous-sol pour le rendre attractif, adaptable, sûr et résilient ?
- Comment faciliter la décision en donnant à connaître et à voir l'état actuel et futur des sites de projet dans leur environnement ?
- Comment permettre à la gouvernance urbaine, lorsqu'elle conçoit et met en œuvre sa stratégie d'intensification urbaine, de prendre en compte la globalité des potentiels en incluant la dimension souterraine ?

Les synthèses proposées dans les cinq chapitres qui suivent ont très largement puisées dans les rapports thématiques des deux premières tranches, restant aussi près que possible des formulations rédigées par leurs auteurs, au risque d'un certain déséquilibre dans le style ou l'approfondissement des questions. Cette approche respectueuse des travaux réalisés a été jugée préférable à une meilleure harmonisation rédactionnelle bien qu'elle en rende la lecture moins fluide.

4. Le sous-sol une dimension ressource pour aménager la ville

Que peut produire et recevoir le sous-sol des métropoles et quelle peut-être la contribution du sous-sol à la réalisation d'un projet urbain dans le cadre d'une métropole durable ? Le sous-sol peut contribuer au développement et à la vie urbaine. Il est une dimension importante de l'aménagement qui offre plusieurs types de ressources renouvelables ou non. Il doit être pris pleinement en compte dans le projet urbain et ne doit plus être cantonné à un rôle de service.

Pour le projet Suisse Deep-City, les ressources à exploiter et valoriser en sous-sol sont l'espace, l'eau, les matériaux, l'énergie³. Pour le projet national Ville 10D ce sont aussi les fonctions urbaines, la contribution du sous-sol au fonctionnement et au vécu de la ville : une contribution aux échanges et liaisons de personnes et de marchandises, un accueil des services urbains, mais aussi bien d'autres usages à condition de raisonner en trois dimensions et de considérer le dessous autant que le dessus dans la conception de la ville. Une gestion coordonnée des quatre ressources essentielles apportées par le sous-sol à la ville, l'espace, les matériaux, la géothermie et l'eau, contribuera à un aménagement urbain économe, durable et résilient et permettra d'y accueillir des fonctions urbaines très diverses. Associer ces fonctions pour valoriser tous les potentiels souterrains suppose de faire évoluer les pratiques et les règles en décloisonnant la conception de l'aménagement de la ville, en intégrant dans le projet urbain toute les dimensions du sous-sol à la surface et en exploitant les articulations entre le dessous et le dessus.

4.1. L'eau

Le sous-sol recèle l'eau qui est une ressource vitale pour la ville. Les nappes phréatiques constituent les principaux réservoirs d'eau potable renouvelables à proximité immédiate des métropoles. La préservation des nappes qui contribuent, par exemple, à l'alimentation en eau du Grand Paris est indispensable. Cependant cela n'empêche pas l'implantation d'ouvrages à conditions qu'ils ne rompent pas la continuité de ces nappes et ne contribuent pas à les polluer. La prise en compte de la localisation de ces nappes dans la conception des projets souterrains et la mise en œuvre de dispositions de nature à empêcher tout rejet d'eau non traitée vers ces nappes est donc indispensable. Inversement les installations souterraines et les volumes utilisés doivent être protégés des infiltrations ou inondations.

Par ailleurs, pour permettre l'exploitation du sous-sol et mettre hors d'eau les bâtiments et les infrastructures, les eaux souterraines sont pompées et évacuées, constituant les eaux d'exhaure. Aujourd'hui, ces eaux sont principalement rejetées en égout alors qu'elles pourraient alimenter un réseau d'eau non potable de la métropole qui peut être consacré au lavage ou à l'arrosage.⁴

³ PROJET DEEP CITY, RESSOURCES DU SOUS-SOL ET DEVELOPPEMENT DURABLE DES ESPACES URBAINS, page 7 à 13, 2010, PNR 54.

⁴ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, valorisation des eaux d'exhaure à Paris, novembre 2014, R12.

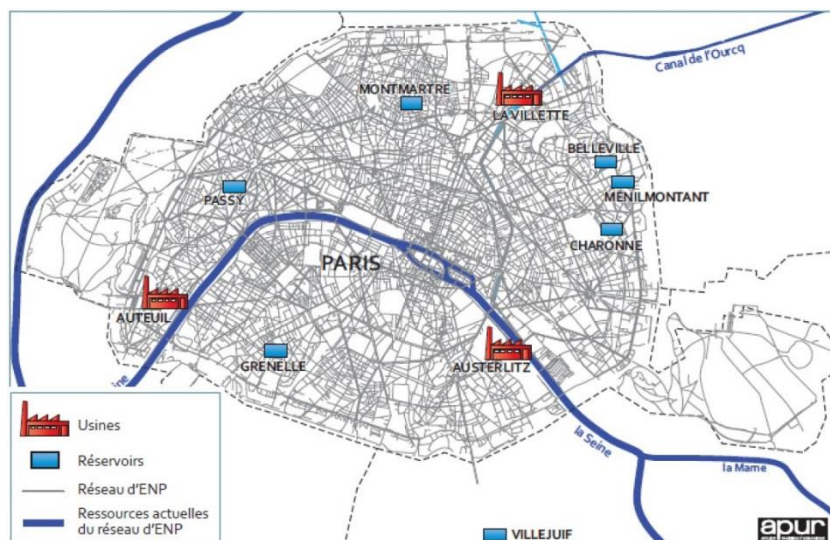
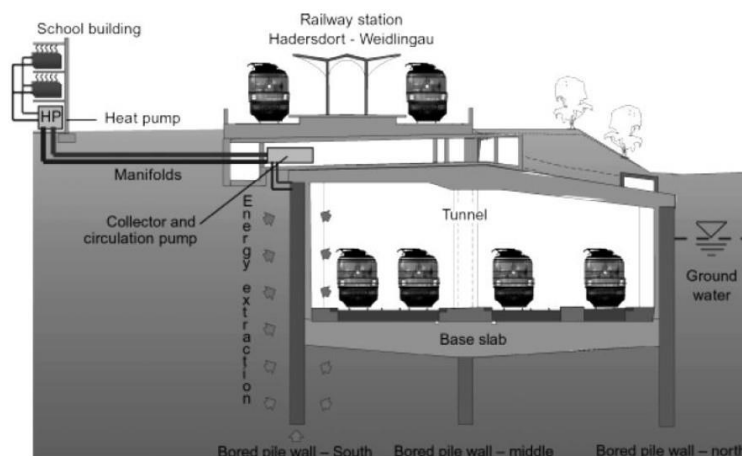


Schéma du réseau de production et distribution d'eau non potable de Paris (Apur, 2013b)

4.2. L'énergie

En dehors des énergies fossiles recélées par le sous-sol, qui, dans le bassin parisien, sont peu abondantes et situées dans des couches profondes, la ressource énergétique du sous-sol relève essentiellement de la géothermie, l'espace souterrain offrant une température stable grâce à un fort volant thermique. Cette stabilité thermique a été de longue date exploitée pour se protéger de la rigueur du climat ou pour la production, la conservation et l'affinement de produits alimentaires (champignons, vins, fromages, etc.). Elle permet de réguler la température des espaces souterrains humanisés en réduisant ou supprimant les coûts de chauffage ou de rafraîchissement. La capacité de stockage thermique du sous-sol permet aussi de capter, de stocker et d'exploiter les calories produites par les infrastructures qui le traversent et les installations qui y sont implantées (« data centers » par exemple) et de fournir ainsi à bon compte une énergie renouvelable.



Vue en coupe de LT24, sens est-ouest

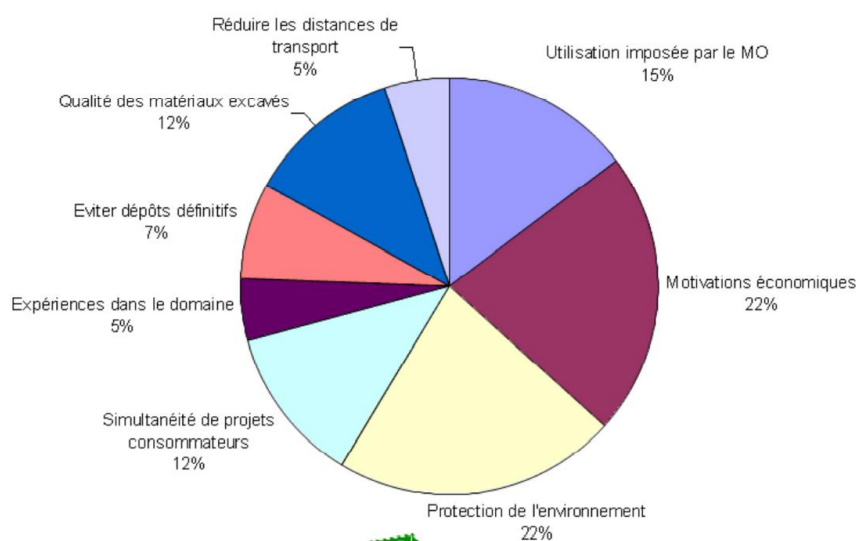
En milieu urbain, suivant les conditions géologiques et hydrogéologiques, tous les modes d'exploitation sont envisageables. Cependant, dans le cadre de l'aménagement du sous-sol urbain, seuls les ouvrages de faible profondeur entrent en interaction directe avec les autres ressources du sous-sol urbain, 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).⁵

4.3. Les matériaux

Par nature les matériaux extraits du sous-sol sont une ressource temporaire non renouvelable et à exploiter avec économie. Leur exploitation peut justifier à elle seule le creusement du sous-sol en vue notamment d'y récupérer des matériaux de construction. Faute de pouvoir renouveler cette ressource, l'enjeu est de permettre une utilisation ultérieure des nouvelles cavités en s'assurant que le creusement crée des volumes dont les dimensions, la solidité et l'accessibilité sont compatibles avec un aménagement utile. Les carrières de Kansas-City constituent l'un des exemples les plus aboutis, la poursuite de l'exploitation du calcaire étant organisée de manière à faciliter l'extension de la zone logistique de Subtropolis.⁶

Lorsque le sous-sol est creusé directement pour un usage urbain (un tunnel ou une gare par exemple), l'utilisation et la valorisation des matériaux extraits lors du chantier sont moins évidents et peuvent paraître secondaires au regard des ambitions du projet. Pourtant ces matériaux ne vont pas disparaître et dans la perspective d'un aménagement durable il importe qu'ils soient utilisés de la manière la plus optimale, ce qui dépendra de leur nature et de la localisation de leur réimplantation et de leur transformation. La demande de granulat pour le secteur du BTP ne cessant d'augmenter alors que l'accès aux ressources naturelles est de plus en plus difficile, le recours aux matériaux extraits à l'occasion de travaux est un impératif. Ville 10D a travaillé à éclaircir le statut des matériaux excavés et à expliquer les modalités de leur gestion, hors et sur site. Un état de l'art sur la valorisation de ces matériaux a été établi en portant une attention particulière au béton comme piste de valorisation.⁷



Types d'utilisation des matériaux excavés – Sur la base de l'expérience suisse (Dumont, 2002)

Pour mieux appréhender cette problématique, le projet Ville 10D a travaillé sur l'expérience d'un cas significatif, le tunnel mode doux de la Croix Rousse à Lyon qui a conduit à excaver 161 000 m³ de terrain, soit environ 434 700 tonnes de granite, gneiss et sables graveleux et limoneux et à gérer leur transport, leur stockage et leur usage.⁸

⁵ PROJET DEEP CITY, RESSOURCES DU SOUS-SOL ET DEVELOPPEMENT DURABLE DES ESPACES URBAINS, page 12, 2010, PNR 54.

⁶ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, la mutabilité des cavités, page 7, septembre 2014, R05.

⁷ Thème2 : ENVIRONNEMENT, gestion et valorisation des matériaux d'excavation des tunnels, décembre 2014, R17.

⁸ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, travaux préparatoires à une ACV de la valorisation des MEX, novembre 2014, R08.

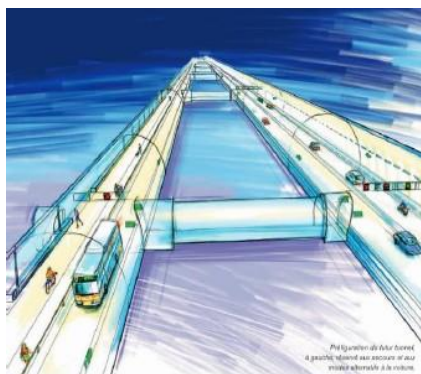


Image des tunnels de la Croix Rousse [Article 'A Lyon une galerie modes doux en 2014' Ville Rail et Transport 06/04/2011]

4.4. L'espace souterrain, morceau de ville

Le sous-sol est une ressource en volume utilisable qui permet d'économiser l'espace situé en surface et de mieux le valoriser. Pour cela les volumes souterrains sont à creuser ou à convertir (s'agissant de cavité préexistante). La question est de savoir quels usages urbains peuvent être situés en sous-sol de manière alternative ou préférentielle ?

Le projet Ville 10D a recensé les usages envisageables en souterrain et évalué la pertinence de l'implantation souterraine par rapport à une implantation en surface en prenant en compte les besoins en lumière et en aération naturelle, en accessibilité, en visibilité et en fonction de la complexité technique de l'usage. Il en ressort que si les usages les plus pertinents sont liés à la circulation de personnes ou d'objets, la palette des usages adaptés au milieu souterrain est large avec des fonctions très diverses qui sont généralement compatibles et parfois facilement mutualisables.⁹

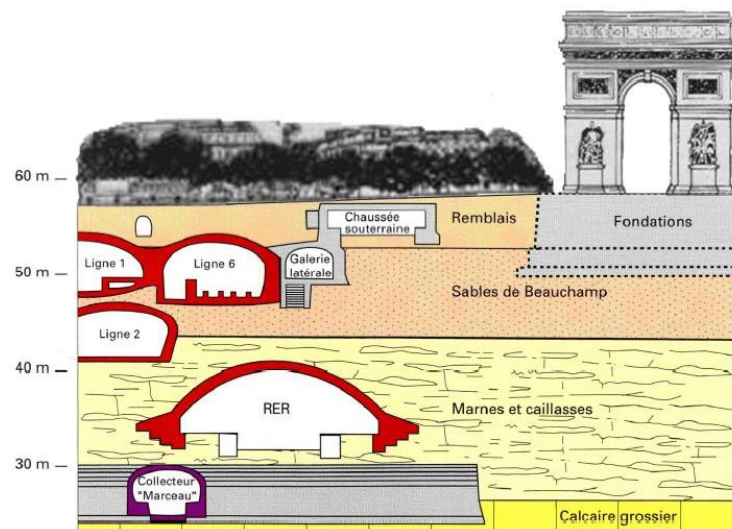
L'une des études du projet Ville 10D s'est focalisée sur les exemples existants de sites miniers qui ont été transformés pour accueillir une autre activité que l'extraction après, ou même pendant l'extraction. Elle a établi une base de données internationales comprenant 85 sites qui montre la grande diversité des usages et a analysé quelques exemples particulièrement significatifs (Subtropolis-Kansas City, thermes de Jonsac)¹⁰

4.4.a. Un espace souterrain mis au service de la ville...

