



Potentialités et enjeux architecturaux d'un territoire en cours d'exploration : le souterrain. Pistes pour une transition écologique et sociale

Baptiste Bouvier

► To cite this version:

Baptiste Bouvier. Potentialités et enjeux architecturaux d'un territoire en cours d'exploration : le souterrain. Pistes pour une transition écologique et sociale. Architecture, aménagement de l'espace. 2019. dumas-02524859

HAL Id: dumas-02524859

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02524859>

Submitted on 30 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

POTENTIALITÉS ET ENJEUX ARCHITECTURAUX
D'UN TERRITOIRE EN COURS D'EXPLORATION

LE SOUTERRAIN

PISTES POUR UNE TRANSITION
ÉCOLOGIQUE ET SOCIALE

BAPTISTE BOUVIER

ENSA NANTES
MÉMOIRE DE MASTER - 2019
PROFESSEUR RÉFÉRENT: FRÉDÉRIC BARBE

BAPTISTE BOUVIER

Potentialités et enjeux architecturaux d'un territoire en cours d'exploration:

LE SOUTERRAIN

Pistes pour une transition écologique et sociale

ENSA NANTES

2019

*Avec le soutien de Frédéric Barbe
Docteur en géographie et aménagement*

SOMMAIRE

I- *Quoi?* **FICTION** 9

Dark Sun Valley:

I	10
II	13
III	16

II- *Pourquoi?* **ATLAS** 19

Géo-histoire du souterrain:

Introduction	20
01_ La recherche de protection	23
02_ Le besoin de circulation	37
03_ L'exploitation du sous-sol	49
04_ La pratique d'un culte	59
05_ Le développement contemporain urbain	69

III- *Comment?* **ESSAI** 85

Pistes pour une transition écologique et sociale:

Introduction	87
--------------	----

I- Le souterrain: un milieu particulier à apprivoiser	89
---	----

A- Comprendre et utiliser ses propriétés	90
1- Les propriétés de l'environnement souterrain	90
2- Avantages du souterrain en climat extrême	92
3- Le contrôle des ambiances: pour une architecture souterraine	95
4- Eclairer un espace souterrain : La maîtrise de la lumière	98
B- Des usages adaptés au souterrain	103
1- L'omniprésence de la lumière artificielle	103
2- Des espaces pour protéger les populations	104
3- Les effets psychologiques et sociaux de la vie en sous-sol	105
4- Construire en sous-sol coûte-t-il plus cher?	109
II- L'économie de l'espace	111
A- Réutiliser des espaces souterrains existants	112
1- De nombreux souterrains désaffectés en ville	112
2- Le cas de Réinventer Paris II	113
B- Transformer le patrimoine par le dessous	116
III- Une démarche à l'échelle urbaine	121
A- L'exploitation durable du sous-sol	122
1- La nécessité d'une pensée à grande échelle	122
a- Plus d'efficacité	122
b- Différentes appellations pour une même vision	123
2- Quatre ressources sous nos pieds	125

3- Des risques à considérer	127
4- Comprendre les contraintes géologiques du sous-sol	129
B- L'exploitation du sous-sol pour une ville durable	132
1- La synergie des ressources souterraines: une méthodologie	132
2- L'exemple de Dakar et de Verbier: enjeux et besoins	135
3- Une législation à adapter	136
4- Le nouvel Eldorado hyper-moderne?	137
Conclusion	140
Remerciements	143
Bibliographie	144

I

Quoi?

FICTION

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Dark Sun Valley

I

Phoenix, 06/06/2061, 10h00, Niveau -4

*"You come to me on a summer breeze
Keep me warm in your love and then softly leave
And it's me you need to show
How deep is..."*

Ethel éteignit maladroitement son réveil de sa main droite endolorie et soupira un grand coup :

« Déjà 10 heures du matin, les nuits passent trop vite. »

Elle se leva, se dirigea vers la fenêtre et après avoir sélectionné le mode « AUBE » ouvrit les volets et la fenêtre. Un soleil pâle apparaissait petit à petit sur une colline verdoyante et éclairait son appartement une pièce. Des chants d'oiseaux se firent entendre pendant qu'Ethel allumait la radio et commençait à se préparer.

« ...a perdue contre l'équipe des Suns de Phoenix lors de leur premier match des Plays-offs.

- Merci Melissa. Pour finir William, quelques informations pratiques pour la journée ?

- Oui Nicholas. L'été n'est pas encore arrivé mais les températures à la surface sont déjà très hautes. Il fait déjà 102°F¹ ce matin et on annonce jusqu'à 115°² à 17 heures. Je vous déconseille donc de sortir aujourd'hui, de plus, les indices UV sont au maximum dès ce matin et ce jusqu'à 18 heures. Si vous étiez dans l'obligation de sortir en surface, je vous rappelle, munissez-vous de vos capes solaires. Cette nuit, l'air se rafraichira à peine. On devrait toutefois descendre sous la barre des 100 degrés³ mais toujours avec une humidité très faible. Par ailleurs, on craint l'arrivée d'une tempête de sable de type Haboob dans les prochains jours... »

« Toujours la même chose » pensa Ethel. Depuis qu'elle avait emménagé à Phoenix pour son nouveau travail, il y a un mois, rares étaient les jours où on pouvait sortir dehors. La fraîcheur du printemps de l'Oregon lui manquait. Elle était encore en phase d'adaptation. Elle devait petit à petit s'habituer à ce rythme de vie dans les profondeurs de la Terre. Finissant son café avec hâte, elle réserva un Vélertical à la station la plus proche. Elle était en retard. La radio continuait d'émettre les nouvelles du jour :

« Pour ce qui est du trafic, on signale quelques embouteillages sur la couronne souterraine entre les secteurs D7 et D12 en direction de Tucson. Enfin, de cause encore inconnue, on vient également de signaler dans le secteur D3 un important... »

¹⁻²⁻³ 102°F = 39°C / 115°F = 46°C / 100°F = 38°C.

Ethel éteignit la radio. Il était vraiment temps de partir, sa patronne lui avait déjà fait remarquer ses retards répétitifs. Elle n'avait plus le droit à l'erreur. Elle se pressa dans les rues de son secteur, le D4, afin de retrouver un de ses collègues. Ils avaient pris l'habitude d'aller ensemble au travail. Au début, c'était pour éviter à Ethel de se perdre dans le dédale de cette ville souterraine puis petit à petit c'était devenu une routine. Son lieu de travail se trouvait non loin au 12ème étage d'une tour de bureaux, trois secteurs plus loin. Elle aimait son trajet matinal. Elle empruntait d'abord un infini tapis roulant, comme celui qu'on trouvait à l'aéroport de sa ville natale, dans une large rue piétonne haute de trois étages et remplie de commerces et de petits logements de chaque côté. Au milieu, se dressaient de nombreux tubes de verre ovales ouverts à certains endroits et par lesquelles on pouvait regarder le ciel. Ils étaient tous différents: de toutes les tailles, de toutes les profondeurs. On pouvait rentrer à l'intérieur de certains pour regarder aussi bien vers les niveaux inférieurs que supérieurs, d'autres étaient remplis d'arbres et de plantes. Ces tubes servaient avant tout à apporter la lumière du soleil sous la surface mais aussi à ventiler. Un léger courant d'air se fit d'ailleurs sentir entre deux tubes.

« Que c'est agréable de sentir cet air frais! s'exclama Ethel en s'adressant à son collègue, Adam. S'il n'y avait pas de plafond au-dessus de cette rue, je me croirais presque de retour à Portland. Comment est-ce possible ? On est à plus de 30 mètres sous la surface !

- Tout a été pensé pour ça Ethel, lui répondit Adam. L'hygrométrie, la température, la luminosité et la vitesse de l'air sont autant de paramètres contrôlés en permanence et réajustés afin que le lieu reste toujours agréable pour les usagers. Les hublots lumineux que tu vois au plafond sont en fait des rayons solaires qui ont été capturés en surface et amenés jusqu'ici pour éclairer la rue. La lumière et la chaleur de sa couleur changent constamment selon le moment de la journée pour garder un rythme journalier identique à celui de la surface.

- D'accord je vois. » Ethel sourit poliment. Elle ne comprenait pas toujours tout de ce que lui disait son collègue mais peu lui importait. Elle commençait à se sentir bien ici et était contente d'avoir accepté ce poste.

Ils arrivaient à présent au Big Chasm, un immense gouffre taillé dans la pierre qui s'étendait de la surface jusqu'au dernier niveau du secteur. Cet endroit avait toujours fasciné Ethel. Recouvert d'une surface anti-UV, c'était un des rares endroits ouverts largement sur le ciel. On pouvait y apercevoir tous les différents niveaux et passer de l'un à l'autre facilement. C'était le lieu de retrouvailles par excellence, telle une place

publique mais à la verticale. Tout le monde se donnait rendez-vous là pour se retrouver, faire les magasins ou simplement observer le zénith.

« Tu as réservé ton Vélertical ? demanda Adam. Le mien est ici.

- Oui bien sûr, j'ai le numéro 21 si je me souviens bien. Regarde, il est juste là »

Tous deux enfourchèrent leur véhicule et montèrent ensemble en direction du niveau -1. La vue de tous ces vélerticaux qui montaient et descendaient par dizaines le long de leur corde et au rythme de la rotation des pédales était un spectacle époustouflant dont Ethel ne se lassait pas : tel un ballet d'araignées dansant le long de leur fil de soie. C'était le moyen le plus rapide pour passer d'un niveau à un autre mais aussi le plus beau. Ethel et Adam montèrent de niveaux en niveaux et arrivèrent au niveau -1. Ils se dirigèrent ensuite vers la porte pour changer de secteur. Il y avait là-bas une activité inhabituelle, une masse de gens s'était créée.

« T'as vu tout ce monde, qu'est-ce qui passe ?

- Je l'ignore, allons voir ! » dit Adam

Ils évoluèrent non sans mal en direction de la porte mais furent vite bloqués. Une officière de police postée devant la porte fermée déclara à haute voix pour se faire entendre :

« Le secteur D3 est fermé, mesdames et messieurs, il est en cours d'évacuation. Vous ne pouvez donc pas y accéder. Je vous prie de prendre un autre itinéraire. Il est inutile d'insister. »

Un brouhaha de mécontentement et d'incompréhension s'ensuivit.

« Comment fait-on ? On est déjà en retard, fit remarquer Ethel.

- Nous n'avons pas le choix, non ? On doit passer par la surface.

- Mais ça va nous prendre au moins encore 20 minutes de plus pour arriver. Et puis je n'ai aucune protection solaire, il n'y a aucune ombre à cette heure, je suis encore en phase d'acclimatation je te signale, les rayons du soleil peuvent me brûler en très peu de temps.

- Prendre le métro nous obligerait à descendre au niveau -6. C'est un détour encore plus long. C'est la seule alternative. Ne t'inquiète pas, on suivra l'ombre des parasoleils de la grande avenue, tu y seras à l'abri. »

Ils se détachèrent de la foule et prirent la rampe hélicoïdale qui les mena jusqu'en surface. Même si c'était risqué, Ethel était en réalité ravie à l'idée de sortir en surface, en dehors des horaires prescrits par le médecin de l'acclimatation. Elle allait de nouveau sentir les rayons brûlants du soleil sur sa peau.

II

Phoenix, 06/06/2061, 09h30, Niveau -6

« On se calme les enfants, s'il vous plait, le cours a commencé. »

Le professeur attendit quelques instants que les élèves se calment et que le silence s'installe avant de reprendre :

« Aujourd'hui, je vais vous raconter l'histoire de la naissance de Dark Sun City. Qui d'entre vous peut m'en dire un peu plus ?

- C'est la partie souterraine de Phoenix monsieur, s'exclama un élève.

- On lève la main avant de parler Tom. Mais oui tu as raison. Qui sait pourquoi Phoenix est devenu en partie une ville souterraine ? Ça n'a pas toujours été le cas comme vous le savez. »

Eli répondit après avoir été désigné par le professeur :

« A cause du soleil, on ne pouvait plus vivre en surface. Il faisait trop chaud.

- Exact. Mais pourquoi a-t-on décidé de creuser alors ?

- Sous terre, le soleil n'arrive pas à rentrer et la roche conserve le froid. » répondit une autre élève.

- Oui très bien. Et quel événement marquant a poussé le maire à engager cet immense projet ?

- La Longue Fièvre, s'exclamèrent en cœur les enfants.

- Bravo, je suis content de savoir que vous connaissez tous ça. Vous n'étiez même pas nés et moi je devais avoir à peu près votre âge. En 2025, une période d'intense chaleur s'est abattue sur Phoenix. Du 26 avril au 6 Octobre, soit 163 jours consécutifs, la température n'est pas descendue sous les 100 degrés Fahrenheit⁴. Les habitants de la ville étaient habitués à la chaleur, le climat y a toujours été désertique et accentué par le réchauffement climatique depuis de nombreuses années déjà mais sur d'aussi longues périodes, personne n'avait jamais vécu ça. Presque toute la végétation de la ville a disparu : asséchée par l'ardeur du soleil ou brûlée par les nombreux incendies. Malheureusement, de nombreuses personnes périrent à cause de déshydratation ou surchauffe de la température corporelle. En effet, une fièvre générale a frappé les habitants. Cela n'était dû à aucun virus, aucune maladie. Le corps n'arrivait tout simplement plus à se refroidir. La classe la plus pauvre fut la plus touchée ainsi que les personnes âgées. Durant cet été, toutes les activités de la ville furent suspendues. Dès le mois de juin, on conseilla aux personnes qui le pouvaient de déménager temporairement ou de s'abriter chez des voisins disposant de la climatisation. Oui mais voilà, l'utilisation trop intense des climatiseurs eurent deux conséquences néfastes : premièrement, une surconsommation d'électricité qui provoqua des coupures au niveau des postes électriques déjà gravement endommagés par la chaleur et deuxièmement,

⁴100°F = 38°C.

un réchauffement de l'air extérieur. Et oui, pour refroidir une maison à l'aide d'un climatiseur, il faut faire fonctionner un mécanisme qui rejette de la chaleur en extérieur. Ainsi, nous étions bloqués dans une boucle infernale. Plus les températures augmentaient, plus nous avions besoin de refroidir nos maisons mais plus nous les refroidissions, plus il faisait chaud. La longue fièvre a finalement été interrompue le 6 octobre, date à laquelle est arrivée une des plus grandes tempêtes de sable qu'a connue la ville. De type Haboob, elle a tout ravagé sur son passage ou du moins tout ce qui restait. Ce fut un grand traumatisme pour les gens de Phoenix, le vent brûlant a recouvert le sol d'une épaisse couche de sable, encrassé tous les engins électriques extérieurs et provoqué de graves problèmes pulmonaires chez les habitants. Dans la nuit du 7 octobre, la température a chuté sous la barre des 90 degrés⁵ puis sous les 80 degrés⁶ le jour d'après.

Cependant, les ennuis n'étaient pas encore finis. Le taux de particules fines dans l'air avait atteint un pic sans précédent auquel se rajoutaient des tonnes de grains de sable en suspension dans l'air. Il a fallu attendre l'après-midi du 28 octobre pour qu'une pluie salvatrice tombe sur Phoenix et purifie l'air. La ville était redevenue vivable. Mais la question était : « Pour combien de temps ? » Les habitants craignaient de voir arriver le prochain été. Le maire fut poussé à la démission et des élections anticipées furent organisées dès le mois de mars suivant. Le paysage politique en fut chamboulé. Le candidat vainqueur, un écologiste démocrate, proposa de transformer la ville en profondeur et de construire une ville souterraine en continuité de la ville en surface. Cette idée farfelue a interloqué les habitants mais ils ont fini par être convaincus. L'objectif était double : se protéger de la chaleur ardente du soleil, comme tu l'as dit tout à l'heure Eli, mais aussi densifier la ville, la rendre plus compacte. Phoenix s'était développé de manière très plate. Sa superficie urbaine était devenue énorme provoquant de longs trajets de transport. On commença d'abord par implanter les usines d'électronique, fleuron de l'économie arizonienne, en souterrain puis à développer les premiers espaces publics souterrains. Ces espaces publics disposaient de végétations et de lumière naturelle.

Au fil des années, de nombreuses expérimentations furent menées pour gérer au mieux les ambiances souterraines. Des capteurs solaires furent mis au point pour éclairer les profondeurs et en 2033, la première opération de logement entièrement souterrain fut construite. Petit à petit, un plan directeur d'urbanisme souterrain fut adopté et la ville s'enterra. Ce n'est pas pour autant qu'on abandonna la ville en surface. Les tours de bureaux subirent de lourdes rénovations afin de résister aux pics de chaleur, les fenêtres furent remplacées par des surfaces anti-UV et on habilla les façades de caliche. Le caliche est une roche très dure disposant d'une inertie ther-

⁵⁻⁶ 90°F = 32°C / 80°F = 26°C

mique très forte et dont se composent le sol et les collines de Phoenix. C'est-à-dire qu'il accumule beaucoup de chaleur. Les bâtiments furent agrandis vers le bas, en profondeur, pour être connectés aux espaces souterrains et les routes ont été petit à petit recouvertes de panneaux solaires, d'arbres et de parasoleils. Aujourd'hui, la ville n'a pas fini son développement, on continue encore de creuser. C'est une des villes les plus attractives des Etats-Unis et la plupart des habitants se sont habitués à ce nouveau mode de vie. Au début c'était loin d'être le cas. Beaucoup de personnes rechignaient à l'idée de vivre sous la surface. Elles avaient l'impression qu'on voulait les enterrer vivants.