Traditionnellement le sous-sol urbain accueille les réseaux desservant la ville, alimentation en eau, assainissement, énergie, télécommunication, route, chemin de fer, libérant la surface pour d'autres usages. Il accueille ainsi la plupart des infrastructures urbaines telles que les réseaux d'eau potable, de télécommunication et d'énergie (électricité, gaz), les réseaux d'assainissement (évacuation des eaux pluviales, égouts), et des installations techniques nécessaires à leur fonctionnement (traitement d'eau usées, transformateurs, etc.). Il est sillonné de réseaux de circulation assurant le transport collectif des personnes et, plus rarement, des marchandises (réseau ferré de métro ou de RER), et est ponctué de gares et de stations. Des voies routières en tunnel assurent des liaisons rapides et allègent le trafic sur les voies en surface. Le sous-sol est également largement utilisé pour assurer le stationnement des véhicules mais aussi le stockage de marchandises.

⁹ Thème 1 : SOCIO ECONOMIE, boîte à outils d'évaluation de projets souterrains, fiche 5, page 29 à 36, juillet 2014, R03.

¹⁰ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, la mutabilité des cavités, septembre 2014, R05.



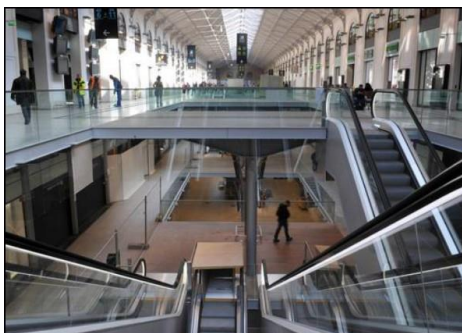
Coupe de la Place de l'Étoile à Paris (Duffaut, 2010)

4.4.b. ... capable d'accueillir des fonctions urbaines nombreuses et variées

Beaucoup d'autres fonctions peuvent trouver place dans l'espace souterrain de manière à profiter de son accessibilité aux flux d'énergie, de données, de véhicules, de marchandises et de personnes transportées et en utilisant le potentiel de production et de régulation thermique propre au souterrain. Sans imposer un séjour permanent en sous-sol, de nombreuses fonctions urbaines peuvent y être implantées et profiter des réseaux de desserte maillés qui le sillonnent. Il s'agit d'activité d'archivage, de stockage de marchandise, de parking, de logistique urbaine ou de traitement de données numériques (« data center ») qui impliquent d'importants volumes clos pour une présence humaine assez réduite. Mais il s'agit aussi d'équipements, de commerces et de services recevant du public, de lieux de réunion, de lieux de spectacle ou d'exposition dont l'éclairage naturel n'est pas nécessaire ou est exclu.



Pionien Data Center de Stockholm



*Photographie du centre commercial
de la Gare Saint Lazare à Paris
(Source : Site internet des commerces de Paris, 2014)*



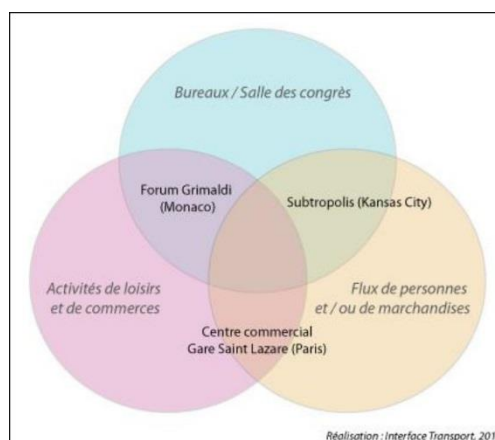
*Espace souterrain de l'entrée du Louvre
(Chow et al., 2002)*

Les fonctions d'habitat ou de travail quotidien doivent être de préférence situées en surface dans des lieux ouverts à l'air libre et à la lumière naturelle. Cependant, il ne faut pas les exclure systématiquement du sous-sol dans la mesure où, comme on le verra au chapitre 3, des

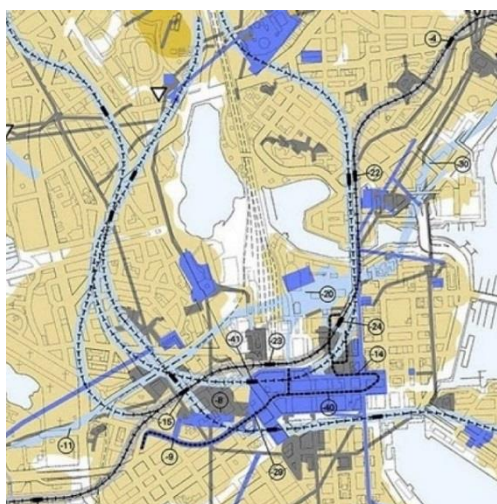
aménagements et des dispositions (puits de lumière par exemple) peuvent être imaginés pour articuler le dessus et le dessous du sol et donner accès en profondeur à la lumière naturelle.

4.5. La multifonctionnalité de l'espace urbain souterrain

Ces usages multiples peuvent contribuer à l'animation de l'espace souterrain et l'intégrer complètement à la ville en formant un continuum du dessus au-dessous du sol tout en préservant ou en valorisant ses ressources naturelles. Ainsi, les projets urbains développés sur les sites environnant les nœuds de transport souterrains doivent être conçus en trois dimensions, pensés vers le bas autant que vers le haut. La pluralité des fonctions contribue ainsi à l'urbanité et à la valorisation du sous-sol et la prise en compte de la dimension souterraine de l'espace métropolitain ouvre de nouvelles possibilités pour répondre aux besoins collectifs de la ville.



Exemples d'ouvrages souterrains mutualisant différentes fonctions



Ce recours n'est pas à réserver aux sites les plus contraints mais peut être bénéfique dans la plupart des contextes urbains, l'espace ouvert aérien étant toujours une ressource précieuse à ne pas dilapider. Les villes scandinaves qui comme Helsinki ont élaboré un schéma directeur de l'espace souterrain pour coordonner ses usages multiples diversifiés et souvent innovant montrent l'exemple.¹¹

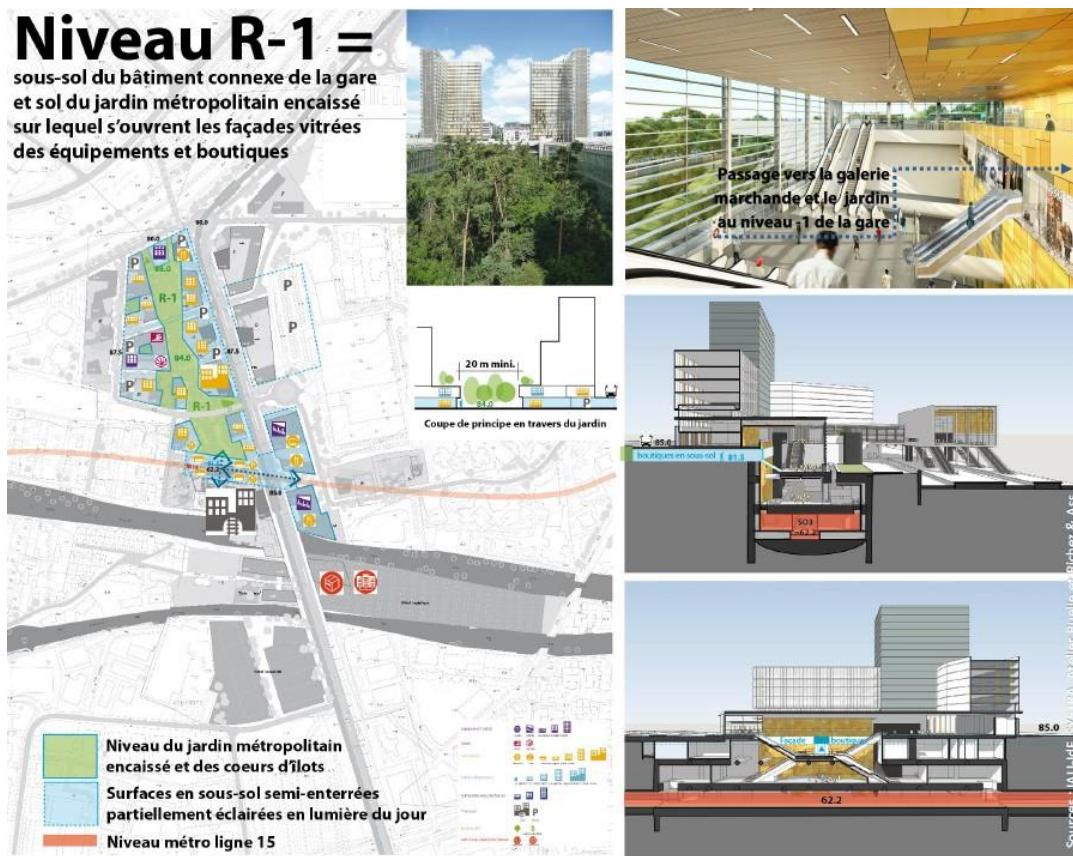
Schéma directeur du souterrain urbain la ville d'Helsinki

4.5.a. Une programmation et une spatialisation incluant la dimension souterraine

Ville 10D a travaillé sur un site urbain en projet autour de l'une des nouvelles gares souterraines du Grand Paris Express pour explorer le gisement foncier offert par le sous-sol et rechercher un concept d'urbanisme souterrain capable de renforcer la programmation d'une grande opération d'aménagement. Cet exercice, conduit en accord avec l'aménageur du site (Epamarne), a montré qu'à foncier et gabarit constant, on pouvait creuser la topographie du terrain pour dégager des volumes partiellement souterrains et exploiter, dans une relation dessus-dessous, la topographie particulière du site en renforçant la cohésion et la fluidité de l'espace urbain et en augmentant sensiblement sa réceptivité. Même si la rentabilité financière de cette option n'a pas été démontrée, notamment en raison de la faible densité urbaine recherchée et des valeurs foncières et immobilières relativement faible de ce secteur en situation périphérique dans la métropole, l'exercice a montré le potentiel

¹¹ Thème 1 : SOCIO ECONOMIE, boîte à outils d'évaluation de projets souterrains, fiche 14, page 84 à 114, juillet 2014, R03.

important ouvert par l'exploitation urbaine de l'espace souterrain dans la perspective d'une intensification urbaine, ce qui est l'un des objectifs majeurs de la stratégie du Grand Paris¹².



Concept de synthèse ZAC Marne Europe

¹² Thème 5 : TRANSVERSAL, planification stratégique de l'aménagement du sous-sol, application à la ZAC Marne-Europe, septembre 2016, R34.

5. Evaluer l'alternative souterraine

Comment évaluer l'impact de l'intégration du sous-sol dans le projet urbain dans la perspective d'un développement durable ? Concevoir l'aménagement urbain d'un site en optimisant l'usage de sa dimension souterrain est un choix volontaire résultant d'option croisés entre programmation, coût et acceptation que les décideurs doivent pouvoir justifier face à l'approche traditionnelle où le sous-sol n'est qu'une annexe technique du bâti de surface, une approche qui, à court terme, semble la plus simple, la plus facile et la moins risquée. Il est pour eux indispensable de s'assurer que les implantations en sous-sol seront bénéfiques et compatibles avec un aménagement urbain durable et pour cela de disposer d'outils pour arbitrer en connaissance de cause l'organisation de l'aménagement urbain à une échelle suffisamment large d'espace et de temps.

Mais avant cela il convient de répondre à trois questions préalables dont dépendent l'opportunité, la faisabilité et la rentabilité du projet :

- La géologie, l'hydrologie et l'occupation actuelles du sol permettent-elle un aménagement urbain et à quelles conditions ?
- Le contexte (densité bâtie, valeurs foncières, attractivité de la situation, valeur du patrimoine naturel ou architectural, morphologie du site) justifie-t-il d'exploiter l'espace souterrain pour mieux préserver et valoriser la surface ?
- L'implantation souterraine est-elle pertinente pour les usages souhaités ?

Indépendamment des caractéristiques du territoire concerné et de ses avantages ou inconvénients, chaque usage a ses propres contraintes qui vont permettre de déterminer, en première approche, la pertinence d'une implantation en souterrain ou en hors sol. Au regard de ces contraintes et des caractéristiques du souterrain, il est possible de déterminer si l'usage pourrait se situer en souterrain et par conséquent la pertinence fonctionnelle de la programmation des ouvrages qu'il est prévu d'y situer¹³.

Types d'avantages	Avantages environnementaux			Avantages pour la sécurité				Avantages économiques		
Ouvrages ou activités	Préservation du territoire	Pollution atmosph. et visuelle	Bruit	Explosion, incendie	Vol, sabotage, guerre	Risques météo	Séismes	Construction	Exploitation	Maintenance
Routes										
Parkings										
Voies ferrées, métros										
Lieux publics (commerce, sport, spectacle, bibliothèque...)										
Réseaux de distribution (eau, gaz, électricité, télécoms...)										
Dépôts de ressources utiles										
Dépôts de déchets										
Centrales (électriques, télé-phon., épuration, incinération)										
Installations nucléaires										
Installations militaires										

Avantage très net de la solution souterraine	Avantage net	Avantage léger	Neutre, ou sans objet	Inconvénient léger vis-à-vis d'une solution en surface	Inconvénient important
--	--------------	----------------	-----------------------	--	------------------------

Tableau présentant les avantages des solutions souterraines selon le type d'ouvrage ou d'activité
(Source : « Utiliser et aménager l'espace souterrain », AFTES, 2009, p.105)

5.1. De la durabilité des aménagement souterrains

L'implantation souterraine permet-elle de contribuer au développement d'une ville durable ? L'économie d'espaces ouverts engendrée par ce choix contribue a priori à la durabilité de la ville mais

¹³ Thème 1 : SOCIO ECONOMIE, boîte à outils d'évaluation de projets souterrains, fiche 6, page 37 à 43, juillet 2014, R02.

il convient de vérifier que son impact économique et social et l'empreinte environnementale de l'aménagement résultant (consommation, renouvellement et préservation des ressources naturelles) soient globalement positifs. Il s'agit d'évaluer le bilan final d'un aménagement intégrant la dimension souterraine en le confrontant à celui d'un aménagement où le sous-sol n'est utilisé que comme infrastructure.