Il est important de comprendre que faire de Phoenix une ville souterraine aurait été unimaginable au siècle dernier. En effet, Phoenix a bâti sa réputation sur le soleil. Ce sont les premiers habitants de la région, les amérindiens Hohokam, qui ont nommé cette vallée, la vallée du soleil. La ville s'est développée à ses débuts grâce à son agriculture qui tirait parti de l'irrigation de la rivière Salée et de son fort ensoleillement avant de devenir une destination de vacances pour son climat chaud, même en hiver. Développer la ville en souterrain a donc été un changement radical. Cependant, elle tire toujours profit du soleil en le faisant pénétrer dans les sous-sols urbains. Et puis après tout, c'était écrit. Le nom de Phoenix provient, je vous le rappelle, de l'animal mythologique du même nom qui renaît de ses cendres. En cendre, la ville l'a été suite à la Longue Fièvre. Et elle est née une nouvelle fois, plus forte, plus résiliente. » Le professeur marqua une pause. « Je vais ensuite vous expliquer un peu plus en détail les différentes étapes de sa construction mais d'abord, des questions ? »

Six mains se levèrent, Le professeur interrogea Eli une nouvelle fois :

« Si les Hommes ont provoqué le changement climatique, pourquoi ne l'ont-ils pas stoppé avant qu'il fasse trop chaud ? »

Le professeur garda le silence. Il était toujours autant étonné de la justesse des questions de son élève. Mais comment expliquer à ces enfants l'égoïsme de l'humanité ? Soudain, une alarme stridente sonna. Le professeur soupira :

« Sauvé par le gong ... » avant de s'exclamer : « Allez les enfants ! Ceci est sûrement un exercice incendie. Vous vous rappelez des consignes, enfiler vos capes solaires, sortez tout doucement en vous baissant et suivez-moi ! »

La classe sortit en file indienne dans les couloirs puis dans la rue. Eli n'avait pas peur. Ils faisaient ces exercices d'évacuation fréquemment. Ils devaient simplement sortir le plus vite possible à la surface avant de rentrer et continuer la classe. Par contre, il était énervé. Il voulait avoir la réponse à sa question. Moins de 10 minutes plus tard, toute la classe était à l'abri en surface au milieu de centaines d'autres personnes à l'ombre d'une tour de bureaux.

III

Phoenix, 06/06/2061, 03h30, Niveau -13

« Creuser... Creuser... Noir... Creuser jusque la lumière... Lumière...Lumière? Allumer la lumière... Briquet... Etincelle... Flamme... Feu... Treize Creuser... Creuser... Noir... Creuser jusque la lumière... Lumière...Lumière? » se répétait Lauryn. Voici maintenant une heure qu'elle s'affairait dans l'obscurité du niveau -13.

« ...Briquet... Où est mon briquet ? Allumettes ? Oui... Creuser... Creuser... Noir... Creuser jusque la lumière... Lumière...Lumière? Allumer la lumière... Allumette... Etincelle... Flamme... Feu... Quatorze »

Elle disposait précautionneusement des petites mèches tressées à l'intérieur de bocaux remplis de cire. Au total, elle en avait placé quinze, répartis dans l'immense excavation du -13. Un nouveau projet de la ville destinait à transformer cet endroit en centrale de recyclage d'eaux usées dernier cri.

« ...Briquet... Où est mon briquet ? Allumettes ? Oui... Creuser... Creuser... Noir... Creuser jusque la lumière... Lumière...Lumière? Allumer la lumière... Allumette... Etincelle... Flamme... Feu... Quinze »

Toutes les mèches étaient disposées dans leur bocal. Lauryn commença à les relier entre elles en les tissant autour d'une unique mèche, plus épaisse, qui partait du centre de la pièce.

« Noir... Ne plus jamais... Noir... Fini... Air... A moi... Noir ... Plus jamais... 3 mois... Encore... Ciel... A moi... »

Lauryn travaillait depuis les débuts de la ville souterraine en tant qu'excavatrice. C'est elle qui déblayait les roches avec son véhicule pelleté. Mais à l'origine, elle était coureuse. Coureuse était son vrai métier, celui qu'elle avait choisi enfant, bravant les interdits de ses parents, par passion. Puis la Longue Fièvre était arrivée. Construire en surface n'était plus à la mode. Elle avait dû se reconvertir là où on avait besoin d'elle. Mais elle détestait ça. Ce qu'elle aimait c'était l'extérieur, le vent, le vide. Elle ne supportait pas l'obscurité des sous-fonds, son humidité. Chaque jour, elle avait l'impression de creuser sa propre tombe, un précipice sans fond. Creuser, creuser toujours plus profondément. En ça

se résumait sa vie. Mais bientôt ce serait fini. D'ici quelques mois, elle sera en retraite et pourra trouver un nouveau logement, ailleurs, loin d'ici. Pourtant, au début, c'était séduisant. Elle agissait pour la bonne cause. Puis ça avait pris une dimension trop importante. Elle ne pouvait plus se résigner à habiter sous terre.

« 5 pieds par heure... 22 pieds du bocal A.... 4 heures... 5 pieds par heure... 22 pieds du bocal B... 4 heures... 5 pieds par heure... 22 pieds du bocal C.... 4 heures... 5 pieds par heure... 22 pieds du bocal D... 4 heures... »

L'entreprise qui l'embauchait lui fournissait un logement très économique et très pratique, au plus près des lieux de chantiers. C'est pour ça qu'elle avait accepté. Pas de dépenses de transport, pas de loyers exorbitants. Mais au fur et à mesure que la ville se développait sous la surface, les logements se déplaçaient également en profondeur. Lauryn était piégée. Piégée à vivre enfermée et enterrée. Car bien sûr, ces logements n'étaient pas du plus grand confort. Les fenêtres lumineuses n'étaient pas dessinées dans les plans et les tubes de verres ne venaient pas jusqu'à cette profondeur. Seul un petit cylindre d'un mètre de diamètre venait jusque dans la cour commune.

« Allumer... Mèche enflammée... Bientôt... Flamme... Fumée... système d'aération... 3 pieds par seconde... Alarme... 20 minutes... Déclenchement... Sonnerie... Tout le monde dehors... »

Tout le monde dehors, c'est ce que souhaitait Lauryn. Elle ne comprenait pas comment les gens pouvaient supporter de vivre sous la surface. Elle ne concevait l'idée d'apprécier cette ville souterraine qu'elle avait aidé à bâtir. Ils en avaient même jusqu'à oublier la surface, son éclat et ne supportaient plus le moindre rayon de soleil sur leur peau. La plupart des gens ne sortait que l'hiver lorsque le soleil se faisait plus timide et moins ardent. Lauryn, dès qu'elle finissait sa journée ou sa nuit de travail, sortait, s'allongeait sur le sol brûlant et s'endormait là. Peu importe les coups de soleil qu'elle prenait. C'était moins pire que les champignons qu'elle risquait d'attraper si elle restait là-dessous exposée à l'humidité.

« Fou... Les autres... Pas moi... Fou... Les autres... Pas moi... »

Bien sûr, ses collègues la prenaient pour une psychopathe. Ils lui répétaient de changer de refrain, d'aller consulter mais elle n'y prêtait pas attention. Un jour, son supérieur lui avait fait remarquer que ce n'était pas à elle de décider si les gens devaient aller en surface ou non, ils étaient libres de leur mouvement. Lau-

ryn avait rétorqué qu'elle en avait le droit et pris cela pour un défi. Contre leur volonté, elle ferait sortir les habitants de la ville, elle leur ferait admirer le zénith, elle leur ferait sentir le vent dans leurs cheveux.

« Dernier geste... Prêt... Tout est prêt... Creuser... Noir... Lumière... Feu... Fumée... Ciel... 5 pieds par heure... Sonnerie... Air... Bientôt... »

Lauryn fit craquer une allumette et approcha la flammèche de la tige. Cette dernière s'embrasa lentement. Elle se divisait en quinze plus petites mèches qui menaient chacune à un bocal. Chaque bocal, situé en dessous d'une sortie d'air du système d'aération, dégagerait une fumée toxique qui réveillerait les alarmes incendie et ferait évacuer tout le secteur D3. Si tous les calculs de Lauryn étaient bons, tout se passerait comme prévu. Vers dix heures, les premiers mouvements de foule devraient être visibles. Lauryn, elle, allait tranquillement remonter sur la terre ferme et s'allonger pour observer l'aube puis attendre. Pour rien au monde elle ne manquerait la vue de tous ces gens redécouvrant le bonheur de la vie en surface.

« Remonter... Surface... Air... Vent... Soleil... Fou... Les autres... Pas moi... Souterrain... Non vivable... Mort... Mouvement... Ok... Habitat... Non... Surface... » se répétait-elle à l'infini.



Pourquoi?

ATLAS

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ATLAS : GÉO-HISTOIRE DU SOUTERRAIN

L'utilisation du sous-sol par les humains n'est en rien quelque chose de nouveau. Si son exploitation peut sembler prometteuse dans le futur, il a déjà été largement valorisé par le passé par de nombreuses civilisations partout sur la Terre. On ne compte plus le nombre d'infrastructures souterraines construites par l'Homme depuis le XXème siècle ni le nombre de kilomètres de galeries creusées pour exploiter des minerais précieux. De nombreuses personnes de par le monde, vivent actuellement dans des édifices semi-souterrains ou troglodytes comme en Chine sur le plateau de Loess. En somme, la possibilité d'exploiter le sous-sol pour les activités humaines n'est plus à démontrer, c'est un fait. Il est toutefois intéressant de se pencher sur les facteurs de son utilisation. Pourquoi les Hommes creusent ? Quelles sont les usages et les circonstances qui ont favorisé l'enfouissement des activités humaines sous la surface du sol ? Ce qui suit a pour objectif de donner quelques éléments de réponses en proposant une classification des espaces souterrains. En effet, tous les espaces souterrains n'existent pas pour la même raison. Edouard Utudjian (1905-1975), un architecte français pionnier de l'urbanisme souterrain, différenciait les infrastructures souterraines selon trois catégories : La recherche de protection, le besoin de circulation et l'exploitation du sous-sol¹. Nous gardons ici cette classification mais en y ajoutant deux nouvelles: la pratique d'un culte et le développement contemporain des villes pour des motivations aussi diverses que géographiques, historiques, économiques, urbaines...

¹ Edouard Utudjian, *«Que sais-je?» L'urbanisme souterrain*

01_ LA RECHERCHE DE PROTECTION	p 23
02_ LE BESOIN DE CIRCULATION	p 37
03_ L'EXPLOITATION DU SOUS-SOL	p 49
04_ LA PRATIQUE D'UN CULT	p 59
05_ LE DEVELOPPEMENT CONTEMPORAIN URBAIN	p 69

01_LA RECHERCHE DE PROTECTION

Quand l'Homme est en danger, il recherche un abri, un lieu où il se sent en sécurité. Il se trouve que dans l'Histoire de l'humanité, cet abri a été à de nombreuses reprises sous le sol. La terre protège. Elle est un environnement stable dans lequel on peut se cacher. L'Homme y est invisible.

Elle offre une protection face aux conditions climatiques difficiles telles que les hautes températures, les tempêtes de sable mais aussi face aux ennemis. En temps de guerre, des espaces souterrains ont été imaginés pour protéger la population des bombardements. Bien auparavant l'essor de l'aviation de guerre, les hommes et les femmes du val de Loire cherchaient refuge dans des cavités rocheuses difficiles d'accès pour se protéger des vikings et les premiers chrétiens s'enfouissaient sous terre pour pouvoir pratiquer leur culte sans être découvert. Encore aujourd'hui, des galeries souterraines sont creusées. A Mossoul en Irak, la guerre s'est jouée en souterrain. Les rebelles ont creusé des galeries souterraines pour se protéger de leurs assaillants. En effet, ils y sont invisibles. Les radars ne peuvent détecter leur présence. Cette stratégie défensive permet aujourd'hui un rapport de force entre deux opposants qui n'ont pas la même puissance de guerre². A Djaji à la frontière pakistanaise, une forteresse souterraine a été creusée abritant hôpitaux et salles de repos.

Si l'espace souterrain est souvent perçu comme un lieu hostile, il est aussi largement utilisé pour se réfugier. Les illustrations qui suivent n'en sont que d'autres exemples.

01_A - Protéger des conditions climatiques p 24

01_B - Se protéger des ennemis p 30

² Emission France Culture, *Dans les entrailles de la Terre*



© Erieta Attali

MAISON ALONI - GRÈCE

Cette maison conçue par decaARCHITECTURE et construite en Grèce s'installe entre deux collines et s'inscrit dans le sol. La forme de l'ensemble protège la maison des intempéries et des fortes chaleurs tout en permettant à l'habitation de bénéficier d'une riche lumière naturelle.



COUPE MAISON ALONI- GRECE



YAODONG - CHINE

Sur le plateau du Loess en Chine du nord ainsi que sur les falaises alentours, les habitants de cette région vivent majoritairement dans des Yaodong, des maisons troglodytes creusées à flanc de falaise ou enfouies dans un sol plat et composées d'une cour intérieure ouverte sur le ciel. Ce type d'habitations existeraient depuis plus de 2000 ans mais s'est véritablement développé durant les dynasties Ming (1368 - 1644) et Qing (1644-1912). Encore aujourd'hui la majorité des nouvelles constructions résidentielles sont de type troglodytes. En effet, elles sont parfaitement adaptées aux conditions climatiques de la région.



© Tous droits réservés

YAODONG - CHINE



CUEVAS DE GRENADE - ESPAGNE

Ces habitations troglodytiques existent depuis le X^{ème} siècle dans les collines de l'Andalousie. Creusées dans la roche granitique, elles gardent des températures fraîches toute l'année et protègent les habitants du soleil ardent de l'été. Elles se trouvent la plupart du temps à flanc de falaise, elles sont donc difficile d'accès et servaient également à se protéger des intrusions. Aujourd'hui, certaines habitations sont devenues des locations touristiques mais les autres restent un lieu de vie pour de nombreux ermites.



EPICERIE - ITALIE

Cette épicerie italienne est située dans le centre-ville d'Ostuni, une ville des Pouilles construite sur une colline mais aussi dans la colline. Ce magasin tire parti du relief pour créer un espace troglodyte qui reste au frais. La conservation des fruits et légumes et autres denrées alimentaires y est optimale.



DERINKUYU - TURQUIE

Derinkuyu ou « Puits profond » est une cité souterraine vieille de plus de 2500 ans. Elle s'est surtout développée durant les premiers siècles de notre ère lorsque les chrétiens cherchaient refuge pour se protéger des persécutions de l'Empire romain puis a été progressivement abandonnée. Redécouverte en 1969, la cité compte au moins 8 étages qui descendent jusqu' 85 mètres de profondeur. La cité était composée d'habitations, de galeries, de chambres de stockage mais aussi des espaces de vie publics tel qu'une école ou encore une église. Un système d'aération y a été également découvert. La cité pouvait se protéger des intrusions en bloquant les entrées à l'aide de grandes meules de pierre mais les cheminées d'aération représentaient une faiblesse puisqu'il était possible d'empoisonner l'intérieur par ces voies.



HABITATS TROGLODYTES DU VAL DE LOIRE - FRANCE

Dans le val de Loire, on extrait la pierre de tuffeau depuis le Moyen-Age. Près de 1200 kilomètres de galeries ont été creusées pour son exploitation mais aussi pour s'abriter. Durant les incursions vikings au X^{ème} siècle, de nombreux habitants s'y sont réfugiés. Les grottes sont des moyens défensifs naturels et de nombreux habitants s'y sont installés de manière permanente.



ABRI DE KATARINBERG - SUÈDE

L'abri de Katarinaberget a été construit dans le sous-sol granitique de Stockholm sous la colline de Mosenback entre 1952 et 1957 dans un contexte de guerre froide. Sa fonction est bivalente: parking pour 500 voitures la plupart du temps, il a d'abord été conçu en tant qu'abri anti-atomique pour 30 000 personnes en cas d'alerte.



UNDERGROUND DE LONDRES - ROYAUME-UNI

Le métro londonien s'est transformé pendant la seconde guerre mondiale en abri de guerre. Pendant les bombardements incessants de la ville en 1940 par les allemands, 177 000 personnes s'y sont réfugiés pour rester à l'abri des bombes. Cependant, il n'a pas été aussi efficace qu'on le pense. Par exemple, suite à une mise en alerte de la population, un mouvement de foule vers une station de métro a provoqué 173 morts. Aussi, un tuyau d'eau ayant été percé suite à l'impact d'une bombe, a causé l'inondation d'une station et noyé 60 personnes.



MAISON SOUTERRAINE - USA

Jay Swayze imagine dans l'Amérique des années 60, un prototype de maison souterraine permettant de se protéger d'une attaque nucléaire selon le principe du bateau en bouteille : un cuvelage en béton armé recouvert de 90 cm de terre. Homme d'affaires, il vend ce modèle de maison comme étant la solution idéale pour garder les avantages des deux mondes : le monde souterrain et le monde de la surface. Les espaces extérieurs sont intériorisés et de fausses vues sur le paysage sont installés derrière de fausses fenêtres.