La durabilité de l'aménagement urbain est depuis plusieurs années au cœur des stratégies d'aménagement. Dans ce contexte, de nombreuses prescriptions et méthodes ont été élaborées au niveau français, européen ou international. Elles ont été recensées dans le cadre d'une thèse conduite avec le soutien du projet Ville10D. Si l'espace souterrain n'est généralement pas considéré en tant que tel, les questions soulevées, les thèmes et domaines abordés et les démarches proposées peuvent parfaitement s'y appliquer et permettre d'évaluer si le recours à une solution souterraine contribue à la durabilité globale d'un projet urbain.¹⁴

5.2. Des outils d'évaluation et des indicateurs de durabilité

5.2.a. *Evaluation du cycle de vie*

Ville 10D a proposé et testé une méthodologie d'évaluation des ouvrages souterrains dans le cadre d'une approche systémique, comprenant les différentes composantes du développement durable. Cette méthodologie s'appuie sur l'analyse du cycle de vie (ACV), l'objectif étant de montrer tout l'intérêt d'une meilleure articulation entre surface et souterrain, et d'aider à prendre le choix le plus pertinent entre plusieurs scénarios d'aménagements, y compris la solution souterraine.

Les avantages et inconvénients des ouvrages souterrains sont classés selon les différents volets du développement durable (environnementaux, socio-économiques) et selon les différentes phases du cycle de vie de l'ouvrage souterrain. Cela permet d'illustrer ses bénéfices et de proposer des solutions possibles à ses inconvénients. Une méthodologie d'évaluation des ouvrages de construction souterrains au sens du développement durable (multicritère : environnemental, social et économique) a été développée. Cette méthodologie se caractérise par :

- la prise en compte des indicateurs du développement durable adaptés pour ce type d'ouvrage qui peuvent être également associés aux fonctions du projet ;
- l'analyse tant de l'espace souterrain que de l'espace offert en étudiant l'interface entre les deux parties du projet urbain et en incluant les fonctions, la décongestion en surface, l'accessibilité, le quartier étant adopté comme échelle opérationnelle ;
- la prise en compte des différentes fonctions possibles pour un ouvrage de construction souterrain, en réalisant une typologie de ces fonctions ainsi que projets souterrains ;
- la prise en compte de la totalité du cycle de vie de l'ouvrage, en utilisant l'outil ACV et les indicateurs quantitatifs associés, tout en identifiant les unités fonctionnelles et les systèmes d'évaluation.¹⁵

5.2.b. *Analyse du cycle de vie et gestion des MEX*

Ville 10D a réalisé une Analyse du Cycle de Vie (ACV) de la valorisation de matériaux d'excavation (MEX) issus de projets d'ouvrages souterrains. L'ACV porte sur la gestion des matériaux d'excavation et l'étude du bénéfice environnemental de leur réutilisation relativement à l'impact de leur transport et de leur traitement. Elle se base sur un projet réel, il s'agit du tunnel « mode doux » de la Croix Rousse (Lyon) qui a été défini comme projet de référence pour cette étude. L'ACV a permis tout d'abord d'étudier l'influence de différents paramètres sur la performance environnementale globale de la gestion des MEX depuis la sortie du tunnel jusqu'au site de réutilisation. Ces paramètres sont les suivants : le type de transport des MEX, les proportions de MEX valorisés à proximité du site, les proportions de type de granulats obtenus après traitement, la méthode d'évaluation et notamment de la gestion des multifonctionnalités. Différents scénarios ont donc été étudiés et comparés :

¹⁴ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, étude analytique d'aménagements urbains et souterrains, page 24 à 6, septembre 2014, R04.

¹⁵ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, méthodologie d'évaluation du cycle de vie des aménagements souterrains, janvier 2016, R28.

- gestion réelle à partir des données collectées ou estimées,
- gestion maximisant le transport fluvial,
- gestion maximisant la réutilisation proche du site,
- gestion maximisant la réutilisation en granulats ayant le plus de valeur.¹⁶

5.3. De la résilience des aménagements souterrains

Les catastrophes naturelles provoquent des dommages économiques toujours plus importants auxquels s'ajoutent des impacts sociaux et environnementaux conséquents. Le concept de résilience permet d'appréhender et d'analyser le risque et ses conséquences. Dans le cadre de Ville 10D les travaux sur ce thème ont été appliqués aux systèmes de transport guidé de personnes. Après avoir caractérisé la vulnérabilité de ces systèmes face à des aléas naturels, il a été déterminé non seulement les effets directs d'un aléa hydrologique mais aussi ses effets indirects. En effet, lors d'une défaillance initiale d'un composant, cette défaillance peut se diffuser au sein du système ce qui entraîne la défaillance consécutive d'un autre composant dont le fonctionnement est lié au premier. Ainsi, des « effets domino », constatés dans des cas d'incidents sur des systèmes de transport dus à une inondation sont possibles et doivent être caractérisés et anticipés. L'analyse fonctionnelle a mis en évidence que la dimension souterraine d'un système de transport guidé avait un rôle d'amplification et de diffusion du risque hydrologique au sein des composants du système. A l'inverse, face à l'aléa de vents forts, la dimension souterraine réduit la vulnérabilité des systèmes de transport. Le travail réalisé a permis de préciser la vulnérabilité d'un système en mettant en évidence les composants à l'origine de cette vulnérabilité.¹⁷

Les risques de l'aménagement sont multiples, financiers, juridiques, physiques. Face à « l'aversion du risque » sa bonne maîtrise est un atout. De ce point de vue le confinement du souterrain peut être un argument positif. Parmi les risques naturels, ceux liés à l'eau sont importants (inondation par remontée des nappes, altération de la qualité de la ressource, menace sur le potentiel géothermique) mais peuvent être évalués et réduits à la source par des aménagement techniques appropriés. Les risques anthropiques (accident incendie, attentat) sont particulièrement critiques en milieu souterrain du fait de son confinement et de son accessibilité difficile, ils appellent des approches spécifiques qui sont évoquées au chapitre suivant à partir des travaux du groupe de travail sur la sécurité en sous-sol.

5.4. Des outils pour évaluer la résilience des infrastructures

Un des travaux de recherche du projet Ville 10D a permis de construire un cadre d'analyse de la résilience des infrastructures critiques face au changement climatique traduit en termes de risques. Ce cadre d'analyse, décliné en 3 capacités (résistance, absorption, récupération) a pour objectif de rendre le concept de résilience opérationnel. Une méthodologie en deux temps permet d'évaluer la résilience des infrastructures critiques, sous l'angle de la première capacité du modèle, la résistance, intégrant des informations liées au sous-sol, et permettant de mieux comprendre les interdépendances de ces infrastructures. On obtient ainsi une première évaluation de la résilience des infrastructures critiques par l'étude de leur performance selon leur nature et leur environnement. Dans un deuxième temps, les relations d'interdépendances de ces infrastructures critiques ont été analysées, puis modélisées. Cette approche permet de mieux approcher la réalité de la propagation des risques, en cascade, au sein des ouvrages. En s'appuyant sur les analyses fonctionnelles et les analyses des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) de chaque infrastructure, un outil a été produit. Cet outil permet de générer l'ensemble des scénarios de défaillance en chaîne et d'évaluer la capacité de résistance des infrastructures critique vis-à-vis des risques liés au changement climatique. Pour analyser la contribution du sous-sol à la résilience, des outils de représentation spécifiques à l'échelle du territoire et intégrant les liens dessus-dessous doivent encore être élaborés.¹⁸

¹⁶ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, réutilisation des matériaux extraits du sous-sol, septembre 2015, R22.

¹⁷ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, résilience des systèmes de transport guidés, novembre 2014, R13.

¹⁸ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, évaluation de la résilience des infrastructures critiques, octobre 2015, R 21.

5.5. De la rentabilité des aménagements souterrains

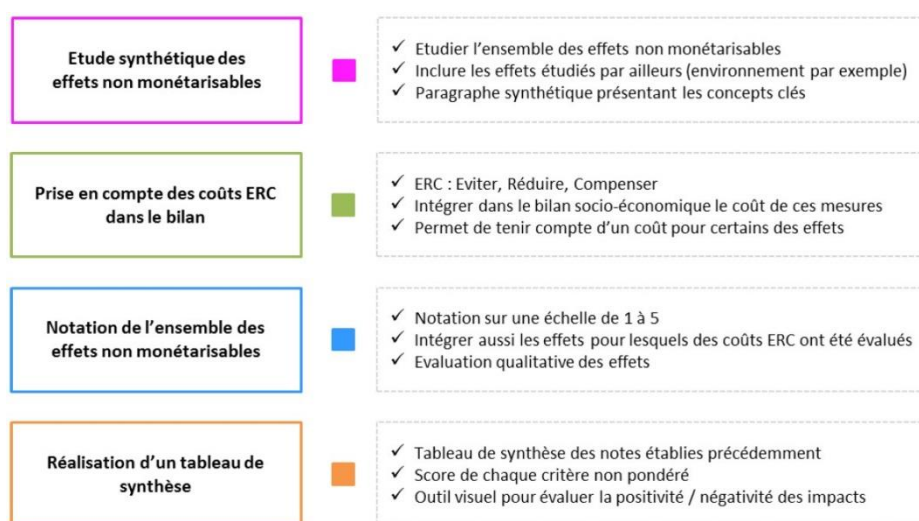
Le moteur de l'aménagement du sous-sol c'est la rareté de l'espace : c'est une solution couteuse mais nécessaire pour sauvegarder cette ressource. Néanmoins la rentabilité de l'option intégrant la dimension souterraine au projet urbain doit être démontrée pour être préférée aux approches traditionnelles. Pour lui donner sa chance, cette rentabilité doit être évaluée à long terme et au regard de l'ensemble de l'opération urbaine ce qui suppose de répondre à plusieurs questions :

- Quelle valorisation des espaces souterrains peut résulter de l'aménagement ?
- Quel coût de fonctionnement ?
- Quel retour sur investissement ?
- Quel revenu induit prendre en compte ?
- À quelle échelle urbaine faut-il évaluer l'opération pour mutualiser les coûts ?

C'est une approche globale qui révélera l'intérêt financier d'un aménagement souterrain sans oublier que la valeur d'un projet dépend de son contexte, notamment de la densité urbaine et des valeurs immobilières et foncières sur le site en projet. La mutualisation des coûts à une échelle suffisamment large permet de trouver des modèles financiers différents : par exemple, à la Défense, les parcs de stationnement créent une ressource financière substantielle qui pourrait être affectée à l'aménagement du site. L'approche financière doit être globale au regard de l'étendue du projet mais aussi de sa temporalité de réalisation et d'exploitation. Le projet « clé de sol » sur les galeries multi-réseaux a montré l'importance de la gestion ultérieure des aménagements, leur coût est élevé à la réalisation mais elles permettent une économie substantielle à l'usage.¹⁹

5.6. Des outils pour évaluer l'intérêt socio-économique

Ville 10D a pour objectif de proposer des outils pour évaluer l'intérêt socio-économique et social d'une réalisation souterraine. Il s'agit de mettre en évidence les usages préférentiels du sous-sol, d'évaluer les coûts et les surcoûts des aménagements souterrains, d'évaluer les avantages et inconvénients directs et indirects de ces aménagements. Un état de l'art des outils d'évaluation socio-économique a été réalisé afin de recenser les pratiques en France et à l'étranger et les outils et les démarches existantes en la matière²⁰.



Méthodologie préconisée par le groupe de travail

¹⁹ PROJET NATIONAL « CLE DE SOL » : guide pratique des galeries multiréseaux, août 2005.

²⁰ Thème 1 : SOCIO ECONOMIE, état de l'art des outils d'évaluation socio-économique et de la monétarisation des externalités environnementales, juillet 2014, R02.

Ville 10D propose une méthodologie d'évaluation économique des espaces souterrains en phase amont d'un projet. Son modèle économique s'intègre ainsi dans une vision d'ensemble à l'échelle d'un projet d'aménagement. Il est proposé d'étudier un périmètre qui comprend les espaces créés en sous-sol mais également les espaces libérés en surface. En effet, investir le sous-sol permet de déplacer des volumes de la surface au souterrain, et de donner un usage nouveau aux volumes libérés en surface : logements, bureaux, espaces verts, ou autres. L'approche économique permet dans ce cas de porter un double regard : celui de la rentabilité de l'espace souterrain en tant qu'entité indépendante, mais aussi et surtout celui de la rentabilité globale du projet d'aménagement en intégrant les fonctionnalités nouvellement créées en surface. Pour cela, il convient dans un premier temps d'estimer les coûts d'investissement et de fonctionnement de l'espace souterrain seul et de les mettre en regard des recettes qui peuvent être générées. Dans un second temps, les espaces en surface sont intégrés à l'évaluation pour prendre en compte les éventuelles économies d'investissement en surface, les pertes de recettes des espaces transférés de la surface au sous-sol, mais également les recettes générées par les volumes libérés auxquels un nouvel usage peut être donné (en particulier davantage de logements). Cette approche a été déclinée sur le cas réel de la ZAC Marne Europe autour de la gare du Grand Paris Express. Au cours d'un atelier collaboratif, trois pistes contrastées de déclinaison dans la dimension souterraine d'une partie du programme ont été proposées et évaluées Ouvrant la voie à de nouvelles options et mettant en évidence leur impact économique sur le projet.²¹

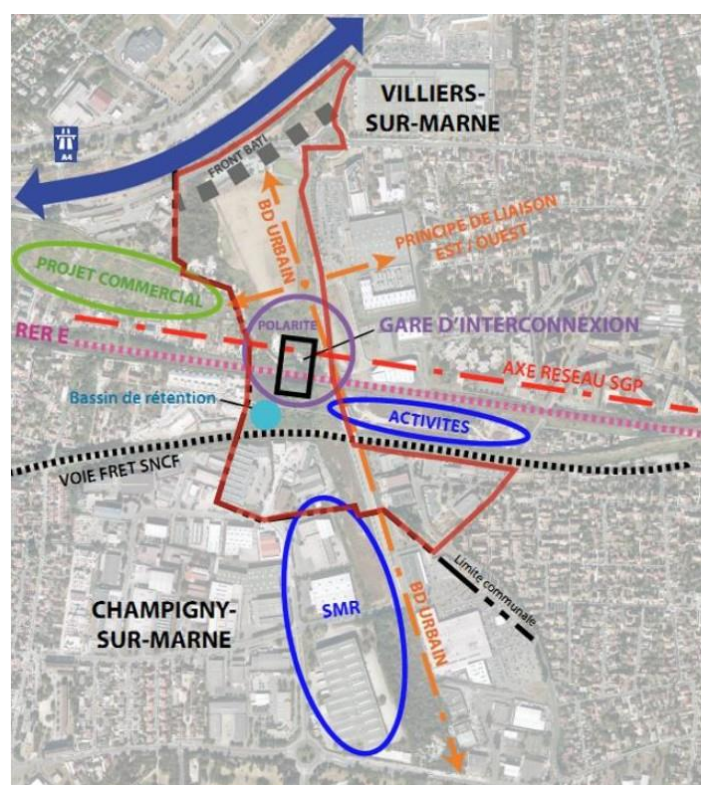


Schéma de développement de la ZAC Marne-Europe (Source : Epamarne)

²¹ Thème 1 : SOCIO ECONOMIE, nouveau business model pour les espaces souterrains incluant l'infrastructure, mai 2016, R30.