MAISONS SOUTERRAINES - USA

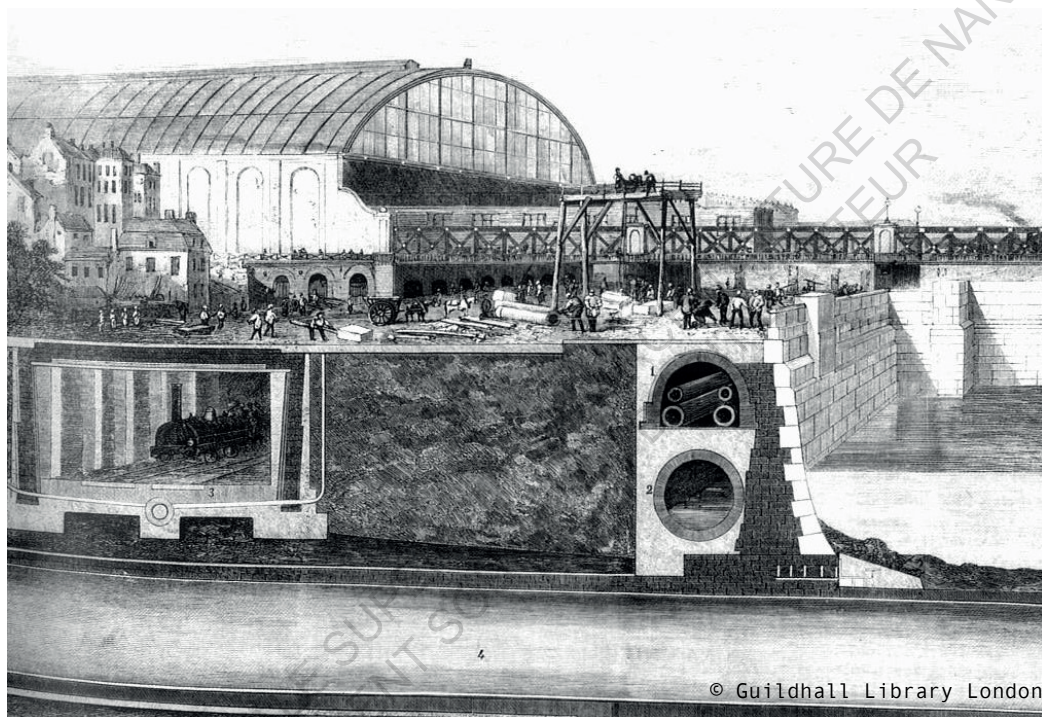
02_LE BESOIN DE CIRCULATION

Les civilisations humaines les plus avancées ont toutes eût un moment donné à résoudre le problème de l'hygiène dans les villes. Elles se sont dotées d'un réseau d'évacuation des eaux usées, d'un approvisionnement régulier en eau et en énergie. A chaque fois, la solution a été d'enfouir les réseaux sous la voie publique car elle permet une circulation des fluides plus aisée, rapide et sans encombrer le paysage urbain.

Pour la circulation des personnes, on retrouve le même procédé pour surmonter un obstacle tel qu'une colline ou le bâti urbain. Le progrès technologique dans ce domaine a été primordial et a permis la réalisation de grandes infrastructures comme le tunnel sous la Manche.

01_A - La circulation des fluides p 38

01_B - La circulation des personnes p 41



ENFOUISSEMENT DES RESEAUX EN 1867 - LONDRES

A Londres, au XVII^{ème} siècle, des entreprises développent des infrastructures pour approvisionner les habitations en eau courante. Certaines pompent l'eau de la Tamise jusqu'à des châteaux d'eau qui distribuent ensuite par gravité l'eau aux ménages. Au départ, le transit de cette eau se faisait dans des tuyaux de bois qui devaient être changés tous les trois ou quatre ans. Ils étaient donc installés juste sous la route afin de pouvoir y accéder facilement. Au XIX^{ème} siècle, les installations deviennent plus pérennes.



© Tous droits réservés

CRYPTOPORTIQUE ROMAIN - ROME

A l'époque de la Rome antique, de nombreuses villas ou édifices publics reposaient sur des cryptoportiques. Ce sont des galeries souterraines destinées à la circulation et au stockage des denrées périssables qui servaient aussi en tant que fondations pour le bâtiment au-dessus. Parfois très vaste, cet espace reste en toute circonstance au frais, il était donc utile pour conserver des aliments mais aussi pour se promener pendant les heures chaudes de la journée.



© Tous droits réservés

RYŪ-Q-KAN - TOKYO

Cette immense infrastructure de 177 mètres de long, 78 mètres de large, 18 mètres de hauteur et enfouies à 22 mètres sous terre protège la mégapole tokyoïte des inondations en drainant les précipitations de la ville et en la stockant en cas de surplus. Elle est devenue une activité touristique pour son ampleur hors norme.



TUNNEL JENNER - LE HAVRE

Ce tunnel inauguré en 1955, traverse une colline dans la ville du Havre. Il est long de 680 mètres et est intéressant dans sa gestion de la luminosité. En effet, des voûtes translucides ont été installées aux embouchures du tunnel afin d'habituer progressivement l'automobiliste à la lumière du tunnel. La gradation évite un changement de luminosité trop rapide qui provoque des aveuglements puisque la luminosité varie entre 10 000 lux pour l'extérieur à 100 lux dans le tunnel.



GARE SOUTERRAINE - MONACO

La gare de Monaco, inauguré en 1999, a été installé dans le rocher de la principauté. Un réel travail de la lumière a été fait afin de créer une ambiance plus chaleureuse en comparaison des autres stations ferroviaires souterraines. Pour cela, le tunnel en béton a été partiellement habillé de bois exotiques et illuminés de nombreux spots créant une voûte étoilée au-dessus des voies de trains.



MÉTRO DE STOCKHOLM - SUEDE

Le métro à Stockholm est un moyen de transport qui permet de couper à travers les collines de la ville et évite des détours interminables. Mais c'est aussi la plus grande galerie d'art au monde selon la municipalité. Depuis les années 50, des artistes ont été autorisés à décorer les stations de métro afin d'y apporter une atmosphère particulière : Excavation archéologique, station arc-en-ciel, Station rouge, station mosaïque Pac-man, tout type d'art se retrouve dans plus de 90 stations de la ville.



PLAN DE L'UNDERGROUND PAR HENRY BECK - LONDRES

Premier métropolitain en fonction au monde, l'Underground de Londres a aussi révolutionné la cartographie souterraine. Henry Beck invente un diagramme en 1933 qui simplifie considérablement la lecture du plan de circulation du métro londonien. En effet, son diagramme ne respecte plus les distances entre les stations et simplifie la lecture des correspondances. L'esthétique du plan va ensuite se propager dans toutes les autres villes disposant d'un métro et est toujours utilisé aujourd'hui.



© Tous droits réservés

RESO: LA VILLE INTÉRIEURE - MONTRÉAL

La ville intérieure de Montréal est le plus grand complexe souterrain au monde avec pas moins de 32 km de galeries piétonnes. Ces galeries relient les différentes stations de métro à des centres commerciaux souterrains qui sont en général en continuité des bâtiments en surface. Très appréciés des montréalais, c'est un parcours alternatif pour échapper aux blizzards d'hiver.



GALERIE DU PARC GÜELL PAR ANTONI GAUDI - BARCELONE

Galerie excavée dans la roche du parc Güell. La voûte fait office de mur de soutènement à forme complexe. En effet, sa forme particulière lui permet de reprendre les poussées horizontales du sol dans lequel elle est encavée.



LOW LINE - NEW-YORK

Après le succès de la High Line de New-York, parc urbain sur une ancienne voie de chemin de fer aérienne, un projet de parc souterrain intitulé Low Line va voir le jour dans un ancien tunnel. L'objectif est de réutiliser d'anciens espaces souterrains inutilisés et d'y expérimenter des moyens de faire parvenir la lumière du soleil jusqu'aux entrailles de la ville, d'y faire pousser des plantes et de rendre cet endroit agréable pour la population.

03_L'EXPLOITATION DU SOUS-SOL

Les Hommes creusent pour se frayer un passage à travers la roche, pour créer de l'espace supplémentaire en sous-sol mais ils creusent aussi pour exploiter ce sous-sol et ce qu'il contient. En effet, creuser est le plus souvent un moyen de trouver de l'eau en installant des puits. On peut ainsi exploiter les nappes phréatiques ou utiliser cette eau pour créer de l'électricité.

Le sous-sol n'est pas uniforme et homogène sur toute la Terre. Parfois, il est constitué de roches et de minerais précieux utiles à l'activité humaine pour bâtir des édifices, fabriquer des objets... Des carrières s'ouvrent et modifient le paysage en profondeur. Une fois exploitées, celles-ci sont abandonnées et parfois transformées pour accueillir de nouvelles activités comme la carrière de Jonzac qui a été utilisée comme champignonnière puis aujourd'hui comme station thermale. En voici d'autres exemples.

01_A - A la recherche d'eau p 50

01_B - L'exploitation des minerais p 51



CHAND BAORI - INDE

Le Chand Baori est un puits à degré situé au Rajasthan en Inde qui collecte les précipitations de la mousson et la stocke. C'est un carré de trente mètres de côté avec des escaliers tout autour afin de descendre à l'intérieur et se servir en eau. Construit à partir du VIII^{ème} siècle, il est profond de 20 mètres et est composé d'un côté de galeries souterraines et de terrasses et des trois autres côté de douze niveaux de doubles volées d'escaliers de symétrie parfaite. Destiné à assurer la ressource en eau de la région, son architecture spectaculaire nous prouve qu'il était destiné à recevoir les cérémonies d'ablutions du culte hindouiste en présence du Raja : monarque de l'époque.



MATERA - ITALIE

La ville de Matera, dans le Basilicate, est une ville construite dans une cuvette rocheuse. Les habitations sont en partie troglodytes. La pierre excavée pour ces habitations a ensuite été utilisée pour créer des surélévations des bâtiments souterrains. La couleur de la ville est donc la même que celle de la colline.



© Tous droits réservés

CARRIÈRE D'ARGILE - AFRIQUE

La terre est sans doute l'un des premiers minerais que l'Homme a exploité. Utile pour construire des habitations, ce matériau a une extraordinaire inertie thermique ce qui permet de réduire l'amplitude des températures entre nuit et jour à l'intérieur des maisons. En Afrique plus qu'ailleurs, c'est un matériau très répandu encore aujourd'hui ce qui entraîne l'exploitation de carrières d'argile.



MAISON DE TERRE - BÉNIN



© Tous droits réservés

FOSSE AUX LIONS - PARIS

La fosse aux lions était une carrière à ciel ouvert de Paris exploitée jusqu'au Moyen-Age. Celle-ci a ensuite eut différents usages : cour de récréation pour enfants, lieux de vies de nomades et saltimbanques mais aussi lieu de réunions populaires et ouvrières. Il y aurait eu des combats entre animaux féroces ici, d'où son nom de fosse aux lions. Le terrain vague a ensuite été remblayé et est devenu un lieu d'habitats pauvres au moment des percements Haussman au XIXème siècle. Plus tard, un site industriel s'est implanté à cet endroit avant d'être remplacé par un hôtel en 1969.



CARRIÈRE DE MARBRE DE CARRARE - ITALIE

En Toscane se trouve la plus fameuse carrière de marbre du monde. Surtout connu pour son marbre très blanc sans trop de veinage, il est utilisé depuis l'époque romaine pour construire les temples et autres édifices importants. L'exploitation du sol depuis des siècles a transformé le paysage de manière très visible. Les basses montagnes sont peu à peu découpées et révèlent un intérieur blanc. Le David de Michel-Ange provient notamment de cette carrière. Il y a deux types de carrières : celles à ciel ouvert qui crée comme un grand amphithéâtre avec ses gradins de blocs, et celles fermées formant de grandes galeries dans lesquelles la lumière extérieure pénètre parfois très loin à l'intérieur grâce à la réflexion de la blancheur du marbre.



MINE DE COBALT - CONGO

Minerai indispensable à la fabrication des batteries de nos appareils électroniques, le cobalt est devenu ces dernières années un enjeu géopolitique majeur. Les multinationales se font la guerre pour pouvoir exploiter ce minerai précieux au meilleur prix. Ceci n'est pas sans conséquence sur le paysage d'origine mais aussi sur les conditions de travail des personnes: entre esclavage déguisé et scandale du travail d'enfants.

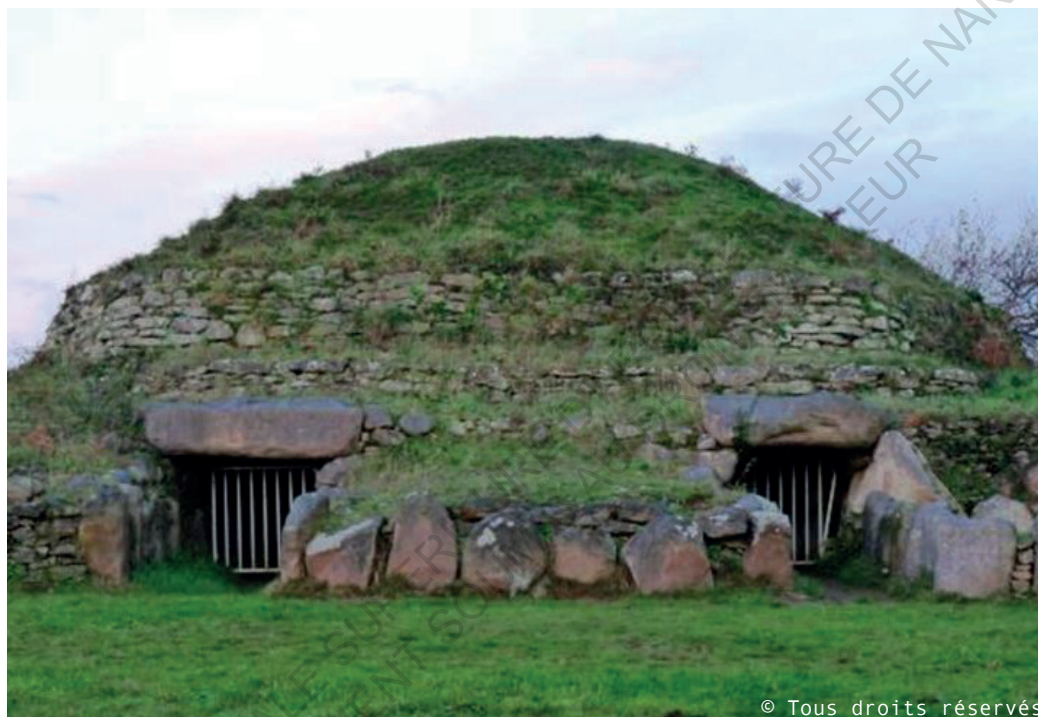


HÔTEL INTERCONTINENTAL WONDERLAND - CHINE

En 2018 a été inauguré un nouvel hôtel 5 étoiles en Chine dans une ancienne carrière désaffectée. La particularité topographique du site a été utilisée pour concevoir un hôtel à flanc de carrière qui descend à 88 mètres de profondeur. Réalisé par l'architecte Martin Jochman, le complexe dispose d'un parc d'attractions, d'une cascade et d'un plan d'eau artificiel.

04_LA PRATIQUE D'UN CULTE

L'espace souterrain est souvent vécu comme un lieu spirituel. Son obscurité et son silence seraient propices à la quiétude et à la prière. C'est pourquoi, on trouve encore de nombreuses traces de lieux de cultes incrustés dans la roche à travers le monde. Une autre raison qui explique la présence d'une pratique religieuse en souterrain est la volonté de se cacher pour éviter la répression comme aux débuts de la chrétienté à l'époque romaine. Il est aussi fréquent de retrouver dans l'histoire des civilisations des lieux de sépulture et de recueillement dédiés aux défunts installés sous terre.



TUMULUS DE DISSIGNAC - FRANCE

Le Tumulus de Dissignac a été érigé au Vème millénaire avant notre ère. Il s'agit d'une chambre funéraire inscrite dans le sol, entourée d'une enceinte de pierre et recouverte d'une colline artificielle.



© Tous droits réservés

GROTTE DE LASCAUX - FRANCE

La grotte de Lascaux est fameuse pour ses peintures pariétales datant d'entre 17 000 et 18 000 avant JC. Les chercheurs pensent que ces peintures étaient une manière d'entrer en contact avec les esprits, une sorte de rituel magique. La grotte n'était pas un lieu de vie mais un lieu spirituel.



Laurent Triolet © www.mondesouterrain.com

CRYPTE SAINTE-AGATHE - MALTE

Avant l'an 301 et l'Edit de Maximum, les chrétiens étaient persécutés par les romains à cause de leur foi. Afin de pouvoir pratiquer leur religion en secret, des cryptes souterraines ont été aménagées sous les villes. Dans la ville de Rabat sur l'île de Malte par exemple, la crypte Sainte-Agathe a été investie durant cette période et est entourée de catacombes dans lesquels des tombeaux familiaux ont été installés à l'abri des non-chrétiens.



EGLISE DE L'ANNONCIATION DE HAUTE-ISLE - FRANCE

C'est l'une des rares églises troglodytes de France. Son principal intérêt est qu'elle est complètement creusée dans la roche. Son unique façade éclaire l'intérieur de la nef. Le clocher, qui est le seul élément construit en maçonnerie, émerge du relief. Construit dans un lieu escarpé, creuser était le moyen le plus facile pour ériger une église en cet endroit.



© Tous droits réservés

EGLISE BETE GIYORGIS - ETHIOPIE

L'église éthiopienne de Bete Giyorgis est une église monolithique datant du XIII^{ème} siècle. Elle se trouve dans un puits de 22 mètres par 23 mètres à 11 mètres de profondeur. L'église est indépendante de la roche. Elle n'y est rattachée que par sa base. Pour y accéder, une galerie et un tunnel ont été creusés à côté de l'excavation. Elle fait partie d'un ensemble de 11 églises dites de la « nouvelle Jérusalem ». Certaines d'entre elles sont reliées par des tunnels.



© Tous droits réservés

EGLISE DE SAINT-EMILION - FRANCE

L'église de Saint-Emilion est entièrement creusée dans la roche. Erigée au XI^{ème} siècle, c'est la plus grande église souterraine d'Europe. Elle a été creusée à flanc de colline dans un bloc de calcaire. Sa grandeur n'est pas perceptible depuis la place du marché. A l'intérieur, la nef est soutenue par des piliers et des voûtes dont la forme correspond à la courbe de résistance de la pierre.



© Tous droits réservés

EGLISE DE TEMPPELIAUKO - FINLANDE

L'église de Tempeliahauko est une église monolithique située à Helsinki en Finlande. Elle a été construite en 1969 par les frères Suomalainen. L'église est en partie enterrée. Les parois de granit sont visibles depuis l'intérieur et sont surmontées de maçonnerie en pierre du même type. La structure est couronnée par un toit circulaire en lattes de bois qui laisse pénétrer la lumière naturelle à l'intérieur de l'édifice.



NÉCROPOLE DE SAQQARAH - EGYPTE

La nécropole de Saqqarah est un site égyptien de sépulture. De nombreux tombes royales et chambres funéraires plus modestes se trouvent en cet endroit. Il est composé de différents éléments: temples, pyramides mais aussi de Mastabas. Les Mastabas sont des édifices dans lesquels on trouve une chapelle avec une statue du défunt, un puits comblé qui mène au caveau funéraire souterrain et au sarcophage.

05_LE DÉVELOPPEMENT CONTEMPORAIN DES VILLES

Que celles-ci soient urbaine, géographique, économique ou encore historique, les opportunités pour les constructions souterraines contemporaines sont souvent le résultat d'une conjoncture particulière entre un site et un contexte. Ce concours de circonstances joue sur la prise de décision pour investir le sous-sol et est l'occasion d'expérimenter de nouvelles formes urbaines. Dominique Perrault s'est saisi de ces opportunités dans une grande partie de ces projets pour valoriser le sous-sol ainsi que la surface. Il emploie le terme « Groundscape » pour parler de l'architecture souterraine qu'il considère comme un paysage. Selon lui, « le groundscape est un outil de révélation ».

Le volume souterrain est utilisé pour densifier un espace et permettre d'autres activités. Ces nouvelles activités peuvent aussi être possibles en transformant par le dessous des édifices existants. Les exemples suivants nous montrent à quel point l'exploitation du sous-sol est un enjeu plus que d'actualité pour le développement de nos villes.

01_A - L'intensification urbaine p 70

01_B - La transformation de l'existant p 79



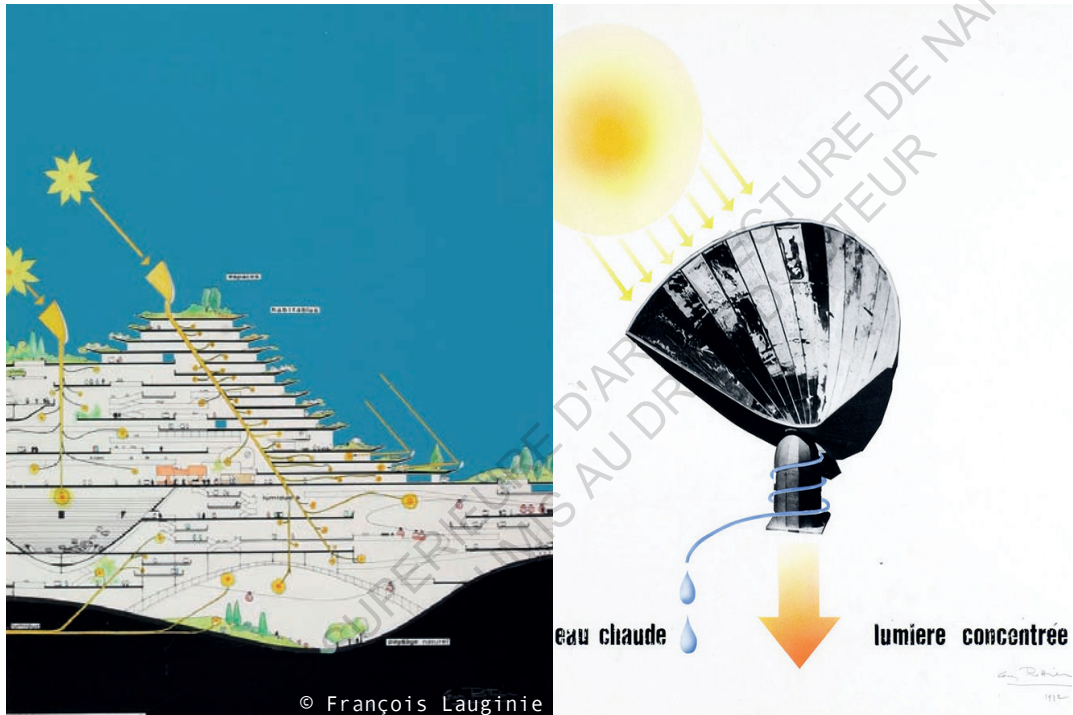
UNIVERSITÉ FÉMININE D'EHWA - SÉOUL

Conçue par Dominique Perrault entre 2004 et 2008, le campus de l'université est entièrement enterré. Une faille coupe le bâtiment en deux permettant à la fois d'y descendre et d'y apporter de la lumière. A la surface, le toit du bâtiment est recouvert d'un jardin. Cette solution a été choisie afin de ne pas créer de barrière entre le reste du campus et le centre de la ville.



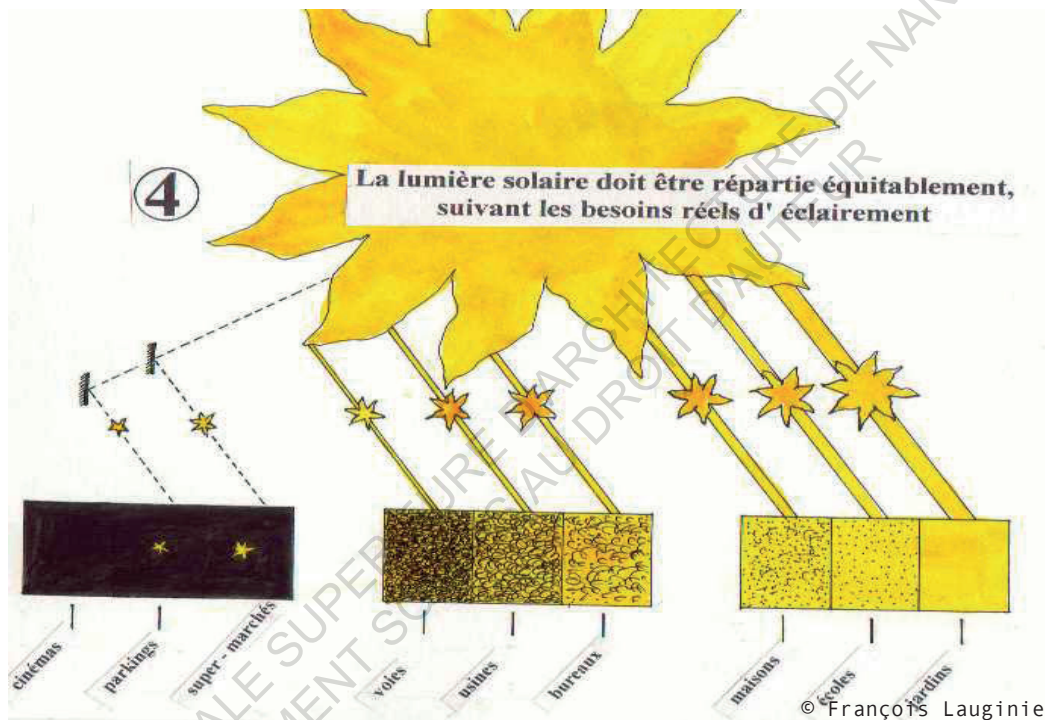
BNF - PARIS

La Bibliothèque nationale de France construite en 1996 par Dominique Perrault est un édifice rectangulaire sur les bords de Seine. Une « jungle » a été installée au centre dans une grande cour inaccessible. Cette cour, située au niveau du sol est entourée d'une grande esplanade surélevée. Sous la « jungle » se trouve deux étages servant de circulations pour les ouvrages. L'exploitation du souterrain dans cet exemple résulte surtout d'un besoin de surface dans une ville très dense. La stratégie choisie a permis d'obtenir un volume plus important tout en créant un vaste espace public et un poumon de végétation au centre de l'ensemble.



ECOPOLIS

Guy Rottier imagine dans les années 1970, une cité souterraine solaire. Il imagine une ville enfouie sous terre et organisée selon son besoin de lumière. La lumière naturelle est amenée dans les profondeurs de la cité grâce à des lumiducs. Le système est composé de tuyaux à parois intérieures réfléchissantes qui, reliés à un miroir capteur situé en surface, permettent d'éclairer des volumes aveugles et profonds.



ECOPOLIS

« [...] ce propos vise essentiellement à utiliser les propriétés du rayonnement solaire comme «source de lumière et de vie», et non à le transformer en d'autres énergies. Nos agglomérations ont des fonctions indifférenciées, dont l'ensoleillement n'est pas proportionnel à leurs besoins respectifs. En effet dans nos villes actuelles, 25% des volumes ont besoin de soleil (habitations, écoles, hôpitaux, etc.), 25% des volumes ont besoin de soleil intermittent (bureaux, patios, etc.), 50% des volumes n'ont pas besoin de soleil (cinémas, supermarchés, garages, etc.). Une meilleure répartition des volumes s'impose, et l'idée nouvelle consiste en l'utilisation de «lumiducs», transportant et distribuant la lumière solaire là où elle est nécessaire. [...] la lumière solaire est transportable ; les notions d'orientation sont périmées. » Guy Rottier



© Tous droits réservés

LIBRERIA MINERVA - ROME

On peut trouver à Rome plusieurs librairies souterraines dont la libreria Minerva qui, d'abord créée en rez-de-chaussée d'un bâtiment, s'est étendue par la suite en souterrain en acquérant un passage piéton souterrain en désuétude. A l'abri de la lumière, les livres se conservent mieux.



VILLA ONE - SAINT-CAST - FRANCE

Cette villa construite sur le flanc d'une falaise au bord de mer, s'intègre dans le relief. Elle est en contraste avec ses voisines puisqu'elle est entourée de grandes maisons qui se détachent de la roche et pointent vers le ciel. En effet, la villa One est presque invisible depuis la côte et indétectable depuis la terre. Elle s'insère ainsi dans un paysage sans le perturber.



© Tous droits réservés

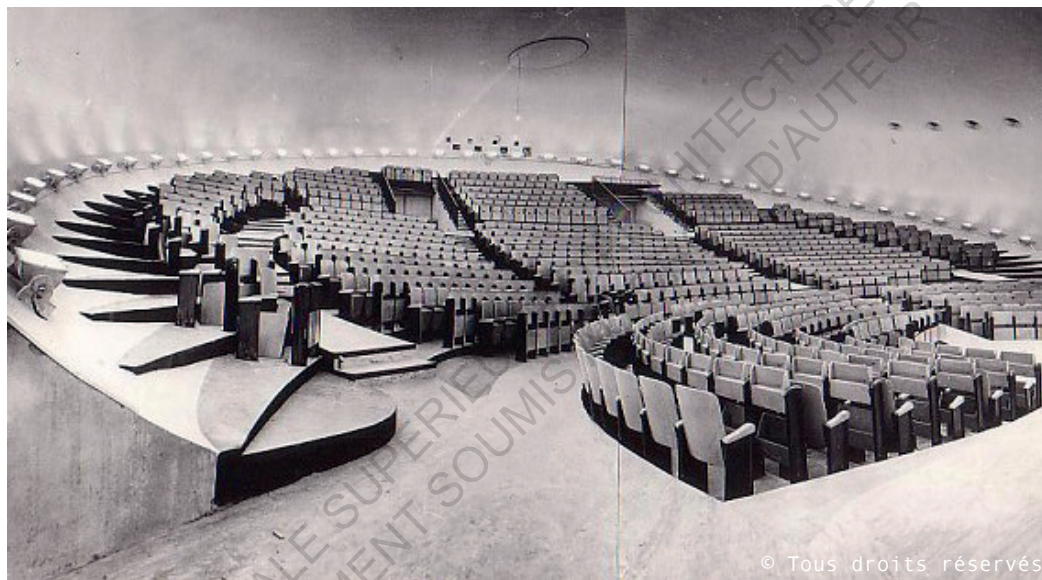
CADASTRE SOUTERRAIN - GENÈVE

La ville de Genève dispose depuis 2005 d'un cadastre 3D qui contient les éléments se trouvant en sous-sol. Cela permet de répertorier les canalisations, les pieux des bâtiments, les infrastructures souterraines de transport mais aussi les réseaux d'eau, les étendues racinaires des arbres... Géré par la SEMO (Service de la Mensuration Officielle de Genève) les opérateurs ont pour obligation de mettre à jour les informations. L'objectif est de rassembler les données des gestionnaires des réseaux souterrains, les transformer, les contrôler et les diffuser pour les futurs chantiers dans la phase d'avant-projet. Ce fichier ne fait pas figure de preuve, l'information doit provenir directement des opérateurs mais c'est un bon outil de première consultation.



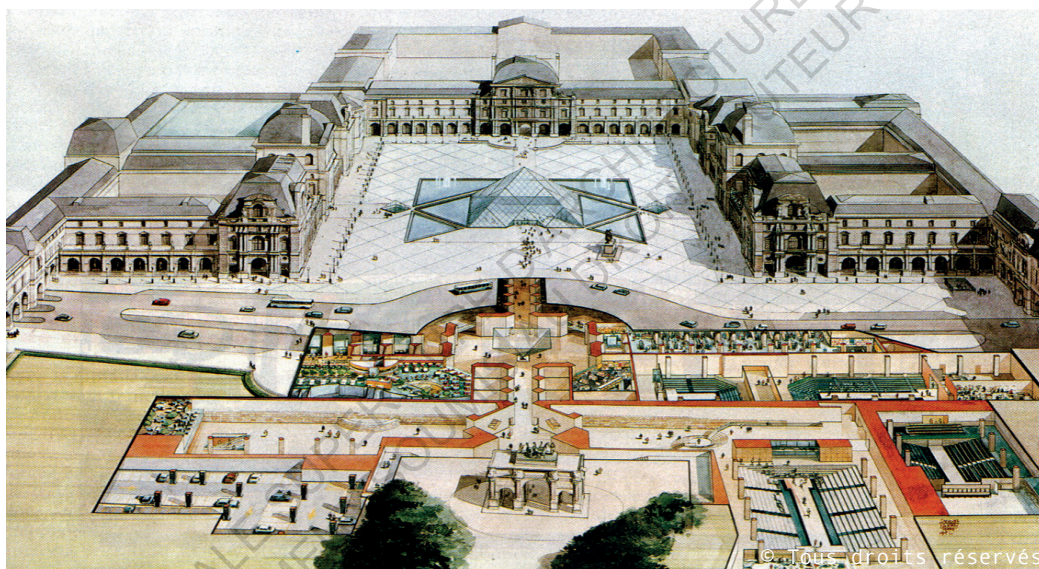
STATIONNEMENT VÉLO - TOKYO

Cette infrastructure souterraine antisismique permet de stationner les nombreux vélos circulant dans la ville sans grignoter de l'espace sur les trottoirs... Le vélo est transporté dans les profondeurs à l'aide d'un ascenseur et d'un bras robotisé. Le risque de vol est aussi bien moins élevé et le manque d'espace n'est plus un problème.



AMPHITHÉÂTRE - PARIS

Cet amphithéâtre se trouve en souterrain de l'école nationale d'ingénieurs des arts et métiers à Paris. Il se déploie sous une grande voûte de béton et contient 1000 places. Il a été réalisé par les frères architectes Sainsaulieu.