6. Optimiser et sécuriser l'usage urbain du sous-sol

Le recours à l'espace souterrain pour développer la ville est freiné par son image négative, sa qualité architecturale trop souvent médiocre et des garanties de sécurité insuffisantes. Promouvoir l'usage urbain du sous-sol suppose de le rendre plus désirable, agréable, adaptable, sûr et résilient. Le projet Ville 10D a donc recherché les voies et moyens pour optimiser son aménagement :

- quelle organisation et quel aménagement des espaces souterrains accessibles pour les rendre plus accueillant ?
- comment mieux exploiter et valoriser les qualités et les potentiels de l'environnement souterrain ?
- comment garantir la sécurité et la résilience des espaces souterrains pour tous ses usages et ses usagers ?

Le projet formule des propositions et des recommandations pour rendre les espaces souterrains plus attractifs et plus sûrs.

6.1. De la conception architecturale des espaces souterrains

Les espaces souterrains suscitent des peurs qui sont liées à un imaginaire. Ville 10 D a cherché à établir les points cardinaux de l'imaginaire de la profondeur souterraine en s'appuyant sur les travaux de l'anthropologie. Celle-ci établit que cet imaginaire nourrit une relation émotionnelle et affective à l'espace qui est structurante de l'expérience d'un monde. Cinq points cardinaux ont été établis, la profondeur, la clôture, l'absence de repère, l'espace en creux, l'espace dessous un dessus. L'imaginaire du souterrain, marqué par l'angoisse laisse aussi place au repos, à la quête initiatique et à l'envie de se dépasser, au plaisir de l'exploration et à la subversion créatrice. L'ambivalence de ces qualités fait la richesse de notre expérience et nous permet de nourrir des pistes pour l'aménagement des espaces souterrains urbains afin qu'ils puissent être intégrés dans l'expérience d'un monde, celui de la ville.²²

Réussir l'intégration des espaces souterrains à la ville suppose d'articuler les espaces du dessus et les espaces du dessous et d'assurer une continuité d'aménagement entre le sol et le sous-sol. La qualité architecturale des espaces accessibles est essentielle pour qu'ils soient agréables et attractifs. Pour éviter la claustrophobie et offrir un cadre accueillant, il faut que la ville en sous-sol soit compréhensible et lisible grâce à un dessin structuré, à des espaces différenciés et séquencés, à des repérages et des signaux clairs. Les espaces souterrains doivent offrir des volumes généreux pour éviter l'impression d'écrasement et d'enfermement et bénéficier d'une qualité architecturale adaptée grâce au jeu des niveaux, à la pénétration de la lumière naturelle, à la conception des cheminements, au choix des matériaux et des couleurs, à une ambiance sonore maîtrisée, etc. Une conception tridimensionnelle du projet permettra d'emboîter et d'interpénétrer le dessus et le dessous et de faire entrer aussi loin que possible la lumière et l'air libre dans le sous-sol.²³

L'état de l'art sur l'aménagement souterrain, établi dans le cadre des travaux de Ville 10D, a témoigné à la fois d'une multitude d'approches spécialisées, et d'un manque de recul sur des initiatives de planification souterraine de plus en plus nombreuses. Les observations et enquêtes conduites dans les souterrains du quartier de La Défense²⁴ ont montré que les outils de l'urbanisme et de la composition urbaine, basés sur la continuité des espaces et le partage entre espaces publics et privés, ne sont pas adaptés. Il y a dans les sous-sols de La Défense une partition entre espaces publics, fonctionnant horizontalement, et espaces privés, fonctionnant verticalement. Cette partition est moins visible, mais tout aussi contraignante que la division fonctionnelle entre usages urbains et usages techniques. Envisager le prolongement des espaces urbains en souterrain oblige à changer ou à adapter les

²² Thème 3 PSYCHO-SOCIAL, ambivalence de l'imaginaire des souterrains urbains, novembre 2014, R15.

²³ Synthèse de la tranche 1, page 10, décembre 2014, R18.

²⁴ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, expérience de la ville souterraine et des transitions, novembre 2014, R16.

références de l'aménagement, pour tenir compte d'un vécu et de pratiques qui ne sont pas forcément les mêmes qu'en surface.²⁵

La confrontation des pratiques aux fonctions des espaces souterrains du quartier de la Défense a mis en évidence l'habitabilité inattendue des espaces sous dalle, pourtant affectés aux fonctions de circulation des personnes, des marchandises et des fluides propres aux infrastructures. Mais l'examen des conditions de cette habitabilité en montre les limites et les difficultés. L'intériorité protectrice identifiée de prime abord s'avère également étouffante et menaçante appelant un aménagement des lieux destiné à les rendre plus sûrs et plus agréables.²⁶

Suite à ces constats, cinq leviers sont proposés pour contribuer à un aménagement satisfaisant de l'espace urbain souterrain.

6.1.a. Intervenir à différentes échelles et pour différents niveaux de perception

Dans des espaces souterrains qui sont à la fois confinés et successifs, où les effets d'enveloppement des parois ont une profondeur, la complémentarité entre le tactile, le visuel et le sonore définit une triple échelle de référence. L'échelle "urbaine" n'est pas purement visuelle, elle mobilise la relation sensorimotrice entre une personne et le monde qui l'entoure. En cela, elle renvoie à une logique, à la fois spatiale et programmatique, qui organise l'enchaînement et la succession des pratiques dans l'espace et dans le temps. Ce n'est pas la transition entre le dessus et le dessous qui est au cœur de l'aménagement, ce sont les enchaînements entre les différents lieux souterrains qu'il importe d'aménager pour rendre agréable une pratique vécue des espaces. C'est une question d'orientation, pour faciliter le repérage dans l'espace mais aussi d'anticipation des pratiques pour identifier la consistance et la disposition des lieux ou pour d'améliorer la visualisation des parcours et des issues. L'échelle du proche ou du tactile correspond à un niveau de perception au plus proche de l'individu et de ses récepteurs. Ici l'aménagement doit être "au plus près des parois" car, si la présence des murs, du sol, du plafond est particulièrement forte, voire parfois oppressante, ces pleins et ces surfaces modèlent la forme des espaces souterrains et leur donnent une texture. C'est aussi une présence pleine et non surfacique. Ce premier levier implique, systématiquement, de mettre en relation l'échelle tactile et l'échelle urbaine.

6.1.b. Des dimensions encore à explorer : le sonore et l'organique.

Ce deuxième levier correspond à des dimensions non explorées dans le PN Ville 10D. La dimension sonore s'est avérée importante, pour la perception dans l'espace, le confort et l'orientation. Elle a fait l'objet d'une proposition d'action de recherche qui n'a pas pu être engagée. La dimension organique a d'abord été identifiée comme un manque de terre, d'eau, d'air, de végétation, etc. Elle a été développée, dans le séminaire « Sous les pavés, la ville » en lien aux qualités physiques des milieux souterrains et à la manière dont ces qualités peuvent contribuer ou non au confort ambiant des environnements souterrains. Une séance de ce séminaire « Quels sont les qualités des milieux souterrains ? » a abordé l'apport des éléments (eau, air, terre), présents en souterrain, pour le confort ou l'inconfort des espaces.²⁷

6.1.c. Convoquer l'expérience pour aménager

Ce troisième levier est d'ordre méthodologique. Convoquer le sentir implique de le mobiliser à un moment donné et pour chaque personne impliquée : maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, ingénierie, urbaniste, architecte, paysagiste, artiste, usager, habitant. Il s'agit d'ouvrir un espace et un temps de discussion et de partage en se situant concrètement dans l'espace souterrain, à son contact immédiat dans la manière de fouler le sol. Cela implique de laisser les cartes et les plans pour se situer au sein du monde souterrain. Il y a un paysage, en souterrain, car l'espace ne s'arrête pas aux parois et offre

²⁵ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, morphologie des transitions, trame urbaine et paysage en souterrain, novembre 2014, R11.

²⁶ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, utilisation entre sol et sous-sol, novembre 2014, R14.

²⁷ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, morphologie, spatialité, cartographie des espaces souterrains, pages 135 et 136, novembre 2015, R24.

une qualité traversante. Parce que nous sommes en souterrain, cette qualité traversante est horizontale, avec des à-côtés et ce qui est de l'autre côté des parois. Elle est aussi verticale, avec un dedans, un dessous et un dessus. Cette approche permet d'aller au-delà d'un état des lieux pour se projeter ailleurs, y compris dans des dimensions invisibles. Il s'agit d'appréhender le projet, comme on trace un chemin, en dessinant un espace et en étant aussi un interprète à la manière d'un chorégraphe.²⁸

6.1.d. Dé-segmenter les espaces et introduire des "by-pass" et des transitions

Le quatrième levier, lié aux précédents, concerne la segmentation des espaces, identifiée dans nos observations-explorations et dans la plupart des études sur l'aménagement souterrain. Chaque volume est d'abord un creux, avec une configuration géométrique autonome, et les systèmes souterrains, contrairement aux systèmes urbains de surface, sont d'abord composés par des juxtapositions de volumes creux. Les segmentations, contraignant la pratique des espaces, sont liées aux modalités d'agencement des volumes entre eux, autant qu'à une division des fonctions. Il s'agit donc de réfléchir conjointement à la succession des espaces et à l'agencement des programmes.²⁹

6.1.e. Un paradoxe : la multifonctionnalité d'environnements spécialisés

Le cinquième levier est à l'origine un verrou. Nous avons identifié une importante multifonctionnalité dans des espaces aux fonctions séparées. Or, les règles de sécurité incendie sont définies à partir d'une équivalence opérée entre la fonction et le type d'occupation prévue : catégories tunnel, centre commercial, etc. Ainsi, les règles de sécurité favorisent la séparation des fonctions qui rend leur détermination et leur application plus simple et moins contestable. De plus, la gestion des fumées (extraction, cantonnement, etc.) et la prévention de la propagation des incendies par des coupe-feu favorise la segmentation des espaces. Comment évaluer les conditions de sécurité d'une répartition des programmes et d'un agencement de volumes à la fois confinés et successifs ? Comment introduire des by-pass, créer des zones tampon ou ouvrir des cours en profondeur ?³⁰

6.2. Du traitement de la lumière en sous-sol

Notre organisme est en échange permanent avec la lumière dont il reçoit des indices et des repères qui déclenchent les fonctions biologiques et agissent sur notre santé. Le manque d'exposition à la lumière naturelle est susceptible d'avoir un impact négatif sur notre santé et notre bien-être. L'absence d'accès à la lumière naturelle est donc potentiellement un problème pour des personnes séjournant quotidiennement dans les espaces souterrains ce qui suppose de leur offrir la possibilité de remonter périodiquement en surface ou d'accéder à un environnement reproduisant les attributs lumineux d'un espace extérieur. Par ailleurs, la clarté, la couleur des surfaces, la répartition de la lumière entre le sol, les murs et le plafond ont une grande influence sur la perception d'un lieu lui permettant de paraître plus grand ou plus petit, plus ou moins chaleureux. Prévoir un aménagement lumineux adapté dans des espaces formant « clairières » est un facteur important de qualité du séjour dans un espace souterrain complexe. Le projet Ville10D a recensé de nombreux exemples d'aménagement et recherché les stratégies les plus prometteuses au regard de la réaction des observateurs.³¹ L'enquête conduite sur cette base permet de dégager des perceptions positives ou négatives et de formuler des recommandations sur la manière de traiter la lumière, les couleurs, les surfaces, les formes et images. Concernant la présence de lumière naturelle, trois voies sont possibles. La première est de donner par la lumière artificielle l'impression de lumière naturelle, mais cela n'a pas le même bénéfice sur la santé. La deuxième est d'intégrer à l'ensemble souterrain des espaces

²⁸ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, morphologie, spatialité, cartographie des espaces souterrains, pages 136 et 137, novembre 2015, R24.

²⁹ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, morphologie, spatialité, cartographie des espaces souterrains, pages 137 et 138, novembre 2015, R24.

³⁰ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, morphologie, spatialité, cartographie des espaces souterrains, page 138, novembre 2015, R24.

³¹ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, Influence de l'éclairage sur la perception des espaces souterrains, mars 2014, R01.

ouverts sur l'extérieur (principe du puits de lumière). La troisième est de transférer la lumière naturelle en profondeur par des fibres optiques.³²



Puits de lumière à la Défense (à gauche), à la station Toledo de Naples (à droite)

6.3. De la végétalisation des espaces souterrains

Dans la perspective d'un développement durable des villes, les espaces souterrains, à l'instar des friches industrielles et urbaines, constituent des opportunités foncières intéressantes. Mais si la requalification fonctionnelle des friches urbaines peut être difficile, la valorisation des espaces souterrains pose également problème car ces espaces sont souvent perçus comme très peu attractifs par les populations urbaines qui ne fréquentent généralement les souterrains des villes que pour se déplacer. La mise en place de scénographies paysagères intégrant du végétal fait partie des solutions qui permettent l'amélioration de la perception des espaces souterrains par les usagers. Ils contribuent à la valorisation esthétique de ces espaces mais aussi à rendre de nombreux services d'ordre écosystémique permettant, par exemple, l'assainissement de l'air et la régulation thermique de ces espaces confinés. Les bienfaits des végétaux sont aujourd'hui démontrés, les aménagements paysagers développés sous différentes formes présentent en effet des bénéfices considérables et principalement en termes de cadre de vie et de confort.

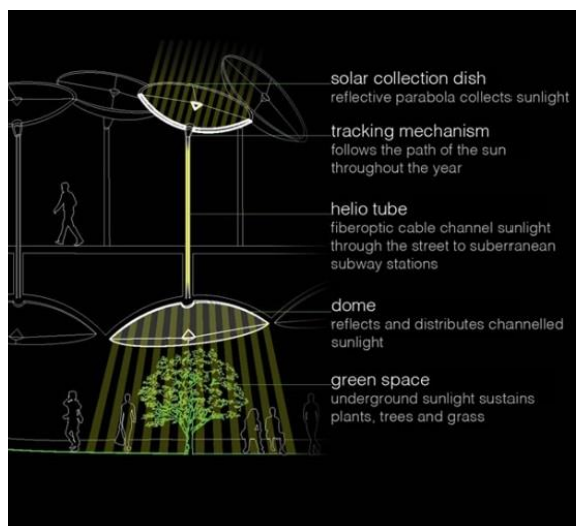


Le jardin exotique de la station « Gare de Lyon » à Paris

(Sources : E. BRETON, 2015 (s.l.d.) – Séminaire organisé pour les formations MD2A2 de TECOMAH, juin 2015)

Pour permettre cette valorisation par le végétal, il est nécessaire, au préalable, de lever les contraintes permettant l'installation et la durabilité des éléments vivants intégrés dans les aménagements paysagers imaginés dans les sous-sols et souterrains. Les technologies mises en œuvre grâce au génie végétal et au génie urbain permettent de lever la plupart de ces contraintes et de les pérenniser. Un certain nombre d'ouvrages tels que les murs végétalisés ont d'ores et déjà été mis en œuvre dans de nombreux espaces souterrains de grandes métropoles. Mais il est possible d'imaginer des aménagements paysagers beaucoup plus développés, comme en témoigne l'expérience de la Low Line à New York, exemples qui peuvent contribuer à changer l'image des espaces souterrains.

³² Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, amélioration par l'éclairage de l'acceptabilité des espaces souterrains, septembre 2015, R23.



Système de collection/ transport de la lumière naturelle du parc souterrain « Lowline », New York

6.3.a. Les contraintes de la végétalisation en sous-sol

L'installation d'aménagements paysagers intégrant du végétal dans l'espace souterrain exige de prendre en compte un grand nombre de facteurs pour parvenir à obtenir des résultats pérennes. Outre les problématiques de luminosité, d'apport en eau et de maintenance, les aménagements paysagers peuvent être soumis à différentes épreuves. En effet, des actes de malveillance (vandalisme, problèmes d'incivilité) et des usages inadaptés peuvent contribuer à leur dégradation accélérée. De ce fait, il est nécessaire de prévoir dès la conception des ouvrages des systèmes de mise en défense des aménagements paysagers mais aussi de sensibiliser les usagers sur la fragilité des espaces végétalisés plus sensibles aux agressions extérieures dans les souterrains qu'en surface. De la même manière, les surfaces disponibles et les volumes des espaces étant généralement limités, les aménagements réalisés en sous-sols ne peuvent être comparables à ceux qui sont aménagés en partie aérienne : ils seront de taille plus réduite et ne pourront accueillir a priori le même type de sujets végétaux.

6.3.b. Des solutions techniques nouvelles pour répondre aux besoins des végétaux

Développées récemment par l'industrie, par les filières de l'aménagement paysager ou le génie végétal, différentes technologies permettent de pallier les déficits en apport de lumière naturelle et en eau.



*Exemple de LED horticole installé au droit de la composition végétale
(Sources : E. BRETON, 2015)*

Plusieurs techniques de mise en lumière artificielle, dont certaines innovantes, permettent de compenser les apports lumineux. La solution la plus simple à mettre en œuvre est un éclairage artificiel. Un éclairage horticole permet par exemple d'alimenter et de contrôler l'apport en lumière pour les

plantes et de respecter le photopériodisme. Le principe de mise en lumière naturelle le plus simple est celui du puits de lumière. La technique consiste en la réalisation d'une ouverture vitrée dans la couverture. Cette baie permet de laisser passer la lumière dans les espaces situés en dessous. Mais ce type d'aménagement assez classique n'est possible que dans certaines conditions d'infrastructures (épaisseur faible de la couverture, absence de réseaux, résistance de l'édifice, etc.) et pour des volumes souterrains qui ne sont pas trop éloignés de la surface

Les solutions permettant l'apport d'eau dans les aménagements paysagers souterrains sont similaires à celles utilisées pour n'importe quel parc ou jardin. Cependant, une attention particulière sera apportée à leur réalisation ainsi qu'à leur gestion puisque ces apports seront les seuls reçus par les végétaux. Par conséquent, ils devront strictement répondre à leurs besoins et être contrôlés régulièrement et selon la consommation des plantes. L'adaptation des apports d'eau peut être effectuée grâce à des sondes tensiométriques qui mesurent la disponibilité en eau des racines et qui permettent « piloter » l'irrigation de manière automatique et optimale

La qualité des aménagements perçue par les usagers dépend en grande partie de l'entretien et des opérations de maintenance qui sont faites. De ce fait, et a fortiori lorsqu'ils sont très fréquentés, les aménagements végétalisés réalisés dans les espaces publics doivent faire l'objet d'une attention particulière. Les opérations de maintenance et d'entretien sur ces espaces sont importantes, car la mise en place d'une végétation implique de nombreuses opérations essentielles.

Il est possible d'installer des complexes végétalisés adaptées aux espaces souterrains, mais ces installations sont conditionnées par quelques variables principales telles que la surface disponible, la configuration des lieux, la fonction des sites souterrains et la profondeur du site à aménager. En effet, il est nécessaire de disposer de sites suffisamment vastes pour permettre l'installation de propositions végétales de grandes tailles. Dans le même ordre d'idée, il ne faut pas que les aménagements paysagers gênent la réalisation des fonctions et des usages pour lesquels ces espaces ont initialement été prévus. Les flux des passagers qui empruntent les couloirs pour se déplacer et les halls d'échange sont souvent très importants. Ainsi, il est préférable d'opter pour des aménagements de taille réduite et stratégiquement positionnés pour éviter que les aménagements paysagers fassent obstacles au passage de ces flux d'usagers et mettent à mal la sécurité des lieux.³³

6.4. De l'exploitation des ressources naturelles

6.4.a. L'eau

Face aux changements climatiques qui peuvent entraîner une baisse de la disponibilité en eau dans de nombreuses régions du monde, des villes comme Paris étudient la possibilité d'alimenter le réseau d'eau non potable à partir de ressources alternatives. Les ressources potentielles pour ce réseau sont notamment les eaux de nappes, les eaux d'exhaure des systèmes de chauffage et de climatisation, les eaux de pluie et de ruissellement traitées, les eaux grises et les eaux usées traitées. Les espaces souterrains aménagés sont forcément producteurs de ce type d'eau et il importe de pouvoir les réinjecter dans le réseau d'eau non potable. Les travaux conduits dans le cadre de Ville 10D ont permis de mieux connaître les points de production des eaux d'exhaure dans Paris et d'évaluer les possibilités d'utilisation de cette ressource. Le cas d'un parking souterrain a été analysé pour évaluer l'impact de l'injection dans le réseau d'eau non potable d'un poste de production d'eau d'exhaure.³⁴

6.4.b. Les matériaux

Les travaux conduits par Ville 10D pour réaliser une analyse du cycle de vie (ACV) de la valorisation des matériaux d'excavation sur le cas du tunnel « mode doux » de la Croix-Rousse à Lyon ont permis d'analyser les différents scénarios possibles en termes de stockage, de transport et de transformation de ces matériaux. L'étude ACV a permis de montrer que :

³³ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, viabilisation des espaces souterrains par l'aménagement paysager, novembre 2015, R26.

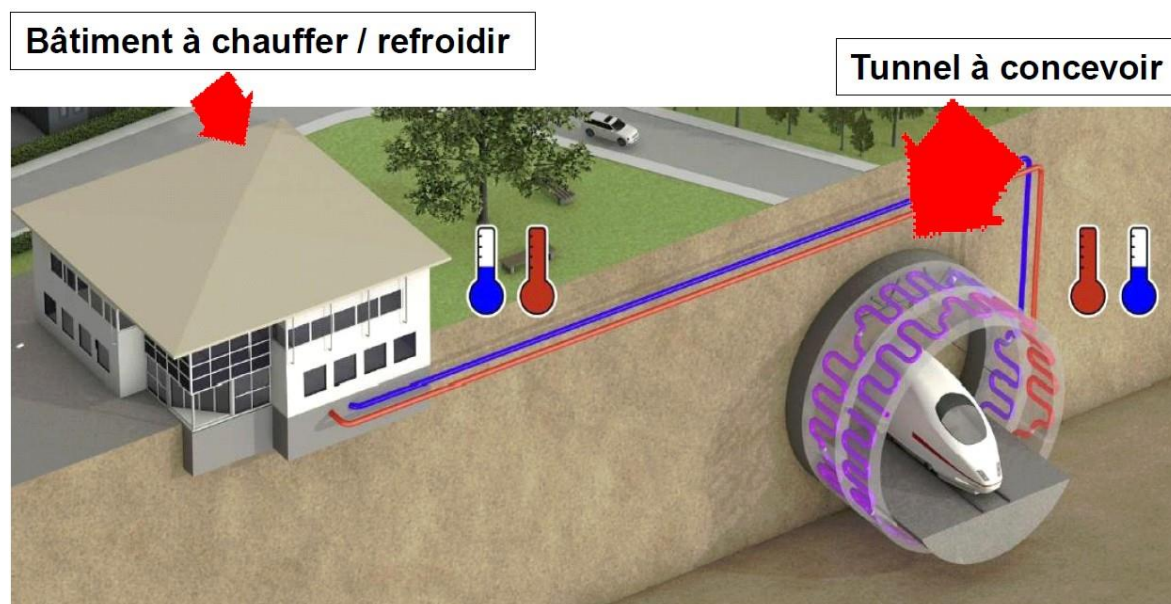
³⁴ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, valorisation des eaux d'exhaure à Paris, novembre 2014, R12.

- la réalisation d'une part d'un marinage par voie fluviale représente un bénéfice de 11 à 33% par rapport à un marinage exclusivement routier, selon les catégories d'impacts considérées.
- la maximisation du marinage fluvial, qui aurait éventuellement été possible en présence d'une zone de stock plus importante sur le quai Arloing et avec des barges supplémentaires, aurait permis de réduire les impacts de 2 à 12% par rapport au marinage effectivement réalisé, selon les catégories d'impacts considérées.
- le scénario présentant le moins d'impacts sur le changement climatique, l'acidification, les ressources abiotiques et l'énergie primaire non renouvelable est celui maximisant le recyclage sur site. Cette conclusion est à nuancer par les analyses d'impacts et de nuisances locales.
- la part de gestion des matériaux d'excavation dans un projet de réalisation de tunnel représente une part non négligeable des impacts sur le changement climatique et l'énergie primaire non renouvelable.

Elle montre donc l'importance d'anticiper et d'organiser en amont du chantier la gestion et l'affectation des matériaux excavés et l'impact très importante de cette question sur le bilan économique, social (notamment pendant la durée des travaux) et environnemental de l'aménagement³⁵.

6.4.c. La géothermie

L'intégration d'échangeurs géothermiques à l'architecture des infrastructures souterraines urbaines est une solution intéressante de mutualisation des coûts de construction visant à combiner transport et production d'énergie renouvelable. De nombreuses solutions sont possibles pour activer thermiquement les infrastructures quelle que soit la méthode de construction. Leur mise en œuvre est technologiquement simple mais nécessite une réflexion en amont du projet pour concevoir et dimensionner de façon optimale les aménagements. C'est une technique encore jeune et l'estimation exacte du potentiel énergétique et des retombées économiques est encore délicat et peu documenté. Elle présente cependant des opportunités intéressantes pour le mix énergétique dans une ville soucieuse de développer les énergies renouvelables.³⁶



*Concept de la valorisation de la chaleur stockée dans la roche constituant le sous-sol, associée à la construction d'un tunnel.
Illustration empruntée au support de communication de la société allemande Rehau
concernant le démonstrateur du tunnel de Jenbach en Autriche.*

³⁵ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, réutilisation des matériaux extraits du sous-sol, septembre 2015, R22.

³⁶ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, dispositifs de valorisation énergétique d'infrastructures souterraines, décembre 2014, R19.

Ville 10D étudie les paramètres du sous-sol pouvant influencer l'exploitation de la source d'énergie improprement dénommée « géothermie de très basse température » autour des tunnels. Le principe des tunnels géothermiques et la valeur ajoutée énergétique de cette innovation sont expliqués par l'étude. La méthodologie proposée a permis d'explorer le potentiel et la faisabilité d'un tunnel thermo-activé le long de la ligne du métro du Grand Paris Express qui présente une occasion exceptionnelle pour développer ce potentiel.³⁷

6.5. De la résilience des ouvrages

Le projet Ville 10 a expérimenté une démarche méthodologique de caractérisation de la vulnérabilité d'un système de transport guidé face à un risque naturel donné, en l'occurrence, le risque hydrologique (forte pluies et crues). Les résultats de cette méthodologie conduisent à des préconisations relatives au choix de conception, souterrain ou surface, selon la présence locale d'aléas naturels, en particulier pour les aléas hydrologiques. Bien que la configuration en souterrain soit moins favorable que la configuration de surface comme ceci a pu être conclu à partir de l'analyse fonctionnelle, cette vulnérabilité inhérente au souterrain semble pouvoir être restreinte à quelques composants précis. Le tunnel, comme composant qui propage le risque hydrologique, doit alors être conçu de manière à limiter cette prédisposition.

Dans ce contexte, plusieurs systèmes de transport dans le monde ont adopté des mesures structurelles permanentes (en situation normale) ou temporaires (en situation de crise, pendant l'inondation) afin de limiter la propagation des eaux au sein du tunnel et ainsi de limiter la défaillance en chaîne d'autres composants. Par exemple, le métro de Copenhague a modifié ses critères de conception de lignes nouvelles afin de prendre en compte le risque inondation dû à de fortes pluies à une montée des eaux (European Environment Agency, 2014). L'objectif premier est d'empêcher l'eau de pénétrer dans les tunnels à partir des stations de métro les plus exposées. Pour cela, les entrées des nouvelles stations présentent une marche supplémentaire pour limiter l'infiltration des eaux et des portes anti-inondations ont été positionnées à des endroits stratégiques afin de contenir les eaux au sein du réseau souterrain.³⁸



*Surélévation des entrées du métro de Copenhague
(European Environment Agency, 2014)*



*Porte anti-inondation dans le métro de Copenhague
(European Environment Agency, 2014)*

6.6. De la gestion des risques des aménagements souterrains

La réduction des risques (risque projet ou risque ouvrage) suit deux voies principales : une meilleure maîtrise des dangers (de l'occurrence des événements sources) et une réduction de la vulnérabilité du système. Ce constat s'applique naturellement aux risques de projet. Par exemple dans le domaine des

³⁷ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, géothermie de basse température en ville, janvier 2016, R29.

³⁸ Thème 2 : ENVIRONNEMENT, résilience des systèmes de transport guidés 2, novembre 2015, R25.