LE SOUS-SOL DU LOUVRE - PARIS

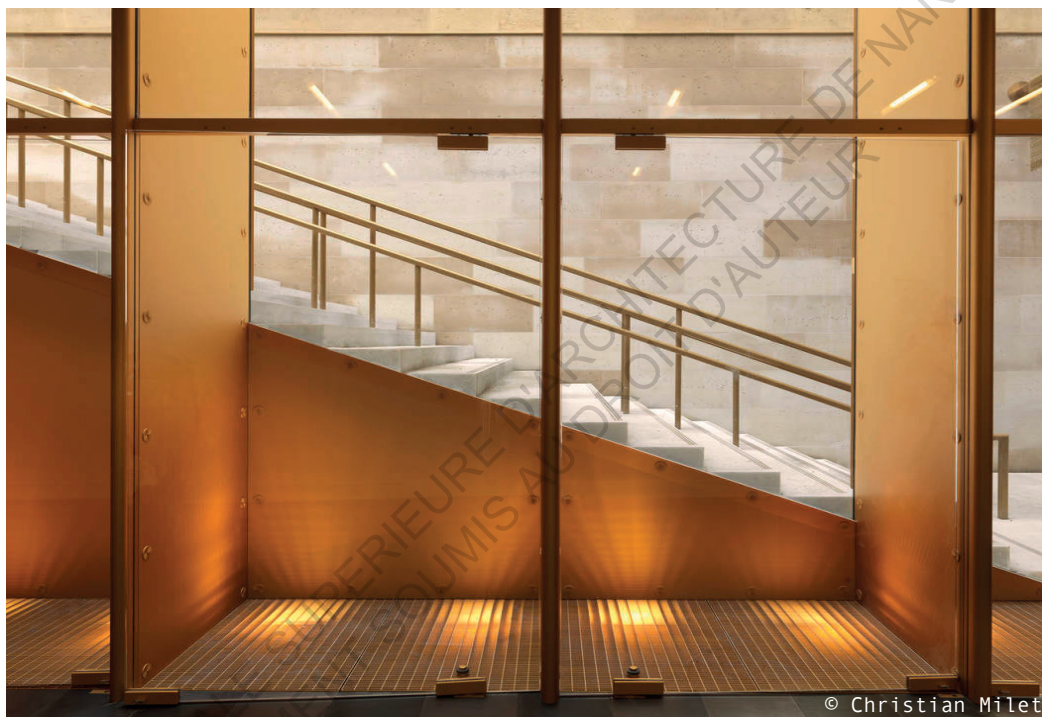
L'aménagement souterrain du palais du Louvre s'est effectué à partir des années 1980 avec la création de la pyramide par l'architecte chinois Pei (1917-2019). Le volume en sous-sol met en réseau les flux de visiteurs, les commerces mais aussi les accès aux transports en communs et aux parties techniques du musée. Cette densité d'usages et les liaisons qui existent entre elles et avec la surface font de cet espace, une exploitation efficace du volume souterrain.



© Christian Milet

PAVILLON DUFOUR DU PALAIS - VERSAILLES

En 2011, le château de Versailles cherche à s'agrandir afin de faciliter la circulation des visiteurs. Un nouvel espace est conçu par Dominique Perrault en souterrain afin de ne pas modifier la composition d'ensemble du château. Un escalier descend dans le nouvel espace le long du pavillon Dufour. Un muret vitré le suit en parallèle et fait pénétrer la lumière naturelle à l'intérieur tel un prisme. La couleur dorée de la structure améliore la pénétration de la lumière et rappelle en même temps la couleur des menuiseries existantes.



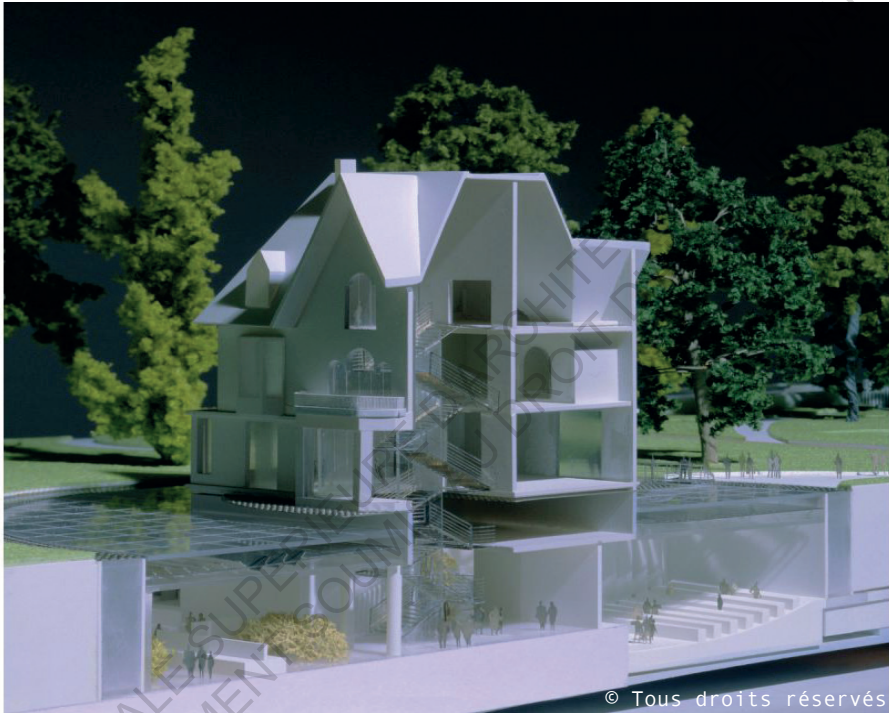
PAVILLON DUFOUR DU PALAIS - VERSAILLES



© Tous droits réservés

CENTRE DE CONFÉRENCE SACILOR - FRANCE

Afin de créer un auditorium de 200 places et 12 salles de réunion à côté du siège d'une entreprise sans détruire un vieux manoir, il a été choisi de revaloriser ce dernier en l'entourant d'un bassin de verre qui apporte la lumière au nouveau sous-sol accueillant ces programmes. Une vaste cour intérieure baignée de lumière donne accès aux différentes salles et est reliée à la surface par le manoir existant. Un pont a été imaginé entre l'entrée du manoir et le chemin du parc. Il enjambe le toit vitré du nouvel édifice pensé tel une mare d'eau.



CENTRE DE CONFÉRENCE SACILOR - FRANCE



Comment ?

ESSAI

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

INTRODUCTION

Comme nous avons pu le voir dans les exemples précédents, la possibilité d'investir le sous-sol pour y implanter des activités humaines n'est plus à démontrer, c'est un fait. Les activités y sont aussi diverses qu'en surface : transports, loisirs, usines, commerces, lieux de culte, bureaux et habitations ; même s'il est vrai que ces deux derniers sont moins représentés sous la surface pour des raisons éthiques. En effet, le souterrain conserve son aura obscure malgré des siècles d'occupation. Obscure par son manque de luminosité mais également par les croyances et les peurs qu'il évoque chez les personnes. Résidence du diable d'abord, effondrement des galeries minières ensuite, lieu d'insécurité et d'étouffement aujourd'hui, cette peur est largement utilisée dans les œuvres littéraires et télévisuelles d'épouvante, de thriller et policières. Combien de meurtres fictionnels se sont produits dans les parkings souterrains d'une tour de bureau ?

Il faut admettre que les espaces souterrains que l'on utilise au quotidien sont rarement avenants et sont souvent pensés dans un cadre strictement utilitaire. Sommes-nous incapables de créer des espaces qualitatifs dans ces endroits ? Les exemples que nous avons montrés dans l'Atlas précédent nous prouvent le contraire. Mais cette volonté doit encore être généralisée. C'est possible. Les progrès techniques que l'humanité a réalisés tout au long de son histoire et notamment au cours du dernier siècle permettent aujourd'hui de creuser et construire dans tous les types de sol, de gérer au mieux la pénétration de la lumière en profondeur et les ambiances de ces espaces. Les acteurs du bâtiment ont le savoir-faire nécessaire à leur réalisation. Seules changent les données économiques et environnementales.

Toutefois, cette dernière ne peut plus être mise de côté, il est temps de la prendre en compte dans les études de faisabilité afin de ne pas réaliser d'erreurs irréparables. Car le sol ne se reconstruit pas. Il ne se reconstitue pas. Aujourd'hui, le sous-sol est exploité partout sur Terre,

en ville et à la campagne, en plaine et en montagne. Le potentiel du souterrain dans ces espaces est grand : densification des activités urbaines, protection des paysages ruraux, exploitation des ressources souterraines, économie d'énergie... Ce potentiel est utile dès maintenant et plus que jamais. Nous vivons à une période de l'Histoire où la crise climatique, démographique et humanitaire se fait de plus en plus visible. La transition écologique est un enjeu prioritaire pour la survie de nos sociétés. Nous devons évoluer vers un nouveau modèle économique et social, un modèle de développement durable qui renouvelle nos façons de consommer, produire, de vivre ensemble pour répondre à ces grands enjeux environnementaux. Il y a intérêt à agir. Continuer à creuser le sol, à entailler la peau de notre Terre peut sembler contraire à ce modèle, et pourtant, il est possible qu'une partie de la réponse vienne de là, notamment en territoire urbain, là où la pression démographique se fait le plus sentir.

Dans quelles mesures l'urbanisation souterraine peut-elle contribuer à rendre nos villes plus durables ?

Les paragraphes qui suivent visent à donner quelques éléments de réponses à cette question. En mettant en lumière les dynamiques actuelles qui jouent en ce sens, en expliquant les outils utiles à sa réalisation et en mettant en garde contre certaines dérives, nous allons comprendre comment on peut investir l'espace souterrain de manière durable et comment l'action même de creuser peut devenir salvatrice pour nos civilisations. Nous expliquerons d'abord l'intérêt de donner une qualité et une pensée architecturale aux espaces souterrains pour disposer de lieux confortables et efficaces, notamment énergétiquement. Ensuite, nous verrons le rôle que peut jouer le sous-sol dans la transformation de la ville sur elle-même : réinvestissement de sous-sols abandonnés, transformation par le dessous de bâtiments existants. Nous comprendrons les enjeux de l'économie de l'espace. Enfin, nous étudierons l'exploitation du sous-sol à l'échelle urbaine afin d'en saisir les enjeux et comprendre son efficacité. Pour cela, nous analyserons différentes démarches mises à l'œuvre qui visent à son aboutissement.

I- LE SOUTERRAIN: UN MILIEU PARTICULIER A APPRIVOISER

« C'est par moi que l'on va dans la cité plaintive :
« C'est par moi qu'aux tourments éternels on arrive ;
« C'est par moi qu'on arrive à l'inferral séjour.

« La Justice divine a voulu ma naissance;
« L'être me fut donné par la Toute-Puissance,
« La suprême Sagesse et le premier Amour.

« Rien ne fut avant moi que choses éternelles,
« Et moi-même à jamais je dois durer comme elles.
« Laissez toute espérance en entrant dans l'Enfer ! »

Au sommet d'une porte en sombres caractères
Je vis gravés ces mots chargés de noirs mystères :
« Maître, » fis-je, « le sens de ces mots est amer ! »

Mais lui d'une voix ferme : « Il n'est plus temps de craindre !
Tout lâche sentiment dans ton cœur doit s'éteindre;
Il faut tuer ici le soupçon et la peur. »

Cinq premières strophes du chant III de *l'Enfer* de Dante

A- Comprendre et utiliser ses propriétés

1- Les propriétés de l'environnement souterrain

Imaginons la surface du sol comme une frontière. Selon si on se trouve au-dessus de cette ligne ou en dessous, le monde n'est pas le même. En effet, le monde de la surface est composé majoritairement d'air tandis que celui du sous-sol est fait de terre, de roche et d'eau. Si on creuse cette frontière, on amène de l'air en sous-sol et par substitution, de la roche en surface. Le sous-sol devient ainsi vivable pour l'homme qui peut y respirer et s'y mouvoir. Pourtant ce volume souterrain excavé conserve quelques-unes de ces propriétés qu'il est bon de connaître avant d'y concevoir un espace.

La première est la constance de sa température. En effet, le sous-sol a une amplitude de température très faible par rapport à la surface car la terre dispose d'une inertie thermique forte. Sa température dépend de l'ensoleillement, des températures en surface mais aussi des précipitations et du type de roche. Elle est la plupart du temps admise autour de 10-12°C à cinq mètres de profondeur et entre 8 et 20°C à un mètre sous la surface sous nos latitudes¹. Ensuite, le sol gagnerait en général un degré tous les 33 mètres de profondeur à partir de 30 mètres². Un volume souterrain excavé a donc une température plus constante de par sa proximité avec la roche terrestre tout autour. Par ailleurs, les ambiances y sont plates. La température est la même, la luminosité aussi. Elle est inexistante dans les espaces clos et si nous ajoutons de la lumière artificielle, celle-ci sera également constante. Ainsi, le moment de la journée et de l'année ne changeront pas l'ambiance de cet espace. Seule une ouverture sur l'extérieur affectera sa luminosité et sa température. L'humidité y est aussi plus importante qu'en surface due au suintement de la roche et l'acoustique est différente. En effet, la plupart des roches n'absorbe pas le son mais le propage provoquant des résonances. Cela peut perturber les utilisateurs en les rendant confus sur la provenance d'une source de bruit (bruit de pas, voix, claquement de porte). Enfin, le comportement face aux séismes est un peu particulier. Beaucoup de

¹ Latitude Nord 40-50°.

² Edouard Utudjian, *Que sais-je, L'urbanisme souterrain*.

personnes s'accordent pour dire qu'un édifice souterrain résiste souvent mieux aux activités sismiques mais ce propos ne peut pas être généralisé. Comme toujours, cela dépend du lieu, du sol et de la forme de l'édifice. Un édifice souterrain résiste en effet mieux à un séisme car sa structure est appuyée sur les côtés par la roche en présence. Il peut donc difficilement rentrer en résonance vibratoire et se rompre. Toutefois, il faut prendre garde à ne pas s'installer sur des lignes de changement de terrain qui entraîne des cisaillements importants en cas de séisme. En effet, les ondes se propagent à différentes vitesses selon la roche et des décalages temporels se créent. Ce décalage peut endommager gravement la structure d'un édifice souterrain. C'est le même principe lorsqu'un bâtiment est implanté dans une faille active dans une région à forte sismicité. Afin d'augmenter la résistance sismique d'une structure il est bon d'éviter les changements d'angles trop rapides. Une évolution du rayon de courbure progressive est à privilégier. C'est pourquoi les tunnels à section cylindrique sont les plus à même de résister à un séisme.

Par ailleurs, un édifice souterrain peut se protéger des événements en surface. En cas de phénomènes climatiques destructeurs tel qu'un ouragan, une tempête de sable ou un violent orage, celui-ci n'est pas affecté. C'est la même chose en cas d'attaque humaine, par exemple un bombardement ou une bombe nucléaire. Cela présuppose bien sûr que le système de ventilation soit fermé et indépendant de l'extérieur afin d'éviter toute contamination de l'extérieur. Ceci était la faiblesse de la cité turque Derinkuyu³. Les ennemis de la cité enfouie ne pouvaient pas rentrer à l'intérieur mais ils sont parvenus à contaminer son air en utilisant les cheminées d'aération qui n'étaient pas pensées pour résister à ce genre d'attaques. Si le bâtiment en question se prévaut de ces faiblesses, il peut abriter et protéger les personnes en danger. La ventilation souterraine peut se faire par simple appel d'air entre les différentes salles et la surface, appel d'air généré naturellement par la différence de température entre celle de l'air extérieur et celle du souterrain. Cet apport d'air par les conduits de ventilation peut également générer une faible surpression dans le souterrain, suffisante pour mettre ses occupants à l'abri des tentatives d'enfumage de l'attaquant.

³ Voir Atlas p 30.

Mais l'édifice se protège aussi lui-même. Effectivement, un ouvrage souterrain a moins de surface au contact de l'extérieur : juste un toit en surface voire rien du tout s'il est totalement enterré. Son enveloppe s'altère moins vite et nécessite moins d'entretien. Il y a donc un gain d'énergie sur le long terme. Certes, le coût de la ventilation de l'air est plus important sans fenêtre sur l'extérieur si celle-ci est mécanique mais elle revient à un prix négligeable. Ainsi, une usine suédoise ayant enterré ses activités a réussi à devenir plus rentable et compétitive que ces concurrentes grâce à des économies réalisées, notamment sur les frais d'entretien du bâtiment.

2- Avantage du souterrain en climat extrême.

En utilisant les propriétés thermiques, acoustiques, sismiques des espaces souterrains et sa capacité à nous protéger, il est possible d'inventer une nouvelle architecture, une architecture qui est plus durable. Comme nous l'avons vu précédemment, la température y est constante. On peut donc réaliser de grandes économies de chauffage en utilisant cette propriété notamment dans les régions du globe aux températures les plus extrêmes. Prenons l'exemple de deux villes européennes : Séville et Helsinki. La première bénéficie d'un climat méditerranéen avec des pics de chaleur l'été tandis que la deuxième dispose d'un climat continental avec des hivers polaires. En Finlande, les amplitudes de température y sont importantes : la température minimale ayant été enregistrée dans la capitale est de -35°C et la maximale de 33°C soit une amplitude de 68°C . L'hiver, la moyenne des températures minimales est de -6 degrés. Ainsi, pour chauffer un volume à une température confortable de 20 degrés, il faudrait en moyenne augmenter en hiver la température de 26 degrés en chauffage ce qui provoque des coûts de chauffage exorbitants. Par ailleurs, les écarts de température annuels ne sont pas sans conséquence sur un édifice en surface. En effet, l'alternance de froid et de chaleur extrême est préjudiciable aux installations extérieures qui nécessitent plus d'entretien comme les revêtements de murs, les réseaux de tuyauterie, les installations électriques... Par comparaison,

⁴ Edouard Utudjian, *Architecture et urbanisme souterrain*.

un ouvrage en souterrain serait dans ce cas beaucoup plus économique et écologique. Il serait soumis à moins de déperditions dans le cas où ses murs périphériques ne sont pas en contact avec l'air et nécessiterait donc moins de chauffage. De même, avec un sol à 10°C, il suffirait d'augmenter la température seulement d'environ 10°C pour atteindre une température confortable de 20 degrés. De cette manière, des économies d'énergie sont réalisées. Il peut dans ce cas être souhaitable d'implanter des activités humaines en souterrain voire de l'habitat si celui-ci est ouvert sur l'extérieur. On peut faire le même constat pour la ville de Séville : une amplitude de 54°C entre les températures minimales et maximales (-3°C en hiver et 51°C en été) et une moyenne de 33.5°C pour les températures maximales estivales. Les fortes chaleurs de l'été aboutissent à un vieillissement prématuré des éléments extérieurs exposés au rayonnement solaire. De même, pour obtenir la température de confort de 20°C, il serait nécessaire de faire baisser la température de 13°C en climatisation. Dans le cas d'un édifice enterré ou semi-enterré⁵, les besoins de climatisation seraient beaucoup moins importants voire inutiles si l'édifice est bien conçu puisque qu'on peut utiliser l'inertie de la terre pour conserver la fraîcheur à l'intérieur.

Séville et Helsinki sont des villes au climat extrême, mais ce sont loin d'être les pires. Les villes subissant un climat aride chaud, tropical ou polaire peuvent tirer encore plus d'avantage des édifices souterrains. C'est pourquoi on trouve depuis des siècles de l'architecture vernaculaire de ce type dans certaines régions⁶. C'est un des avantages incontestables de l'architecture souterraine. Les architectes doivent s'en servir pour réguler les températures intérieures afin de réduire les dépenses d'énergie mais aussi améliorer le confort de ses usagers. C'est ce que cherchent justement les utilisateurs du RESO à Montréal : du confort thermique. L'immense ville intérieure de la métropole québécoise met en connexion la surface avec le métro et se compose en grande majorité de centres commerciaux. Le principal avantage est qu'elle protège des blizzards de l'hiver. On peut parcourir tout le centre-ville sans sortir puisque la ville intérieure est reliée aux bâtiments en surface et au métro. Un habitant

⁵ On considère un édifice enterré, un édifice souterrain recouvert d'au moins un mètre de terre et un édifice semi-enterré, un édifice dont la partie supérieure est en contact direct avec la surface.

⁶ Voir Atlas p 28-29.

de cette ville nous témoignait : «Le plus pratique c'est que tu restes au chaud. A partir du moment où tu entres dans le métro, tu peux faire tes courses sans sortir. »

TEMPERATURES °C	MOYENNE		MINIMALE	MAXIMALE
	HIVER	ÉTÉ		
SEVILLE	7,5	33,5 (-13,5)	-3	51 (-31)
HELSINKI	-6 (+26)	20	-35 (+55)	33
SOL	≈10 (+10)	≈10	≈10	≈10

7,5: Température mesurée en degrés Celsius

(-13,5) : Différentiel par rapport à 20 degrés

Source : Infoclimat.fr – Climatologie sur la période 1981-2010

Dans une optique de transition écologique, l'amélioration du bâti est primordiale. Effectivement, avec le changement climatique, les températures se réchauffent et nos comportements doivent se modifier selon les risques climatologiques. Nos sociétés et notre économie se doivent d'être résilientes afin de résister aux perturbations et de surmonter les chocs. Pour cela, on divise en général les mesures selon deux catégories : l'adaptation et l'atténuation. Une adaptation au risque est possible grâce à « une action qui permet de limiter les impacts négatifs du changement climatique et maximiser les effets bénéfiques ». « L'atténuation correspond à toutes les activités qui contribuent à la stabilisation des concentrations des Gaz à effets de serre (GES) dans l'atmosphère »⁷. Le premier levier est de réduire et limiter les émissions de GES. Hors, comme nous l'avons vu précédemment, les espaces souterrains conçus dans cette optique peuvent largement atténuer les émissions de GES et être un bon outil pour adapter nos comportements aux crises à venir. En effet, d'ici à 2050, on prévoit en France 90 jours de canicules tous les ans et on estime qu'en continuant avec cette tendance, 30% du bâti sera équipé de climatisation contre 4% aujourd'hui⁸. Cela ferait exploser nos

⁷ Définition de l'ADEME.

⁸ Données du ministère de la Transition écologique et solidaire.

besoins en électricité et par conséquent les rejets de CO₂. Toutefois, installer des activités en souterrain nécessite dans la plupart des sols de construire en ciment ou en béton la coque périphérique qui sépare la roche de l'espace excavé. La fabrication de ce matériel rejette du CO₂. Il faut donc trouver un juste milieu afin de ne pas aggraver le phénomène en voulant l'atténuer. Selon les estimations du projet Deep City, sur le long terme, l'énergie grise engendrée par la construction en ciment disparaîtrait par les économies d'énergie, d'entretien.

3- Le contrôle des ambiances : pour une architecture souterraine

Les édifices souterrains sont soumis à des propriétés particulières qui diffèrent de la surface. On peut les utiliser pour faire des économies d'énergie et obtenir un meilleur confort thermique mais on peut aussi exploiter ces caractéristiques pour imaginer des espaces plus vivables. En effet, l'architecture souterraine n'est pas forcément sombre et désagréable. La transition socio-écologique passe aussi par-là : savoir concevoir des bâtiments agréables pour la société, imaginer en conscience afin d'éviter les erreurs, le gaspillage pour créer un bâtiment plus respectueux de l'environnement. La mission des architectes est d'en prendre conscience et d'imaginer la mise en œuvre de ces espaces qui est un peu différente d'un bâtiment classique en surface. Bruno Barroca écrit : *« l'architecture souterraine ne dessine plus des formes mais dessine l'espace au service duquel sont conçues les parois. Au-dessus du sol, l'architecture s'attache généralement à construire des figures identifiables et communicables, reconnaissables, composées de façade qui en sont les affiches »*⁹. En souterrain, pas besoin de travailler les façades ni les ouvertures latérales, elles n'existent pas. Cependant, un travail important doit être fait sur le passage entre surface et sous-sol, entre volume clos et volume ouvert sur l'extérieur. De même, toute l'attention est portée sur l'intérieur, on ne parle plus « d'objets » mais « d'espaces » puisque *« les espaces souterrains n'ont pas de compte à rendre vers l'extérieur »*¹⁰. Etant dans un volume clos, l'architecte est libre d'imaginer les ambiances qu'il souhaite selon les besoins des usagers. Lumière, forme des volumes, tous les effets sont permis ce qui peut parfois aboutir à des réalisations fantasques.

⁹ Bruno Barroca, *Penser la ville et agir par le souterrain*, Préface.

¹⁰ Michel Mallet, *20 000 lieux sous les terres*.

Dans les années 70, Jay Swayze, un entrepreneur américain met au point un modèle de maison souterraine capable de protéger ses habitants en cas d'attaque nucléaire, sujet très présent dans les médias de l'époque. Cette maison dispose d'un coffre étanche, appelé «*bateau en bouteille*», en béton armé et recouvert de 75 à 90 cm de terre. Les deux objectifs sont clairs : protection des biens et des personnes et température constante toute l'année à l'intérieur. Il souligne les avantages de vivre sous terre que sont : la température constante, la protection face aux forces de la nature et humaines, un environnement sain car entièrement contrôlé et diminution des coûts des ressources. Dans sa brochure, il écrit qu'habiter cette maison «*permet de vivre en harmonie avec la nature* » et qu'étant «*économiques, sûrs et sains* » elle permet de garder l'avantage des deux mondes. En effet, le design intérieur est imaginé afin de permettre le contrôle total de son environnement, notamment de la lumière. De fausses fenêtres donnent sur des faux paysages qu'on peut choisir. On peut modifier à souhait la saison et donne comme exemple qu'il est possible de se lever le matin à Manhattan et se coucher le soir avec le soleil au-dessus du Pacifique. Des espaces extérieurs sont intériorisés : une terrasse à l'orée des bois, composé de faux arbres qui font office de cheminée vers l'extérieur pour renouveler l'air, est imaginée. Selon lui, trois choses majeures sont à prendre en compte pendant la construction : la structure du cuvelage, l'étanchéité et le système d'aération. Si ces trois critères sont bien réalisés, la maison sera construite pour 1000 ans et dès lors, on pourra y habiter pendant un long séjour malgré une isolation sensorielle. Cette brochure vend les mérites de ce type d'habitat et plusieurs dizaines seront réalisées. Cette brochure a été réédité en 2012 avec une introduction de Nikola Jankovic qui s'intitule : «*Enterrés vivants ou la vie sous un nuage* ». Nikola Jankovic est assez critique sur le modèle de vie que nous vend Jay Swayze. Il le compare à celui d'une série américaine ou à Las Vegas, dans un monde fermé de l'extérieur où tout le monde serait heureux. Il ne croit pas en l'adage «*Pour vivre heureux, vivons cachés* ».

Par ailleurs, l'architecture souterraine ne peut être une imitation de l'architecture de surface, les ambiances y sont différentes, la lumière mais aussi la structure. Antoni Gaudi par exemple à Barcelone tire parti des poussées latérales de la terre pour concevoir une structure capable de

reprendre ces charges en imaginant une voûte qui prend la forme des lignes de forces. La forme finale est différente, unique et parfaitement adapté au sous-sol¹¹. Les matériaux utilisés sont également choisis avec volonté. Il utilise des matériaux rustres : la pierre ou le béton. Dans tous les cas, les voûtes et formes circulaires sont optimales car les efforts sont répartis uniformément et répondent aux poussées latérales. Elles ne présentent pas d'angles ni de points faibles. Selon Aurelio Mutoni, « *la forme de l'ensemble doit impérativement tendre vers un profil ovoïde voire circulaire. Ce sont les seules géométries aptes à générer une rigidité adéquate.* »¹². La raison principale est que si les poussées régnant au-dessus et au-dessous varient fortement à de faibles profondeurs, elles s'équilibrent très vite à grande profondeur. C'est pourquoi la grande majorité des tunnels ont une forme annulaire. L'architecte doit donc trouver l'espace entre ces contraintes pour concevoir des espaces souterrains qui, soient cohérents structurellement, et qui soient agréables pour l'utilisateur sans tenter d'appliquer la même méthode qu'en surface. Surtout que l'architecture souterraine est l'occasion de s'affranchir des règles de la surface et d'inventer une architecture plus radicale qui assume son caractère souterrain. Les métros peuvent être cités en exemple dans ce cas. Ces lieux ont été imaginés avec une esthétique particulière. Chaque ville disposant de son métro veut développer aussi le style de celui-ci, lui donner une image, une identité. Et ceci n'est pas nouveau. En 1927, Steen Eiler Rasmussen, un architecte danois, vient en visite à Londres. Il est impressionné par la modernité des espaces du métro Underground de la capitale britannique. Voici ce qu'il écrit dans son récit *The unique city* : « *J'espérais trouver de l'architecture moderne à Londres. Je n'ai trouvé d'intéressant que le travail de Monsieur Lutyens qui n'est pas un moderne. La seule vraie construction moderne que j'ai trouvée est l'Underground, qui n'est même pas de l'architecture à proprement parlé si on le considère dans son ensemble. Mais ceci est plus important que tout le travail de Lutyens et des autres architectes britanniques réunis. C'est aussi très bien géré. Quand il pleut, des affiches apparaissent très rapidement disant " si vous voulez échapper à la pluie, prenez l'Underground ». Si vous voulez échapper au chaos de l'architecture londonnienne, prenez le métro aussi". Notre capacité*

¹¹ Voir Atlas p 46.

¹² Aurelio Mutoni, *20 000 lieux sous les terres*.

à contrôler les ambiances des espaces souterrains passent donc par la maîtrise de la répartition des espaces, de la structure. Elle sert à créer des ouvrages souterrains agréables, identifiables et par conséquent plus durables. En effet, la connaissance du souterrain et de ses propriétés évite les conceptions hasardeuses, le gaspillage de ressources et les erreurs irréparables.

4- Eclairer un espace souterrain : La maîtrise de la lumière

Le dernier élément architectural dont le bon contrôle est primordial dans les espaces souterrains est la lumière. C'est elle qui dessine les volumes, qui crée une atmosphère particulière et qui peut donner une nouvelle image aux espaces souterrains. Nous allons voir dans les paragraphes qui suivent les outils mathématiques et techniques dont l'homme dispose pour contrôler au mieux la luminosité des espaces enterrés.

Pour pouvoir être en mesure de maîtriser la pénétration de la lumière, il faut utiliser son langage. Il existe différents outils mathématiques qui permettent de quantifier cette lumière ainsi que son comportement dans différents espaces. Le premier outil est le calcul de la luminance extérieure qui se traduit en lux et celui de la luminance intérieure, toujours en lux. Il est aussi primordial de connaître le taux de transmissivité de la paroi transparente par laquelle la lumière passe s'il y en a une ainsi que son taux de réflectivité, qui se traduisent en pourcentage. On peut ainsi faire son choix dans les types d'ouvertures pour maximiser ou minimiser la pénétration de lumière à l'intérieur. Le facteur de lumière du jour, quant à lui, sert à apprécier l'enfermement ou l'ouverture d'un espace sur l'extérieur. Ce facteur est le rapport entre l'éclairement naturel reçu en un point et l'éclairement naturel à ciel dégagé et ouvert. Ainsi plus le pourcentage est élevé, plus l'impression de clarté est forte et à l'inverse, un pourcentage bas signifiera une atmosphère sombre. Les valeurs oscillent en général entre 1 et 12%. A partir de ce résultat, on peut savoir la quantité de lumière artificielle qu'il est nécessaire d'« ajouter » pour obtenir une luminosité suffisante. Enfin, un outil à ne pas négliger est le ratio d'éclairage. Celui-ci calcule la différence de luminance entre le point le plus sombre et le point plus lumineux d'un volume. C'est un

indicateur d'éblouissement. Une différence trop importante sur une petite surface pourrait gêner l'utilisateur. Ces résultats s'obtiennent à partir de relevé mais peuvent bien sûr être anticipés et calculés via des logiciels spécialisés.

Il existe par ailleurs de nombreux procédés qui permettent de faire pénétrer toujours plus de lumière naturelle à l'intérieur. Antoni Gaudí utilisait par exemple le carrelage sur les murs des cours intérieures des résidences notamment la casa Mila à Barcelone. Le carrelage a pour avantage de réfléchir plus de lumière quand les rayons arrivent avec un faible angle sur sa surface. La lumière pénètre plus profondément dans la cour et par conséquent dans les logements. Le marbre a la même propriété. Dans les carrières de Carrare, la lumière pénètre profondément dans les galeries souterraines, reflétée par la blancheur du marbre. Durant l'Égypte Antique, des tubes de granit étaient polis afin de refléter les rayons solaires et faire pénétrer la lumière jusqu'à l'intérieur des pyramides. Le béton translucide est aussi un matériau intéressant lorsqu'on souhaite une faible lumière naturelle mais toutefois diffuse ou si on veut accompagner petit à petit un changement de luminosité, solution qui a été choisie pour le Tunnel Jenner au Havre¹³. Il existe sinon d'autres outils plus sophistiqués qui font appel au domaine de l'optique. La lentille Fresnel, utilisée au sommet des phares pour émettre une lumière forte vers le large, concentre les rayons lumineux en un point avant de la diffracter. Elle peut ainsi servir à éclairer mais aussi à chauffer. Les prismes jouent le même rôle. Par jeu de réflexion, il est possible de diriger la lumière, notamment en profondeur. C'est un procédé qu'avait proposé Dominique Perrault pour le concours du centre culturel de St Jacques de Compostelle afin de faire entrer la lumière dans le bâtiment qui se développait sous une colline. Le système Arthel est une combinaison des deux précédents outils. Inventé au XIX^{ème} siècle par Monsieur Arthel mais jamais réellement utilisé. Le système capture les rayons solaires qu'il reflète par un jeu de miroirs et de lentilles dans les profondeurs du sol. Guy Rottier croyait en ce système pour amener une lumière naturelle en profondeur de sa cité souterraine Ecopolis¹⁴. Il imaginait de grands capteurs solaires en surface qui concentraient les rayons lumineux en un point avant de les diffracter en profondeur à l'aide de lumiducs. C'était

¹³ Voir Atlas p 41.

¹⁴ Voir Atlas p 72-73.

selon lui, l'ultime invention de l'Homme permettant à nos sociétés de s'enterrer sous la surface.

Le potentiel de ces techniques est notable. Une lumière naturelle importante dans les espaces souterrains améliorerait l'acceptabilité de ces espaces par les gens et rendrait possible l'implantation d'activités nécessitant une lumière importante. Par ailleurs, une lumière naturelle importante diminue les besoins en lumière artificielle, un enjeu important dans nos villes pour réduire les besoins en énergie. Un projet à New-York propose même de cultiver des plantes en sous-sol pour étendre notre surface de production agricole aux villes. C'est un des objectifs du projet de Low Line à New York¹⁵.