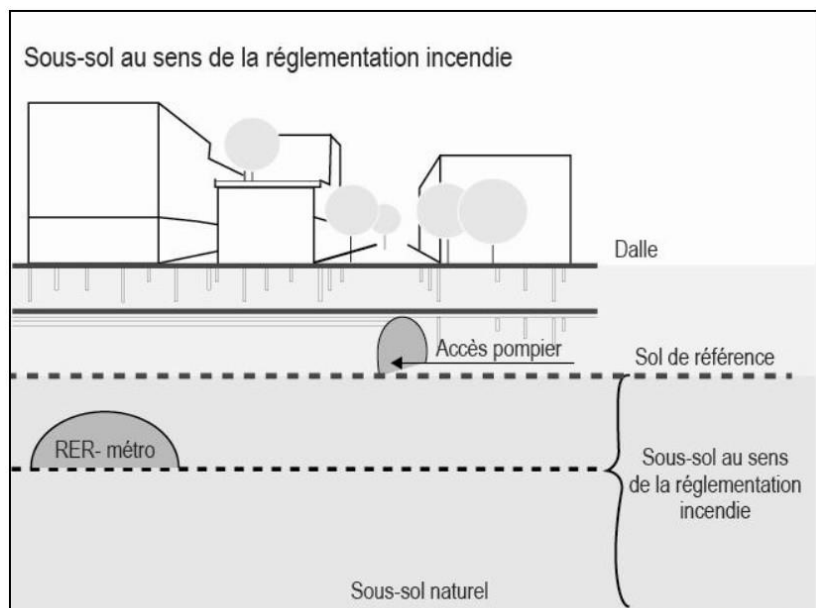
projets de travaux souterrains on pourra réduire l'occurrence d'un événement redouté, comme la rencontre non anticipé d'une couche de sol médiocre, par une meilleure reconnaissance préalable des sols. On pourra aussi réduire les conséquences de cet événement, s'il survient, par le choix d'une technique mieux adaptée à ces conditions, quitte à ce qu'elle soit un peu moins efficace dans les conditions les plus probables. Un management efficace du risque selon le processus, identification, analyse, évaluation, traitement, est donc une exigence particulièrement importante pour les projets souterrains. L'expérience des tunnels urbains montre que le management des risques peut être utilisé dans les trois phases du projet : conception, appel d'offre, négociation de contrat, construction. La démarche de maîtrise des risques doit reposer sur un travail en partenariat, encourageant la bonne communication entre les parties, maximisant les profits pour l'entreprise et minimisant les risques pour le client.³⁹

6.7. De la sécurité des personnes et des biens

La sécurité des personnes en cas d'évènement accidentel (incendie, inondation, attentat, etc.) est un enjeu majeur pour les espaces souterrains pouvant accueillir du public, sa mise en sécurité et son évacuation, comme l'intervention des services de protection civile étant souvent plus difficile qu'en espace urbain ouvert où l'accessibilité peut être multiple. La prise en compte de cette exigence a un impact significatif sur les coûts d'aménagement et impose des contraintes importantes en termes de conception, de configuration et de construction des espaces souterrains. Plusieurs principes de base sont à retenir. Le premier principe est de réduire le risque à la source et de limiter sa propagation. Cela impose des choix de matériaux adaptés mais aussi des dispositifs de maîtrise du risque (cloisonnement évolutif, sprinkler et brouillard d'eau, mur d'eau ou d'air, frein de fumée, appauvrisseur en oxygène). Mais la fiabilité de ces dispositifs ne peut être totale et doit être compatible avec la protection des personnes (extraction des fumées, issues de secours...). De plus, la maintenance des installations et systèmes doit être garantie, une stratégie de gestion de ces espaces étant indispensable pour garantir le bon fonctionnement des installations et gérer les flux de personnes vers les issues ou les lieux de confinement. Le deuxième principe est d'évacuer rapidement les personnes ou de les mettre en sécurité. La stratégie peut différer selon la profondeur. A faible profondeur (jusqu'à moins 10m environ) la priorité est à l'évacuation directe, sans attendre les secours, vers un espace ouvert à l'écart de la zone sinistrée. En plus grande profondeur, l'évacuation peut se faire vers des zones tampons sécurisées, assez longtemps pour attendre l'intervention des secours et un transfert progressif vers l'extérieur. La priorité est donc dans ce cas au compartimentage ce qui constitue une forte contrainte pour la conception architecturale des ouvrages. Le troisième principe est de garantir l'accessibilité pour les interventions de secours ce qui est rendu plus complexe par la profondeur. Celle-ci rend d'autant plus souhaitable des accès dédiés aux seuls secours avec un dimensionnement généreux et dans tous les cas exige une connaissance parfaite des lieux en 3 dimensions. Le groupe de travail organisé dans le cadre de Ville 10 D souhaite nourrir un cahier de recommandation à l'usage des maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage des aménagements urbains souterrains et si nécessaire, proposer des dispositions réglementaires mieux adaptées aux ouvrages constituant des espaces souterrains.⁴⁰

³⁹ Thème 4, VISUALISATION ET GESTION DES DONNEES, caractérisation des incertitudes et des risques en souterrain, novembre 2014. R10.

⁴⁰ Thème 5 : TRANSVERSAL, groupe de travail « sécurité des espaces souterrains », compte rendu de la réunion du 11 mai 2016.



7. Partager la connaissance du contexte et des projets en sous-sol

Comment faciliter la décision en donnant à connaître et à voir l'état actuel et futur des sites de projet dans leur environnement ? Les données nécessaires à la connaissance du sous-sol et de son potentiel sont extrêmement diverses. Elles sont produites et détenues par des intervenants de nature et de discipline très différentes, enregistrées et exprimées sur des supports et sous des formats souvent incompatibles. Par ailleurs la nature opaque du sous-sol complique la visualisation de ces données. Pourtant le croisement des disciplines et des champs de connaissance et le partage des propositions et projets entre de multiples acteurs sont des conditions incontournables pour concevoir et mettre en œuvre un projet urbain impliquant la dimension souterraine. Le projet Ville 10D a donc été à la recherche des méthodes et des outils susceptibles de mettre à la disposition de tous les acteurs les données nécessaires au récolement de l'environnement du projet et de donner à voir et comprendre les projets envisagés.

Sa démarche est complémentaire de celle du projet national MINnD qui s'attache à faciliter le croisement interdisciplinaire par l'inter-opérationnalité des systèmes de données. Face aux évolutions majeures des métiers des BTP, telles que la complexification des projets, le développement de l'éco-conception et des nouveaux types de partenariats entre les acteurs (PPP, concessions), l'obligation de maîtriser les risques (anticipation, identification, évaluation, répartition) ou encore le développement du BIM (Building Information Modelling), la maîtrise et le partage des informations sont des enjeux essentiels. Les plans, les notes et notices, les fichiers ont montré leurs limites. Pour le projet MINnD, le premier enjeu est donc de se doter d'une structuration et d'un standard d'échange des informations (reconnus sur le plan international) et d'outils adaptés qui seront, soit transversaux comme par exemple la maquette numérique, soit spécialisés comme les outils développés actuellement par chaque acteur.

7.1. Améliorer les méthodes d'acquisition des données

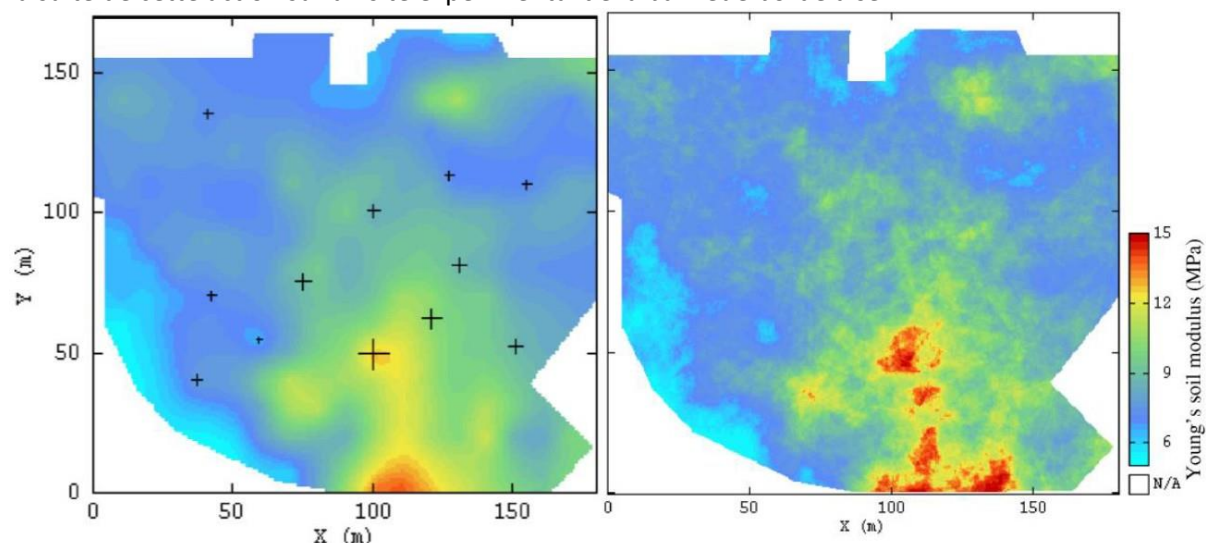
Le sous-sol est un espace méconnu et mal appréhendé. Cependant la connaissance du potentiel de ce milieu est essentielle pour envisager de l'utiliser à des fins d'aménagement et la connaissance fine de ses caractéristiques est indispensable pour y concevoir chaque projet d'aménagement ou de construction. Dans le cas de projets souterrains la majorité des constructions est trop souvent implantée dans un milieu mal ou insuffisamment connu. La connaissance du milieu souterrain nécessite l'acquisition d'informations multiples et nombreuses sur le site et son contexte, information naturelles (géologique, géotechniques ou hydrogéologiques) ou anthropiques (structures, pollutions, etc.). Ces informations peuvent être acquise par différents moyens (forages, essai in situ...) ou sont déjà disponibles totalement ou partiellement dans bases de données existantes mais elles sont difficilement accessibles et peu partagées.

Pour progresser dans la connaissance du sous-sol, Ville 10D a d'abord établi une synthèse des méthodes géostatistiques existantes et applicables à l'objectif recherché, à savoir comment prendre en compte des données issues de méthodes indirectes de type géophysique dans la construction de modèles géométriques utilisés dans le sous-sol (modèles lithologiques du sous-sol ou de paramètres géotechniques par exemple).⁴¹

Il a ensuite testé la mise en œuvre de ces méthodes, que ce soit les méthodes classiques ou, parmi les méthodes de modélisation les plus récentes, les méthodes multipoints. La géostatistique multipoints constitue une nouvelle approche, permettant d'améliorer la modélisation des fonctions aléatoires régionalisées dans les cas où la géostatistique bipoint reste limitée. La géostatistique multipoints, de plus en plus utilisée dans les domaines du pétrole ou de l'hydrogéologie, est utile lorsque les variogrammes ou covariogrammes sont difficiles à modéliser ou que les données présentent un caractère multimodal bien marqué. Compte tenu des objectifs du projet national dans le domaine de la reconnaissance du sous-sol, ces méthodes paraissent très bien adaptées du fait que les données

⁴¹ Thème 4 : VISUALISATION ET GESTION DES DONNEES, base de données dédiées à la connaissance du sous-sol, novembre 2014, R09.

directes sont toujours en nombre limité. Les données indirectes de type géophysique peuvent alors servir de données ou d'images d'entraînement, permettant d'aboutir à la reconstruction de modèles 3D lithologiques ou de paramètres géotechniques. Une application concrète sera mise en œuvre dans la suite de cette action sur un site expérimental de la banlieue bordelaise.⁴²



Cartes du module du sol obtenues par cokrigage (à gauche) et cosimulation (à droite)

7.2. Partager la connaissance du site et des projets

Dans l'environnement crypté des aménagements souterrains il est encore plus nécessaire de donner à voir les sites urbains. Ce besoin de visualiser s'exprime de façons différentes selon les stades de développement d'un projet :

- Quel est l'état précis du site à aménager, sa géomorphologie et l'implantation d'ouvrages préexistants ?
- Quelles sont les différentes variantes de l'implantation et de la géométrie du projet ?
- Comment les aménagements futurs seront-ils perçus ?
- Comment s'articulent les différentes composantes constructives du projet ?
- Comment faciliter l'usage d'un site urbain souterrain (orientation des usagers, orientation des secours, gestion des dispositifs de régulation) ?

Les outils informatiques permettant d'enregistrer les données dans des systèmes d'informations géographiques (SIG) et de les partager dans une visualisation en trois dimensions sont nombreux et diversifiés par leur structure, leur finesse et leur mode d'expression. L'utilisation croissante du BIM (building information modelling) dans l'élaboration et la réalisation des ouvrages contribue à favoriser le développement d'outils performants et adaptés à condition de dépasser le foisonnement des propositions pour parvenir à des standards permettant le croisement et le partage des données mais aussi une adaptation des produits aux différents besoins évoqués ci-dessus.

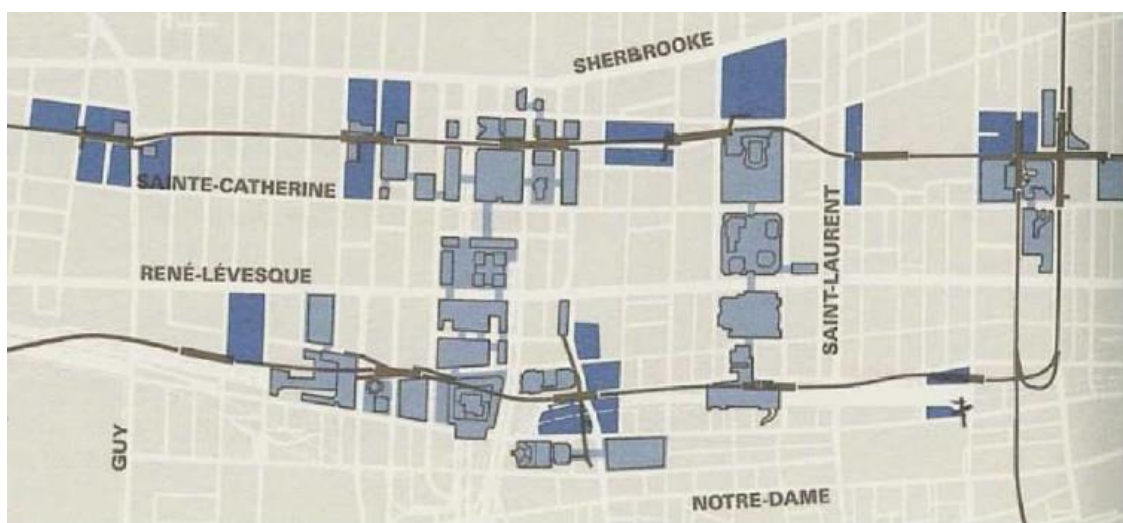
7.3. Naviguer en sous-sol

Se repérer et se diriger en sous-sol imposent des pratiques différentes de l'espace extérieur où la navigation se fait le plus souvent à vue avec des repères proches et des repères lointains et souvent des coordonnées géographiques repérable en deux dimensions. La revue de recherches menée par Ville 10D en ce qui concerne les stratégies cognitives de navigation permet de mieux comprendre les

⁴² Thème 4 : VISUALISATION ET GESTION DES DONNEES, intégration des méthodes d'acquisition indirecte dans la construction des modèles géométriques, juin 2016, R27.