La Low Line est un concept en développement qui se réfère au succès de la High Line, parc urbain qui prend place sur une ancienne voie de chemin de fer surélevée et qui traverse l'île de Manhattan. La Low Line se voudrait être un parc urbain mais en souterrain où on peut se balader au frais et cultiver des plantes agricoles. James Ramsey part du postulat que la lumière est source de toute vie et que si on veut apporter la vie en souterrain, il faut réussir à y apporter de la lumière. L'intérêt selon lui d'aménager un parc souterrain est de disposer d'un havre de paix à l'abri des températures toujours plus hautes dans les villes. Pour cela, il met au point un système pour «cultiver la lumière», la «rendre liquide» et la transférer jusqu'à 800 mètres de profondeur. L'avantage est que cette lumière arrive à l'intérieur avec des rayons parallèles qui ne contiennent pas d'infrarouge et qui donc n'émettent pas de chaleur supplémentaire. James Ramsey soutient qu'il est possible d'y cultiver des plantes et qu'on peut utiliser la lumière captée supplémentaire pour fabriquer de l'énergie et faire fonctionner la ventilation. Le système s'appelle Tracking Mirror, il capte la lumière et l'envoie par réflexion vers des concentrateurs de forme parabolique. Chaque parabole concentre l'équivalent de 30 fois la lumière du soleil. Les rayons sont dirigés vers l'espace souterrain par des tubes de polycarbonates avant d'être diffusés dans le sous-sol qui devient baigné de lumière.

Mais quels sont nos besoins de lumière en fait ? Des études démontrent que si une personne est statique, assise à un bureau par exemple, la

¹⁵ Voir Atlas p 47.

lumière totale doit être comprise entre 150 et 300 lux avec une composition spectrale et une intensité semblable à de la lumière naturelle. En cas de mouvement, la lumière doit varier afin de faire travailler l'adaptation de la vision. Il est important d'éviter les éblouissements ainsi que les ombres portées pour réduire la fatigue visuelle et le sentiment d'aversion pour un espace. Enfin, il est utile pour des questions de santé que la lumière émette des radiations invisibles telles que les ultraviolets. Il est pour cela nécessaire d'avoir une source lumineuse naturelle et d'appliquer sur les murs des peintures spéciales qui réfléchissent les rayons UV sans les absorber comme les peintures ordinaires. Comme nous l'avons vu avec les techniques précédentes, il est possible d'obtenir ces résultats dans un espace souterrain. Mais ces données d'ordre scientifique et psychologique sont aussi culturelles.

Si nous prenons la culture orientale par exemple, japonaise notamment, leur rapport à la lumière n'est pas le même. La pénombre voire l'obscurité ne les perturbe pas, il la cultive presque. Junichiro Tanizaki a écrit le livre *Eloge de l'ombre*. Il y défend une esthétique de la pénombre en réaction à l'esthétique occidentale où tout est éclairé et transparent. Il définit le principe du *Tokonoma* ou clair-obscur. Il décrit les espaces de la maison traditionnelle japonaise où le soleil est absent à l'intérieur de certains espaces. Seule une lumière indirecte et lointaine parvient jusqu'aux recoins sombres de ces espaces. Selon lui, l'ombre crée de l'épaisseur dans un espace vide et a une qualité supérieure à une fresque. L'ombre habille le vide tandis que dans un espace éclairé, il serait nécessaire d'habiller cette clarté par quelques objets et mobiliers. De même, en faisant naître des ombres, on crée de la beauté. Le beau est un dessin d'ombres. Il donne pour cela l'image d'une pierre phosphorescente qui perdrait toute sa valeur en pleine lumière. Pour apporter plus de lumière dans un espace sombre, Junichiro Tanizaki apprécie deux techniques : l'or et la lampe à pétrole. La lampe à pétrole dispose d'un éclairage irrégulier presque incertain. Les traits de l'environnement perdent en dureté, les reflets sont estompés et confèrent à un lieu une esthétique particulière. L'or, quant à lui, est visible dans les lieux sombres, il éclaire la pénombre intérieure par son teint et son éclat sans rien perdre de sa brillance. Dominique Perrault a utilisé la couleur dorée pour l'extension du pavillon Dufour à Versailles¹⁶. Cette couleur rappelle bien sûr les

¹⁶ Voir Atlas p 80-81.

dorures des menuiseries et le faste du château mais permet aussi à la lumière de plus pénétrer dans les colonnes de verre qu'il a imaginées. Il explique cette différence entre les deux cultures par le fait que le japonais se contente de sa condition, de ses limites et apprend à apprécier la pénombre alors qu'un occidental, toujours à l'affût du progrès, recherche une clarté toujours plus vive et nette. Il analyse qu'aujourd'hui, cette culture occidentale s'est insinuée dans la société japonaise et que la clarté à tout prix a fini par devenir la norme au point d'être identifié comme quelque chose de très japonais de nos jours.

Mais l'intérêt pour la pénombre n'est pas l'apanage de l'orient. Dans la littérature, Jules Verne écrivait au XIXème siècle la magnificence des sous-sols sombres. Voici un extrait de son livre Les Indes noires :

« Je pensais seulement que les ténèbres sont belles aussi. Si tu savais tout ce qu'y voient des yeux habitués à la profondeur ! Il y a des ombres qui passent et qu'on aimerait suivre dans leur vol ! Parfois ce sont des cercles qui s'entrecroisent devant le regard et dont on ne voudrait plus sortir !... Vois-tu Harry, il faut avoir vécu là pour comprendre ce que je ressens, ce que je ne puis t'exprimer ! ».

Il écrit ici que la pénombre est quelque chose qu'on apprend à aimer, à découvrir. De la même manière, l'architecte Louis Kahn fait l'éloge des espaces sombres, espaces qui nécessitent tout de même un peu de lumière pour être perceptible :

« Même un espace obscur devrait recevoir un peu de lumière provenant d'une ouverture mystérieuse, juste assez de lumière pour pouvoir nous dire combien il est vraiment obscur »

Louis Kahn, *Form and design*, 1960

Ainsi, s'il est possible d'apporter une lumière assez intense en souterrain pour y implanter des activités toujours plus diverses et ceci sans consommer plus d'électricité, l'Homme peut aussi apprendre à apprécier une lumière plus discrète. L'ombre contient une beauté qu'il ne faut pas oublier et qui peut trouver toute sa profondeur dans des espaces souterrains.

Enfin, la pénétration de la lumière en profondeur peut servir à d'autres desseins. En imaginant des percées dans le sol comme des puits qui distribuent la lumière à travers les différents étages d'un sous-sol, on pourrait combiner ce procédé à un système de ventilation naturelle. Ces grandes cheminées extrairaient l'air vers l'extérieur et comme une tour à vent, renouvèlerait l'air, un air plus propre et à bonne température. Pierre von Meiss met en avant d'autres avantages à un tel procédé. Un puits de lumière en plus d'apporter éclairage et de ventiler, donne une ouverture sur le ciel et sert de relation entre le dessus et le dessous. Les personnes se trouvant dans les profondeurs peuvent mieux s'orienter en donnant à voir la surface et ceux au-dessus peuvent voir impunément ce qui se passe quelques mètres plus bas, sentiment positif chez la plupart des personnes, voir et observer sans être remarqué.

La lumière est donc bien plus qu'un simple éclairage surtout en sous-sol. C'est un réel matériau de construction, un sculpteur d'espace mais aussi une philosophie et qui permet d'imaginer des espaces cohérents et durables dans un environnement souterrain. La lumière ne sera jamais aussi éclatante qu'un bâtiment en surface mais parfois seule une lumière artificielle peut être tolérée.

B- Des usages adaptés au souterrain

1- L'omniprésence de la lumière artificielle

La lumière artificielle est dans certains cas préférable voire nécessaire pour certaines activités ou selon la latitude. Prenons par exemple un supermarché. Ces édifices sont toujours cloîtrés avec très peu d'ouvertures, entièrement et généreusement éclairé de lumière artificielle. C'est la même chose pour les usines de papier parfois textiles et les archives, où la présence de lumière naturelle altérerait les produits manufacturés ou abîmerait le stockage de données. Ainsi, si nous construisons un édifice clos éclairé à l'intérieur uniquement par des lampes électriques, autant implanter cet édifice en souterrain. Il y a, à la fin, un gain de place et au vu de l'esthétique architecturale donnée en général aux usines de ce type, on évite un énième cube de tôle dans le paysage périurbain. On peut appliquer la même logique dans les régions les plus sep-

tentrionales et méridionales du globe. Quand on analyse l'éphéméride de ces régions, on s'aperçoit que dans tous les cas, l'éclairage artificiel est utilisé une grande partie des journées d'hiver. Reprenons l'exemple d'Helsinki, qui est loin d'être la ville la plus au nord de la planète. Au solstice d'hiver, l'aube s'effectue à 9h23 et le crépuscule à 15h12 soit 05h50 de jour. Pendant une journée de travail, on peut donc espérer éteindre la lumière au mieux pendant 5 heures et encore, le soleil à cette saison en cet endroit est si bas que la luminosité est rarement satisfaisante. Le moindre nuage a pour conséquence un assombrissement des espaces intérieurs. Ainsi, il devient intéressant d'avoir des espaces souterrains dans ces latitudes car ils seront éclairés au même titre que des espaces en surface mais sans grignoter plus d'espace et à l'abri des hivers rigoureux. Ces espaces en sous-sols sont très utiles pour une ville car, correctement chauffés, ils permettent une continuité des activités socioculturelles, économiques et commerciales quel que soit la saison et le temps, à l'image de la ville intérieure de Montréal.

Par ailleurs, il arrive que certains espaces ne puissent exister que dans l'obscurité. Ce sont les cas des salles de théâtre et de cinéma par exemple. On parle aussi aujourd'hui de fabrication dans le noir ou de l'anglicisme *lights-out manufacturing*. Il s'agit d'usines qui, ne disposant plus d'ouvriers car ayant automatisé et robotisé toute leur chaîne de production, n'ont plus besoin d'éclairer leurs espaces de fabrication, ce qui mène bien sûr à des économies d'électricité avantageuses et qui pourraient être couplé avec une implantation en sous-sol. De cette manière, l'espace souterrain offre un potentiel non négligeable à ces types d'usages et sous certaines latitudes.

2- Des espaces pour protéger les populations

Par ailleurs, les espaces souterrains peuvent être conçus avec un usage bivalent. En effet, comme nous l'expliquions précédemment, un édifice souterrain a pour avantage de protéger les populations face aux phénomènes climatiques extrêmes et aux bombardements. Au lieu de construire des abris spéciaux dans lequel la population se réfugie en cas de risques, il est possible d'imaginer que les espaces souterrains déjà construits disposent d'un deuxième usage destiné à la protection.

Par exemple, les métros de Londres sont devenus pendant les bombardements de 1940, un abri pour près de 177 000 personnes même s'ils n'étaient pas destinés à cela initialement¹⁷. Par contre, en Suède, le parking situé sous la colline de Mosenback à Stockholm¹⁸ assume complètement ce double usage, il a été conçu pour cela. Quotidiennement, c'est un parking d'une capacité de 500 voitures mais en cas d'alerte, il peut devenir un abri potentiel pour 30 000 personnes.

3) Les effets psychologiques et sociaux de la vie en sous-sol

De nombreux usages sont possibles et acceptables en profondeur mais le séjour prolongé d'une personne dans des espaces clos n'est pas sans conséquence. Il faut prendre garde à ne pas abuser de ces espaces tout comme il est primordial de concevoir des volumes qui respectent la santé de ses usagers.

Premièrement, le séjour prolongé et à répétition d'une personne en sous-sol peut avoir des conséquences sur sa santé physique et mentale. Michel Siffre en a fait l'expérience et en fait le récit dans son livre *«Hors du temps»*. Il est resté deux mois dans le fond d'un gouffre en Italie sans disposer d'aucune notion du temps. Le manque de lumière et la forte humidité ainsi que le manque d'activité physique ont eu des effets directs sur son corps : atrophie de la vision, dépigmentation de la peau, affaiblissement du nombre de globules rouges et affaiblissement de la puissance musculaire.

On le voit bien quand on observe les morphologies des animaux cavernicoles¹⁹, ceux-ci ont une hypertrophie des organes tactiles et à l'inverse une atrophie des organes visuels ainsi qu'une peau décolorée voire translucide tout comme leurs yeux et leurs poils. On peut nommer comme exemple les troglodactyles, les troglodactyles et les troglodactyles.

Par ailleurs, le souterrain souffre d'une mauvaise acceptabilité sociale. Le souterrain a une aura négative même s'il est parfois vu comme positif

¹⁷ Voir Atlas p 33.

¹⁸ Voir Atlas p 32.

¹⁹ Etres-vivants ne pouvant vivre qu'en milieu souterrain.

par de rares intellectuels. Nous pouvons citer Michel Malet qui écrit ces lignes :

« Qui n'a gardé en lui le souvenir d'une cave d'un souterrain, à l'odeur particulière, à la lumière à peine suffisante, aux bruits presque étouffés ? Celui-là, sans le savoir peut-être a été touché par la magie du souterrain. »

Toutefois, il y a une réelle différence sémantique entre les termes terre et sous-terre. Le premier renvoie à la terre nourricière, terre protectrice, terre natale alors que le second inspire plutôt l'enfer, la mort ou des parkings à l'ambiance glauque. Il y a donc un vrai travail à faire pour améliorer cette acceptabilité. Par exemple, la ville intérieure de Montréal est utilisée par près de 183 millions de personnes chaque année mais c'est bien parce qu'il fait -30 degrés dehors que cela a autant de succès. En saison estivale, les personnes ne traversent cet endroit que pour rejoindre le métro ou pour entrer dans un magasin précis. Comme le dit l'utilisateur interrogé : *« Quand je peux, je passe par dehors. Car quand tu passes dans ces couloirs, tu as l'impression d'être enfermé, car ça reste assez étroit ces souterrains du coup je ne suis pas fan. L'été tout le monde va dehors. »* Par ailleurs, cet espace n'a pas été conçu dans son ensemble par un seul opérateur et n'a pas bénéficié d'une politique dirigée. Non, beaucoup d'opérateurs privés différents sont intervenus sans charte ni coordination ce qui a pour conséquence un manque de cohérence et donc un manque d'esthétique et de réflexion autour de l'utilisateur en lui-même. Golany résume très bien cette idée dans la phrase suivante :

« La plupart des problèmes associés au fait de vivre dans des habitats souterrains ne sont pas d'ordre technologiques mais plutôt liés au degré d'acceptabilité sociale au concept et aux perceptions spatiales des individus. »

Selon lui, il est possible d'habiter un souterrain, de nombreuses solutions architecturales existent, nous l'avons vu. Mais la société en général n'est pas encore prête à accepter cette idée. Peut-être qu'en mettant en avant l'intérêt écologique et qu'en créant des espaces publics souterrains attractifs, ces idées changeront.

Même sans vouloir habiter un espace en sous-sol, il est primordial que les espaces publics souterrains soient traités comme ceux en surface car ils sont avant tout des lieux sociaux. Des lieux sociaux qui doivent être neutres, c'est-à-dire qui ne sont pas destinés à un nombre trop restreint de la population. Ils ne doivent pas non plus devenir des lieux de relégation sociale comme dans le film *Metropolis*, ville dystopique où les ouvriers travaillent dans les profondeurs de la ville alors que les patrons vivent à l'air libre ou comme à New York connue pour abriter dans ses souterrains abandonnés plusieurs milliers de sans-abris appelés *Mole People*. La plupart des personnes qui y vivent y trouvent refuge pour fuir la violence en surface. Pour éviter toute dérive, il faut prendre garde à respecter le bien-être des usagers et à respecter leurs droits. Toute personne doit vivre dans de bonnes conditions. On parle de justice environnementale pour dire que l'accès à un environnement sain, un droit à la nature est un droit commun. En effet, on s'aperçoit que la pauvreté économique et matérielle des familles défavorisées s'accompagne souvent d'une pauvreté environnementale, c'est-à-dire un lieu de vie ou des conditions de travail qui les expose à des émissions toxiques ou des risques environnementaux importants. Dans le cas d'un milieu souterrain, la discrimination environnementale pourrait plus se faire sur l'accès à la lumière, sur l'accès à la chaleur géothermique ou l'accès à la surface. Si des personnes sont amenées à travailler dans des espaces souterrains sans lumière naturelle, les conditions doivent être mises en place pour améliorer leurs conditions de travail. Il est donc nécessaire d'imaginer des lieux qui soient attractifs. Dans tous les cas, la transition écologique ne peut se faire sans solidarité et réduction des inégalités. Si on développe l'architecture souterraine avec une vision transitionnelle, la justice sociale doit être un objectif mais aussi un outil car on doit utiliser les leviers qu'elle suggère pour réduire les inégalités et pour créer une dynamique avec les services publics et les habitants.