mécanismes de mémorisation et d'orientation spatiale. Elle met en évidence trois questions clés. Premièrement le cerveau utilise différentes connexions selon la distance (proche, lointaine, environnemental) avec des conséquences sur les aides, la signalisation et l'architecture souterraine. Deuxièmement il y a une grande différence de stratégie cognitive selon les individus. Troisièmement la problématique d'un environnement à niveaux multiples et donc en 3D est cruciale pour la conception et l'habitabilité de l'architecture souterraine. Il apparaît préférable, dans la conception de réseaux souterrains, de favoriser la navigation dans la dimension horizontale et de libérer les parcours de contraintes strictes comme le font les couloirs. Il faut fixer un cadre géométrique reproduit sur différents étages, pour permettra aux usagers de confronter leurs différents parcours pour se faire une représentation fiable et intuitive de leur espace. En revanche, il semble très difficile de maintenir le lien avec la surface en raison de la rupture trop radicale entre la géométrie respective de chaque espace.⁴³

7.4. Cartographier l'espace souterrain

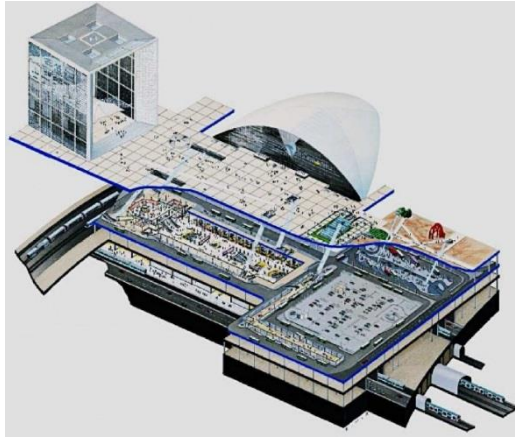


*Réseau piétonnier intérieur, existant (bleu clair) – développements autorisés (bleu foncé)
(Source : plan directeur d'aménagement de l'arrondissement Ville-Marie, Montréal, oct. 1990, p.74)*

Dans un environnement opaque comme celui du sous-sol la représentation cartographique est particulièrement utile pour circuler ou pour intervenir. Il y a principalement deux formes de représentation cartographique, les cartes géographiques et les représentations en architecture et en aménagement. Jusqu'à présent pour l'essentiel en 2D ces formes de visualisation prennent peu en compte l'invisible et rendent difficile la lecture du dessous, la cartographie des espaces souterrains étant partielle, occultant de nombreux espaces et sans lien à un espace de référence en surface. Pour que la cartographie puisse jouer pleinement son rôle dans l'espace souterrain elle doit mieux répondre à plusieurs attentes. Comment représenter l'invisible ? Comment rendre compte des temporalités ? Comment représenter la tridimensionnalité de l'espace urbain ? Comment articuler l'observé, le vécu, le représenté ? Sous quelle forme restituer les différents rapports à l'espace souterrain ? Quel apport de la technologie numérique ? Ville 10D a conduit un inventaire des cartographies utilisées sur le site de la Défense pour évaluer la lisibilité des différents types de cartographie, évaluer leur capacité à rendre compte des qualités d'usage des espaces souterrains et tester des représentations combinant différents types de représentation (perspective, axonométrie, vue géométrale). Ces cartographies sont abondantes et disparates. Elles permettent de visualiser les usages, les dynamiques, la qualité des espaces ainsi que les relations entre le dessus et le dessous au travers des émergences qui les signalent mais il est plus difficile de voir ce qui se passe entre les strates, les fonctions et leurs connexions. En

⁴³ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, stratégie cognitive pour la navigation en sous-sol en 3D, novembre 2014, R16.

recomposant en 3D ces vues fragmentées et en permettant leur séquençement, on pourrait développer des outils de visualisation qui, au-delà de l'information technique montreraient les configurations spatiales, les ambiances et les pratiques et permettraient aux acteurs de se mettre autour de la carte pour partager leurs visions du futur.⁴⁴



*Secteur de la salle d'échanges Cœur Transport, AUM Architectes.
(Source : <http://defense-92.fr/histoire>)*

⁴⁴ Thème 3 : PSYCHO-SOCIAL, cartographie des espaces souterrains, page 9 à 81, novembre 2015, R24.

8. Anticiper, arbitrer, piloter, gérer les projets souterrains

8.1. Partager des outils de connaissance, d'évaluation et de projection

La pratique de l'aménagement urbain a montré la nécessité de disposer d'outils adaptés de gestion et de visualisation permettant de croiser les données multisectorielles. Pour le sous-sol il n'existe aucun outil comparable à ceux utilisés pour la gestion et la conception de l'espace urbain et métropolitain. Les bases de données existantes sont trop spécialisées pour servir la démarche systémique qui est nécessaire. Il faut donc constituer des systèmes d'information géographique regroupant et croisant l'ensemble des données sectorielles nécessaires à une approche globale de l'espace souterrain des métropoles et leur adjoindre des outils de conception et de visualisation. Ces outils numériques de visualisation en 3D adaptés à la spécificité du sous-sol et à son opacité viseront à une meilleure connaissance et compréhension des contextes et à simuler et évaluer les projets souterrains.

Les principaux freins à la valorisation du sous-sol en tant qu'espace urbain sont sa méconnaissance et sa complexité. Exigeant une approche pluridisciplinaire et une vision d'aménagement à long terme, la mobilisation de la dimension souterraine appelle une approche systémique et chronologique du projet urbain alors qu'il est tentant pour les décideurs de préférer des solutions simplistes et à court terme plus faciles à justifier et à valoriser. Comment permettre à la gouvernance urbaine, lorsqu'elle conçoit et met en œuvre sa stratégie d'intensification urbaine, de prendre en compte la globalité des potentiels en incluant la dimension souterraine ? Pour le projet Ville 10D l'objectif est de proposer et recommander des conditions et des méthodes de gouvernance qui permettront d'initier et de conduire des projets urbains innovants et durables en intégrant pleinement l'espace souterrain. Cela nécessite de la part des décideurs et des pilotes de l'aménagement urbain une forte capacité d'anticipation et un volontarisme qui leur permettra d'arbitrer en amont sur une stratégie d'aménagement urbain innovante et de tenir le cap choisi sur le long terme. A cette fin, l'élaboration des projets urbains nécessite des démarches intersectorielles et globales mobilisant tous les acteurs.

8.2. Sensibiliser et mobiliser tous les acteurs du sous-sol

Les acteurs de l'aménagement du sous-sol sont multiples et leurs intérêts et leurs logiques très divers :

- Détenteurs du sous-sol (propriétaires du sol, bénéficiaire de servitudes d'utilité publique ou privée),
- Décideurs de l'aménagement urbain (Etat, collectivités territoriales),
- Maîtres d'ouvrage (EPA, SEM, aménageurs-promoteurs, SGP),
- Maîtres d'œuvre (architectes-urbanistes, sociétés d'ingénierie),
- Entreprises des BTP,
- Opérateurs (gestionnaires de réseaux urbains, transporteurs comme par exemple la RATP)
- Exploitants et gestionnaires de l'espace (par exemple DeFacto à la Défense, Unibail aux Halles),
- Organismes de secours (services de la protection civile, pompiers),
- Utilisateurs du sous-sol (usagers des transport et équipements, chalands, personnel de gestion et d'entretien, plus généralement, citoyens).

La conception et la mise œuvre d'un projet d'aménagement durable suscite de nombreux conflits entre ces acteurs mus par des intérêts différents. Un tel constat oblige à penser l'aménagement d'un espace souterrain durable et habitable à partir des réseaux d'acteurs, système de collectivités territoriales, d'institutions, d'entreprises, d'opérateurs privé et publics, de programmistes, de structures intermédiaires, d'individus et de communautés locales. Comment mettre autour de la table un groupe aussi hétérogène pour former un système d'arbitrage et de prise de décision capable de concevoir, construire et gérer des espaces souterrains durables et habitables ? Le processus d'élaboration de projet devra prendre en compte les différentes échelles depuis le micro-local jusqu'à l'agglomération

en passant par celle du projet urbain et de son insertion et disposer d'outils capables de repérer les champs d'arbitrage et leur interaction c'est à dire de visualiser le système décisionnel.⁴⁵

Comment éviter le cloisonnement fonctionnel, favoriser une meilleure identification des opportunités offertes par le souterrain et permettre l'échange et la collaboration de tous ces acteurs ? Ville 10D propose de constituer un lieu de partage de données et d'information et de mise en réseau sous la forme d'un « observatoire des espaces souterrains » et d'intégrer la dimension souterraine dans les processus et les documents de planification urbaine (schéma directeur régionaux, Scot, PLU) qui, aujourd'hui, l'ignore.⁴⁶

8.3. Développer les démarches intersectorielles et globales

Concevoir des projets multifonctionnels et intégrés à la ville suppose de changer l'approche et la méthode d'élaboration des projet souterrains. Il faut passer d'une pratique de juxtaposition à une approche systémique en recherchant la complémentarité des fonctions, en emboîtant les échelles de projet et en croisant les points de vue sectoriels. Il faut dépasser la recherche de rentabilité à court terme pour trouver un équilibre économique dans une approche globale des coûts en intégrant les effets externes induits, le fonctionnement et les besoins d'évolutions futurs. Il faut prendre en compte l'impact, le potentiel de valorisation et la résilience des ouvrages dans leur environnement et le gains et synergies induites par les interactions entre les fonctions implantées en sous-sol. Cela nécessite des démarches de projet et des méthodes de conception et d'évaluation décloisonnées et pluridisciplinaires. Il s'agit d'inciter à la prise en compte du potentiel souterrain en mettant en place un processus de concertation qui permettra de confronter, de croiser et de concilier les points de vue et intérêts de tous les acteurs en construisant un projet partagé et suffisamment consensuel. La boîte à outil de conception de projet et les méthodes d'évaluation économique, sociale et environnementale proposées par le projet Ville 10D permettront de faciliter des choix et des arbitrages prenant en compte tous les impacts et les potentiels des projets impliquant le sous-sol.

8.4. Décloisonner la gestion du sous-sol et harmoniser ses règles

Le sous-sol ne doit plus être géré comme une annexe technique de la ville mais comme une de ses composantes. Pour cela il doit relever des mêmes politiques et des mêmes compétences que la ville du dessus en matière de développement territorial et d'urbanisme et participer au projet global d'aménagement urbain et métropolitain dans le cadre fixé par les collectivités territoriales concernées. La dimension souterraine doit être intégrée au projet urbain global et par conséquent conduit par une maîtrise d'ouvrage capable de l'articuler à l'aménagement de la surface, de piloter une démarche plurisectorielle et interdisciplinaire et d'assurer la concertation et la coordination avec tous les acteurs impliqués dans l'aménagement du sous-sol (gestionnaire des ressources et des réseaux, service de la protection civile, etc.). Cela ne sera possible que si ces acteurs connaissent, partagent et respectent les mêmes règles du jeu ce qui suppose un effort de clarification, de simplification et d'harmonisation du cadre légal et réglementaire mais aussi une évolution des démarches et des procédures d'élaboration de projet permettant plus d'anticipation, de transparence et de concertation.⁴⁷

8.5. Elargir la planification urbaine à la dimension souterraine

L'élargissement à la dimension souterraine des orientations et prescriptions des documents de planification et d'urbanisme permettra de garantir sa prise en compte et sa contribution à l'aménagement urbain dans tous les sites stratégiques pour l'intensification urbaine. A l'échelle métropolitaine, les schémas directeurs d'aménagement et développement régional (SDRIF, SRADT) ne doivent pas se cantonner à la préservation des réserves hydrologiques ou minières, mais considérer la totalité des ressources du sous-sol, y compris celle de l'espace souterrain, en repérant les sites où la

⁴⁵ Thème3 : PSYCHO-SOCIAL, conflits et synergies entre acteurs, septembre 2016, R33.

⁴⁶ Thème 1 : SOCIO ECONOMIE, Boîte à outils d'évaluation de projets souterrains, fiche 15, page 89 à 93. juillet 2014, R03.

⁴⁷ Synthèse de la tranche 1, page 11, décembre 2014, R18

compacité urbaine associés à l'accessibilité justifie une valorisation du sous-sol dans la perspective d'une intensification urbaine et en formulant des prescriptions d'aménagement de nature à susciter cette valorisation. A l'échelle territoriale, les Schéma de cohérence (SCoT) et les contrats de développement territoriaux doivent prendre en compte le potentiel de ces sites et affirmer dans leur stratégie leur vocation à un développement urbain en trois dimensions permettant un développement multifonctionnel autour des pôles d'échange de transport. Au niveau local les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les plans d'aménagement des ZAC doivent intégrer dans leur zonage, leur réglementation et leur programmation, la dimension souterraine conduisant à concevoir des projets globaux incluant la vocation urbaine pluri-fonctionnelle du sous-sol.

8.6. Harmoniser et clarifier le cadre juridique et réglementaire

Ville 10D a procédé à un état des lieux de la réglementation affectant l'aménagement souterrain. Un certain nombre d'enjeux en est ressorti, à partir desquels quelques propositions ont été formulées :

- Clarifier et faire connaître les effets juridiques des règles d'urbanisme vis-à-vis des ouvrages enterrés : il a été observé que l'aménagement souterrain est largement soumis à un droit qui distingue peu entre le sol et le sous-sol, à l'exception de quelques cas particuliers, comme en matière de sécurité incendie ;
- Améliorer l'accès aux données juridiques et non juridiques du sous-sol : en matière de planification (Scot, PLU), le sous-sol est rarement envisagé sous l'angle d'un espace urbanisable. Les élus ne disposent d'ailleurs que de données éparses sur le sous-sol de leur territoire. Il est nécessaire d'améliorer l'accès aux données du sous-sol, en commençant par les compiler à l'échelle d'un territoire ;
- Planifier autrement l'aménagement du sous-sol : d'autres outils plus contractuels et opérationnels que les documents d'urbanisme, zone d'Aménagement concerté (ZAC), convention d'aménagement, projet urbain partenarial (PUP), peuvent prendre en compte les enjeux multiples générés par la mobilisation du sous-sol.
- Gérer le risque : la préservation de l'évolutivité des ouvrages, de leur capacité à s'adapter à de nouveaux besoins ou de nouvelles exigences, impose d'anticiper l'évolution des usages en nature ou en volume.⁴⁸

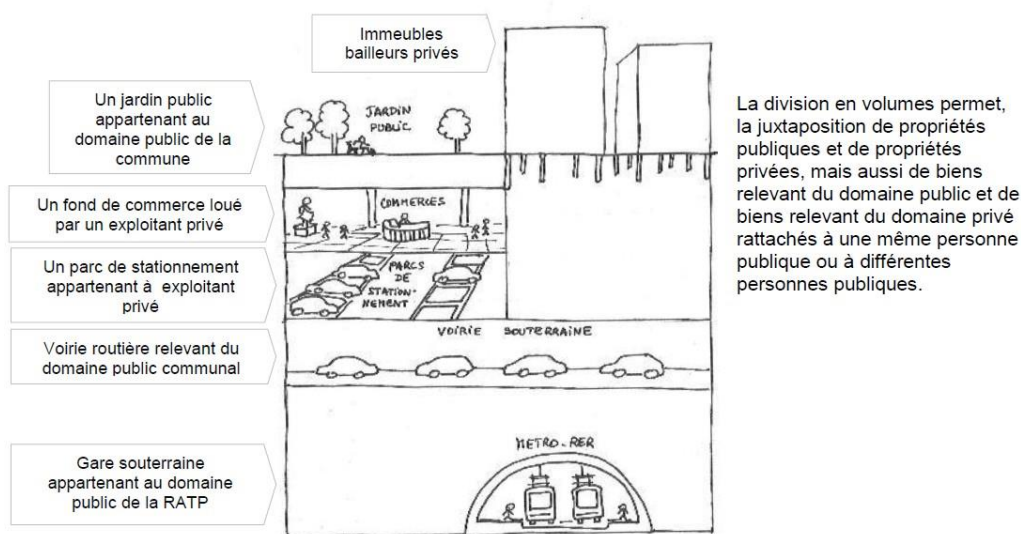
8.7. Clarifier les statuts de la propriété et de l'exploitation des volumes souterrains

Le procédé de division en volumes consiste à considérer un volume défini par l'emprise de la parcelle au niveau du géoïde ; le volume est divisible par convention ou expropriation dans un sens vertical et horizontal. Il a été mis en place dans le cadre des ensembles immobiliers complexes, notamment pour répondre à l'imbrication des propriétés privées et publiques, certaines relevant du domaine public. La division en volumes se révèle mieux adaptée à ce type d'ensembles immobiliers que la copropriété dont les règles sont trop rigides pour la gestion et l'évolution des espaces concernés, et du reste, incompatibles avec la juxtaposition de biens relevant du domaine public. La division en volumes n'est pas l'apanage des espaces enfouis – elle est courante dans les opérations immobilières complexes – mais elle est particulièrement caractéristique des découpages du tréfonds induits par la réalisation des réseaux de transports enterrés et des espaces développés sous dalle, comme à La Défense ou aux Halles qui se traduisent par la constitution de véritables mille-feuilles de propriétés répertoriées dans des Etats Descriptifs de Division en Volumes (EDDV).⁴⁹

⁴⁸ Thème 5 : TRANSVERSAL, synthèse sur la réglementation nationale, septembre 2014, R07.

⁴⁹ Thème 5 : TRANSVERSAL, aspect juridique de l'aménagement souterrain, page 15 à 18, juillet 2016, R31.

La division en volumes : illustration



8.8. Harmoniser les prescriptions et la gestion de la sécurité des espaces souterrains

L'analyse du cas du site des Halles montre que la question de la réglementation en matière de protection contre le risque d'incendie est la contrainte juridique majeure pour l'aménagement d'un ensemble immobilier complexe en partie souterrain. Ce n'est pas un obstacle insurmontable mais il ajoute à la complexité dans un environnement physique difficilement adaptable. Au-delà de l'aspect limitatif pour le développement de certaines installations en sous-sol, la multiplicité de source de règles spécifiques (IGH, ERP, Cde du travail, ICPE, etc.) nuit à leur lisibilité. Au final, c'est une véritable réglementation sur-mesure qui a été élaborée pour les Halles, s'appuyant sur les réglementations précitées, mais s'inspirant également de celle relative aux immeubles de grande hauteur en cours d'écriture, dans une perspective inversée. Les Halles est ainsi le seul exemple d'une catégorie qui n'a pas vu le jour : un « immeuble de grande profondeur ». Une tentative d'uniformisation des règles présenterait vite des limites mais l'élaboration d'un guide pour leur application serait un outil précieux. Si un cadre juridique « prêt à porter » est difficilement envisageable pour imbriquer les différents types d'établissements au sens de la réglementation, des grands principes communs pourraient être dégagés à partir de l'expérience. De l'analyse du cas des Halles plusieurs pistes de réflexion se dégagent :

- anticiper l'évolution des flux d'usagers ayant pour conséquence une réglementation renforcée,
- anticiper les changements d'usage qui résultent de l'évolution des besoins et qui peuvent entraîner des règles plus contraignantes,
- envisager des règles ou principes directeurs adaptés à des ensembles immobiliers complexes,
- communiquer auprès des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour faire connaître les réglementations applicables et la doctrine administrative⁵⁰ incontournable.

⁵⁰ Thème 5 : TRANSVERSAL, aspect juridique de l'aménagement souterrain, page 19 à 30, juillet 2016, R31.

9. Un bilan provisoire

A cette étape du projet national Ville 10D, beaucoup de réponses peuvent être apportées aux questions des acteurs de l'aménagement urbain souterrain mais ces réponses doivent être encore précisées et surtout organisées et clairement formulées pour pouvoir être entendues des décideurs.

Le projet Ville10D montre d'abord la diversité des ressources du sous-sol et sa capacité à accueillir de nombreuses fonctions constitutives d'une ville dense. Il ne serait pas pertinent de proposer des modèles standards et pré-formatés de programmation urbaine souterraine, chaque site offrant des potentiels spécifiques. En revanche les travaux réalisés permettront de proposer des exemples et des références de projets et de réalisations qui peuvent inspirer et éclairer les aménageurs.

Le projet Ville10D propose ensuite des méthodes et des outils pour évaluer les projets du point de vue économique, social et environnemental. Ces outils et méthodes ont été testées mais restent à harmoniser et à confronter à des contextes de projet urbain complexe pour pouvoir être mis à la disposition des décideurs.

Le projet Ville 10D formule des recommandations aux concepteurs des projets pour que les espaces souterrains soient plus accueillants et fonctionnels, économes des ressources naturelles, sûrs et résilients. Ces propositions doivent être encore précisées et illustrées par des applications à des cas concrets qui mettront en évidence leurs apports aux projets.

Le projet Ville 10D apporte des avancées sur les méthodes d'acquisition des données sur l'espace souterrain et montre quels sont les différents usages, besoins et attentes à l'égard des systèmes d'information et de visualisation en 3D, pendant l'élaboration et la réalisation d'un projet et pendant la vie des ouvrages réalisés. Il reste cependant à repérer les outils numériques disponibles adaptés au souterrain, à définir leurs conditions d'usage et leur interopérabilité dans le cadre d'un projet ou d'un site.

Enfin, le projet Ville 10D met en évidence les conditions indispensables d'anticipation et de coopération entre acteurs et disciplines et l'enjeu prioritaire de gouvernance tant dans les phases de conception et de réalisation des projets souterrains que dans la période d'utilisation et d'exploitation des sites. Il révèle que les blocages et les freins tiennent moins à l'excès de réglementation qu'à sa dispersion et au cloisonnement des dispositifs juridiques et des procédures. Il propose d'inscrire dans la planification urbaine les orientations stratégiques de la valorisation du sous-sol et appelle à renforcer la concertation entre acteurs en améliorant les processus d'élaboration de projet, de pilotage de la réalisation et de gestion des sites.

Pour aller plus loin et construire un message convainquant, le projet doit maintenant se confronter directement aux enjeux de sites en projet en dialoguant avec les acteurs les plus concernés (élus, aménageurs, maîtres d'œuvre, opérateurs, entreprises, etc.) sur la déclinaison de ses propositions. Les grandes gares d'échange du projet de métro Grand Paris Express situées dans des espaces urbain propices à l'intensification urbaine pourront faire l'objet de cette démarche à condition de mobiliser autour des propositions des chercheurs de Ville 10D, les principaux porteurs d'enjeux de ces sites.

10. Bibliographie

10.1. Rapports de recherche du projet national Ville 10D

- Etude de montage du Projet National « Ville 10D-Ville d'idées », mars 2012.
- R01, Thème 3 : Psycho-social, Influence de l'éclairage sur la perception des espaces souterrains, D. Dumortier, R. Briet, P. Fernandez (ENTP), mars 2014.
- R02, Thème 1 : socio économie, boîte à outils d'évaluation de projets souterrains, P.E. Gautier, A. Jehanno, A. Subitte (SYSTRA), P. Bossin (Interface transport), M. Labbé, M. Belmekki (Ateliers Monique Labbé), juillet 2014.
- R03, Thème 1 : socio économie, boîte à outils d'évaluation de projets souterrains, P.E. Gautier, A. Jehanno ; A. Subitte (SYSTRA), P. Bossin, C. Debyser (Interface Transport), M. Labbé, M. Belmekki (atelier Monique Labbé), juillet 2014.
- R04, Thème 2 : environnement, étude analytique d'aménagement urbains et souterrains, Y. Audi (IFSTTAR, ENPC, LEESU, CETU), septembre 2014.
- R05, Thème 2 : environnement, la mutabilité des cavités, R. Redondo (Geo Ressources), septembre 2014.
- R06, Thème 2, environnement, impact des construction souterraines sur le bâti urbain, B. Basmaji, M. Al Heib, O. Deck, septembre 2014.
- R07, Thème 5 : Transversal, synthèse sur la réglementation nationale, A. Cocquière (IAU IdF), septembre 2014.
- R08, Thème 2 : environnement, travaux préparatoires à une ACV de la valorisation des MEX, M. Sie (CYCLECO), novembre 2014.
- R09, Thème 4 : visualisation et gestion des données, base de données dédiées à la connaissance du sous-sol, A. Marache (Université de Bordeaux), novembre 2014.
- R10, Thème 4, visualisation et gestion des données, caractérisation des incertitudes et des risques en souterrain, D. Breyse, O. Deck, J.F. Dumail, E. Humbert, K. Laffrechine, D. Morand, M. Al Heib (Université de Bordeaux, INERIS, Université de Lorraine, UPEM), novembre 2014.
- R11, Thème 3 : psycho-social, morphologie des transitions, trame urbaine et paysage en souterrain, S. Salles (ENSA Paris Val de Seine, Université de Reims Champagne Ardennes), novembre 2014.
- R12, Thème 2 : environnement, valorisation des eaux d'exhaure à Paris, B. de Azvedo, X. Thode (UPEM), novembre 2014.
- R13, Thème 2 : environnement, résilience des systèmes de transport guidés, P.E. Gautier (SYSTRA), B. Barroca (UPEM), novembre 2014.
- R14, Thème 3 : psycho-social, utilisation entre sol et sous-sol, M. Tilloux, T. Dreyfus (Université Paris 8, URCA), novembre 2014.
- R15, Thème 3 psycho-social, ambivalence de l'imaginaire des souterrains urbains, C. Revol, F. Mohebi, J-J Wunenburger, N. Caritoux (IRPhil-URCA), novembre 2014.
- R16, Thème 3 : psycho-social, expérience de la ville souterraine et des transitions, C. Grout (URCA), novembre 2014.
- R17, Thème2 : environnement, gestion et valorisation des matériaux d'excavation des tunnels, L. d'Aloia Swartzentruber (CETU), décembre 2014.
- R18, Synthèse de la tranche 1, J. P. Palisse, décembre 2014.
- R19, Thème 2 : environnement, dispositifs de valorisation énergétique d'infrastructures souterraines, K. Romieu, M. Philippe (BRGM), décembre 2014.
- R21, Thème 2 : environnement, évaluation de la résilience des infrastructures critiques, D. Serre (RESCUE Solutions), octobre 2015.
- R20 Thème 2 : Environnement, les enjeux environnementaux de l'urbanisme souterrain, B. Barroca (UPEM), L d'Aloia Swartzentruber (CETU), mars 2015.
- R22, Thème 2 : environnement, réutilisation des matériaux extraits du sous-sol, M. Sie, (CYCLECO), septembre 2015.

- R23, Thème 3 : Psycho-social, amélioration par l'éclairage de l'acceptabilité des espaces souterrains, J. Delande, D. Dumortier (ENTP), septembre 2015.
- R24, Thème 3 : psycho-social, morphologie, spatialité, cartographie des espaces souterrains, pages 135 et 136, S. Salles (URCA), novembre 2015.
- R25, Thème 2 : environnement, résilience des systèmes de transport guidés 2, M. Gonzva (SYSTRA), B. Barroca (UPEM), novembre 2015.
- R26, Thème 3 : psycho-social, viabilisation des espaces souterrains par l'aménagement paysager, E. Breton (TECOMAH), novembre 2015.
- R27, Thème 4 : visualisation et gestion des données, intégration des méthodes d'acquisition indirecte dans la construction des modèles géométriques, A. Marache, V. Sivelles (I2M), juin 2016.
- R28, Thème 2 : environnement, méthodologie d'évaluation du cycle de vie des aménagements souterrains, Y. AUDI (IFSTARR, ENPC, UPEM, CETU), janvier 2016.
- R29, Thème 2 : environnement, géothermie de basse température en ville, O. Fouché, (ENPC), janvier 2016.
- R30, Thème 1 : socio économie, nouveau business model pour les espaces souterrains incluant l'infrastructure, P.E. Gautier, E. Le Maout (SYSTRA), mai 2016.
- R31, Thème 5 : Transversal, aspect juridique de l'aménagement souterrain, A. Cocquière (IAU IdF), juillet 2016.
- R33, Thème3 : psycho-social, conflits et synergies entre acteurs, F. Mancebo (URCA), septembre 2016.
- R34, Thème 5 : Transversal, planification stratégique de l'aménagement du sous-sol, application à la ZAC Marne-Europe, L. Perrin (IAU IdF), septembre 2016.

10.2. Autres

- PROJET NATIONAL « CLE DE SOL » : guide pratique des galeries multiréseaux, août 2005.
- PROJET DEEP CITY, RESSOURCES DU SOUS-SOL ET DEVELOPPEMENT DURABLE DES ESPACES URBAINS, coordination A. Pariaux, PNR 54, 2010.
- VALORISER LES ESPACES SOUTERRAINS DES METROPOLES, UN ENJEU D'AVENIR, coordination J.P. Palisse, Le courrier de la COFHUAT N° 35, juin 2014.
- PENSER LA VILLE ET AGIR PAR LE SOUTERRAIN, coordination B. Barroca, 2014.
- VILLE 10D, UN PROJET NATIONAL POUR PROMOUVOIR LA VALORISATION SOUS-SOL, RESSOURCE DE LA VILLE DURABLE, M. Labbé, J.P. Palisse, page 132, revue Tunnels et espaces souterrain, N°248, mars/avril 2015.
- PROJET ANR CANOPEE, rapport final, IREX, avril 2016.
- IAU-IdF, NOTE RAPIDE 696, Le droit : frein ou moteur de l'aménagement souterrain, A. Cocquière, septembre 2015.
- IAU-IdF, NOTE RAPIDE 697, Vers un nouvel urbanisme souterrain : des métropoles engagées, T. Nikolova, septembre 2016.
- ARCHITECTURE OF UNDERGROUND SPACES: FROM ISOLATED INNOVATIONS TO CONNECTED URBANISM, M. Labbé, revue tunneling and underground space technology, Vol 55, mai 2016.