Historiquement, les souterrains n'ont pas de portées sociales évidentes. Ces espaces ne sont pas destinés toujours au même type de population. Cela dépend de leurs destinations d'usage, de la civilisation et de l'époque. Les espaces publics souterrains par exemple tel que les centres commerciaux enterrés (Louvre à Paris, Ville intérieure à Montréal) sont destinés à une classe aisée de la population, ce sont des lieux destinés

au plaisir de la consommation et de l'achat. Les infrastructures de transport néanmoins n'ont pas de destination sociale. Toutes les couches de la société se croisent dans le métro. Enfin, les habitats en environnement souterrain ou semi-souterrain sont habités par diverses classes sociales selon leur destination d'usage. Par exemple, à New York, des milliers de sans-abris vivent dans les sous-sols de la ville pour trouver un abri et s'éloigner de la violence de la surface. A Grenade, les personnes vivant dans les Cuevas²⁰, les habitats troglodytes, sont des personnes ermites cherchant l'isolement et la tranquillité. Par ailleurs, dans les villes, beaucoup de logements insalubres sont habités par des familles défavorisées. Ces logements sont souvent situés à l'entresol d'immeubles, ils sont humides, peu lumineux et fréquemment surpeuplés. Les prix de loyer y sont plus accessibles. Au contraire, certains habitats souterrains sont construits pour des ménages aisés. Par exemple, les maisons anti-atomiques de Jay Swayze²¹, la maison Aloni en Grèce²² ou encore la Villa One²³ sont des habitats enterrés ou semi-enterrés qui se protègent des risques atomiques, de la chaleur ou cherchent à conserver le paysage existant. Dans la région du Yaodong par contre, les habitats troglodytes²⁴ n'ont aucune spécificité de classes, la plupart des maisons ont un caractère souterrain sans distinction de richesses. Seuls la taille et l'équipement diffèrent. Ainsi, comme dans la région du Yaodong, la justice sociale doit être faite dans les espaces souterrains, ils doivent être accessibles et destinés à tout type de population. Les espaces créés doivent donc être attractifs et permettre de bonnes conditions de vie.

« Lorsque le temps aura passé, que l'herbe et la mousse auront envahi l'édifice, lorsque les vents auront balayé les murs, que la tempête les aura réduits à ruine, seule restera la cave comme témoins du passé, comme représentant de la construction, comme ultime signature. Sera-t-elle digne ? »

Telam Lehcim, *Les palais de sable*

²⁰ Voir Atlas p 28.

²¹ Voir Atlas p 34-35.

²² Voir Atlas p 24-25.

²³ Voir Atlas p 75.

²⁴ Voir Atlas p 26-27.

4- Cela coûte-t-il plus cher ?

Ainsi, le recours au souterrain paraît parfois plus adapté, plus logique en terme d'usages, en terme d'écologie et en terme de rentabilité économique. Toutefois, le facteur économique de la construction souterraine effraie souvent, investir les sous-sols coûterait plus cher que construire en surface. Nous voulons bien l'admettre, la construction souterraine nécessite des phases de travaux plus nombreuses. Mais ce surcoût, de quel ordre de grandeur est-il ? En 2010, un rapport de recherche dirigé par Aurèle Parriaux étudiant les ressources du sous-sol et le développement durable des espaces urbains a comparé et rendu une estimation des coûts de construction d'un magasin édifié en surface, en souterrain dans une géologie facile et dans une géologie difficile. Les résultats sont les suivants :

- En géologie difficile, en utilisant une paroi moulée de 80cm, les coûts de construction sont 23% plus cher qu'un bâtiment en surface.
- En géologie facile, en utilisant une paroi clouée, les coûts dépassent de 10% ceux du magasin en surface.

La construction souterraine est plus cher à cause de la phase des travaux préparatoires : fouilles, blindage, fondations profonde mais sinon les coûts d'électricité, de chauffage, de matériaux et de main d'œuvre sont les mêmes. En outre, le rapport a réalisé un bilan énergétique du cycle de vie des trois bâtiments. Les trois cas sont comparables avec un léger avantage pour le bâtiment construit en géologie difficile. Au final, sur 60 ans, les coûts s'équilibrent. Le bâtiment construit en géologie difficile est plus cher de 14% et de 6% pour celui en géologie facile. En effet, il y a moins de frais d'entretien car ces derniers sont moins exposés aux agents de détérioration. Par ailleurs, n'est pas pris en compte dans cette estimation les possibilités de rentabilisation foncière en utilisant le volume disponible en surface. On peut imaginer d'édifier un nouveau bâtiment par-dessus ou alors de profiter de cet espace pour créer un parc ou des espaces publics qui apporte une plus-value sociale ou écologique au quartier. Les coûts de construction ne sont donc pas rédhibitoires, ils coûtent certes plus cher mais si on regarde sur long terme et

si on étudie d'autres facteurs que le facteur économique, la construction souterraine peut devenir intéressante. La prise de décision pour investir le sous-sol doit se faire sur d'autres critères que sont les ressources de ce sous-sol mais nous en parlerons davantage dans la troisième partie. Par ailleurs, si creuser coûte plus cher, il ne coûte rien de réinvestir les espaces déjà excavés de nos villes pour les transformer et leur donner de nouveaux usages.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

II- L'ECONOMIE DE L'ESPACE

Pendant la révolte de 1832, une des «plus grande guerre des rues qu'ait vue l'histoire», Marius est blessé. Un coup de feu lui a cassé la clavicule. Il s'évanouit, mais Jean Valjean lui sauve la vie en l'emmenant loin de la barricade où le combat fait rage. Pour échapper aux soldats, Jean Valjean trouve refuge dans les égouts de Paris, dont on disait fréquemment «descendre dans l'égout, c'est entrer dans la fosse».

Il allait devant lui, avec anxiété, mais avec calme, ne voyant rien, ne sachant rien, plongé dans le hasard, c'est-à-dire englouti dans la providence.

Par degrés, disons-le, quelque horreur le gagnait. L'ombre qui l'enveloppait entraînait dans son esprit. Il marchait dans une énigme. Cet aqueduc du cloaque est redoutable ; il s'entrecroise vertigineusement. C'est une chose lugubre d'être pris dans ce Paris de ténèbres. Jean Valjean était obligé de trouver et presque d'inventer sa route sans la voir. Dans cet inconnu, chaque pas qu'il risquait pouvait être le dernier. Comment sortirait-il de là ? Trouverait-il une issue ? La trouverait-il à temps ? Cette colossale éponge souterraine aux alvéoles de pierre se laisserait-elle pénétrer et percer ? Y rencontrerait-on quelque nœud inattendu d'obscurité ? Arriverait-on à l'inextricable et à l'infranchissable ? Marius y mourrait-il d'hémorragie, et lui de faim ? Finiraient-ils par se perdre là tous les deux, et par faire deux squelettes dans un coin de cette nuit ? Il l'ignorait. Il se demandait tout cela et ne pouvait se répondre. L'intestin de Paris est un précipice. Comme le prophète, il était dans le ventre du monstre.

[...]

Il marchait depuis une demi-heure environ, du moins au calcul qu'il faisait lui-même, et n'avait pas encore songé à se reposer ; seulement il avait changé la main qui soutenait Marius. L'obscurité était plus profonde que jamais, mais cette profondeur le rassurait.

Tout à coup il vit son ombre devant lui. Elle se découpait sur une faible rougeur presque indistincte qui empourprait vaguement le radier à ses pieds et la voûte sur sa tête, et qui glissait à sa droite et à sa gauche sur les deux murailles visqueuses du corridor. Stupéfait, il se retourna.

Derrière lui, dans la partie du couloir qu'il venait de dépasser, à une distance qui lui parut immense, flamboyait, rayant l'épaisseur obscure, une sorte d'astre horrible qui avait l'air de le regarder.

Victor Hugo, *Les Misérables*, Tome V , Livre troisième, Chapitre I

A- Réutiliser des espaces souterrains existants

1- De nombreux souterrains désaffectés en ville

Nos villes sont de véritables gruyères. Parkings souterrains, tunnels, réseaux d'eau, de gaz, d'électricité et de chauffage, le volume creusé sous nos villes est grand. Et parmi ces exemples, nombreux sont ceux qui ne sont plus utilisés. De nombreux tunnels ont été bouchés, des stations de métro fermées et des bâtiments industriels abandonnés. Le cas de la ville de Paris est tout à fait particulier. En effet, la ville repose sur un vaste réseau de galeries et de carrières. D'abord à ciel ouvert, les carrières de Paris servaient à fournir les chantiers de construction en pierre de taille. Très vite, les galeries souterraines ont été préférées afin de ne pas grignoter trop de terres agricoles. Abandonnées et non fertile, ces carrières à ciel ouvert ont eu de nombreuses utilisations par la suite : distilleries et brasseries de monastères, industries manufacturières, cour de récréation mais aussi habitats informels. Aujourd'hui, la plupart ont été comblées ou recouvertes. Les galeries quant à elles, plus connues sous le nom de catacombes, existent toujours mais sont fermées au public. Seuls deux petites zones sont visitables à des fins touristiques.

Dès le XVIIIème siècle, de nombreux effondrements sont survenus dans la capitale. La structure des galeries n'était pas surveillée et de nombreux accidents furent à déplorer. Des programmes d'entretien et de maintenance ont été menés et on commença à leur trouver de nouvelles utilisations.

Au XIXème, on réutilisa certaines zones pour en faire des abris de guerre tout comme au XXème siècle. Les catacombes furent transpercées par les constructions successives des métros de la ville. Après la seconde guerre mondiale, elles devinrent le lieu de fêtes dans les espaces les plus grands et une nouvelle discipline naquit : la cataphilie ou la passion des catacombes. Hors dès les années 80, la municipalité a commencé à bétonner ces espaces ainsi que les puits d'accès afin d'empêcher les visiteurs. Mais ceci n'est pas sans conséquence. En effet, en bloquant les accès, d'entières zones ne sont plus accessibles. On ne peut donc plus surveiller l'évolution de la structure. De plus, l'air ne circulant plus

à travers ces volumes, l'humidité s'accumule ce qui peut provoquer un effritement progressif de la roche et un effondrement.

Il serait intéressant d'adopter une réelle investigation de ces catacombes afin de mieux les connaître et comment les réutiliser. Le réseau est très important et communique avec de nombreux sous-sols de bâtiments en surface, le potentiel est grand. Parfois, les salles dépassent les sept mètres de hauteur à l'image de la salle Z. Les villes n'ont pas une histoire linéaire, de nombreuses couches se superposent, disparaissent, réapparaissent, changent de fonctions... C'est pourquoi les villes disposent souvent d'un très grand volume souterrain. Comme nous l'avons vu dans la première partie, il est possible de rendre ces espaces agréables et ils peuvent être compatibles avec de nombreux usages. Transformer la ville sur elle-même au lieu de s'étendre toujours plus, densifier ses activités est une volonté très présente dans les politiques urbaines contemporaines. Les souterrains ne doivent pas être oubliés car ils ont un rôle à jouer. Et cela, la municipalité parisienne l'a compris. En effet, pour continuer avec l'exemple parisien, la ville a lancé en 2017 le deuxième volet de son programme Réinventer Paris, celui-ci s'intitulant *les dessous de Paris*.

2- Le cas de Réinventer Paris II : les dessous de Paris

Lancé en 2017, Réinventer Paris II : les dessous de Paris est un appel à projets urbains innovants qui vise à transformer les souterrains de Paris et révéler tout leur potentiel. Au total, 34 sites ont été proposés dans Paris Intra-Muros et soumis à des concours d'idées de la part d'équipes voulues pluridisciplinaires, le programme étant libre. Voici quelques sites proposés ainsi que les lauréats sélectionnés :

1. Station de métro Palais Royal- Galerie Valois

Cette galerie souterraine de style Art Nouveau est remarquable pour sa structure métallique. Le lauréat, Fontès Architecture, a imaginé une galerie média et un restaurant à l'intérieur.

2. Parc de stationnement du Grenier St-Lazare

D'une surface de 22 000m² en sous-sol, ce parking a été choisi pour devenir un grenier partagé d'une résidence ainsi que des espaces de vie pour la vie de quartier, une conciergerie. Ce projet mené par Syvil Architecte a une visée sociale et urbaine pour le stockage de biens.

3. Tunnel Henri IV

Ce tunnel routier sur les berges de la Seine est destiné à devenir un lieu dédié au sport et à la mobilité douce en continuité du parc de Seine qui prend place le long des berges. Le projet lauréat est porté par le studio Doreli.

4. Station de métro Croix-rouge

Le projet lauréat conduit par Same Architectes est un projet de restauration et d'épicerie qui prend place dans une ancienne station de métro aujourd'hui fermée, mais qui conserve la typologie reconnaissable des stations parisiennes.

5. Esplanade des Invalides

Sous la grande esplanade des Invalides se trouve les vestiges de l'exposition universelle de 1900 ainsi qu'une aérogare d'Air France. Le concours a été remporté par Dominique Perrault. Ce site sera dédié à l'art et à l'artisanat français et composé d'une halle alimentaire ainsi que d'un musée pour enfants.

6. Espace viaire sous viaduc du métro de la ligne 6

Aujourd'hui, cet espace est un trottoir. Il n'a pas vraiment un caractère souterrain mais est considéré comme tel car cet espace est totalement recouvert par une ligne de métro aérienne. Station Block Part y a imaginé un mur d'escalade, un restaurant ainsi qu'un espace d'exposition et un lieu d'expérimentation d'agriculture urbaine.

7. Réservoir de Passy

Le réservoir de Passy est un complexe de deux bassins d'eau non potable de réserve dont un qui est couvert. Miguel Montouro & Associés et le Chai subaquatique se sont associés pour imaginer dans cet espace un lieu d'agriculture urbaine, un projet de chai subaquatique ainsi qu'une fosse de plongée.



Les propositions retenues du concours d'idées ont comme point commun de proposer de nouveaux usages à ces espaces souterrains abandonnés. Les programmes sont très divers les uns des autres, certains originaux et insolites, d'autres parfaitement adaptés pour un usage en souterrain comme le chai subaquatique et la fosse de plongée par exemple. C'est une opportunité pour densifier la ville par le dessous et d'exploiter le potentiel d'espace libre dans Paris. Toutefois, on peut déplorer qu'il n'y ait pas de lauréats qui mettent en avant des objectifs de la transition écologique. Il y a certes la réutilisation d'un espace déjà construit mais sa transformation ne s'accompagne pas d'une logique de développement durable. Enfin, on peut regretter l'absence de pensée globale de ces projets à l'échelle urbaine qui peuvent être par conséquent difficilement efficace environnementalement. Au final, ce concours vise à une rentabilisation des mètres carrés encore libre de Paris. On cherche à économiser de l'espace, à exploiter et à donner un usage à chaque endroit. La démarche est donc intéressante et novatrice et reste une opportunité pour créer des lieux souterrains attractifs mais il est dommage que l'idée de départ d'économiser de l'espace et de densifier la ville devienne en fin de compte une opportunité financière et que cet espace devienne une économie, un marché pour des investisseurs privés au détriment d'une cohérence globale à l'échelle urbaine.

B- Transformer le patrimoine par le dessous

Insérer de nouveaux usages dans les espaces souterrains est une bonne piste pour transformer la ville sur elle-même. Mais le sous-sol peut aussi être utile pour transformer un édifice qui ne peut pas être transformé en surface. En effet, de nombreux bâtiments historiques sont aujourd'hui classés en tant que patrimoine et sont protégés. Cela signifie qu'ils sont composés d'éléments remarquables et qu'on ne peut en modifier l'aspect. Pourtant certains de ces édifices sont obsolètes, leur usage primaire n'a plus lieu d'être ou alors le volume est devenu trop restreint. Passer par le sous-sol peut parfois permettre une transformation par le dessous, une transformation discrète voire invisible.

Par exemple, de nombreuses maisons pavillonnaires britanniques du début du XX^{ème} siècle sont protégées et considérées comme patrimoine.

Les personnes occupant ces maisons et vivant à l'intérieur ont parfois la volonté ou le besoin d'agrandir cette maison, devenue trop petite. La solution adoptée par plusieurs familles a été de créer des sous-élevations, un volume souterrain qui s'étend parfois au-delà de l'emprise de la maison en s'étalant sous le gazon du jardin. Des éclairages zénithaux sont mis en place ainsi que des escaliers du rez-de-chaussée à l'étage -1 pour accéder au sous-sol. Les réglementations urbaines ont été ici contournées pour s'agrandir.

Cette solution peut aussi être envisagée pour modifier l'usage d'un bâtiment. Prenons l'exemple du château de Versailles. Avec plus de huit millions de visiteurs chaque année, le château doit relever quelques défis infrastructurels afin de faciliter le parcours des visiteurs. La sortie du château et l'entrée aux jardins est un passage critique où beaucoup de personnes se croisent. Il a fallu agrandir le château afin que le parcours reste fluide. Etant impossible d'agrandir le château en surface, il a été décidé de créer un passage souterrain de l'entrée/sortie du château à l'entrée/sortie des jardins au niveau du pavillon Dufour et de la cour des Princes. Ce projet a été imaginé par Dominique Perrault. Ce dernier donne une relecture du bâtiment historique et utilise un instrument d'optique, le prisme, pour faire pénétrer la lumière à l'intérieur et insérer discrètement un escalier dans la cour²⁵.

A l'échelle urbaine, Dominique Perrault a aussi travaillé sur les problématiques du développement de la ville dans un milieu patrimonialisé : sur l'île de la Cité à Paris. Cette dernière classée patrimoine mondial de l'Humanité par l'Unesco, est en effet figée. Moins de mille habitants occupent les lieux pour plus de quatorze millions de visiteurs annuels. La majorité de l'île est occupée par des bâtiments publics et des institutions. Le caractère initial de l'île, de Lutèce n'est plus du tout perceptible. L'axe longitudinal n'existe plus depuis les travaux d'Hausmann. Seuls les axes traversant la Seine transpercent l'île. Le projet est ici de transformer cette île par le dessous afin de libérer l'espace du sol et de recomposer l'espace public grâce à une action souterraine. L'île étant classée et protégée, aucun bâtiment ne peut être ni détruit ni construit. Toute l'action se passe donc au niveau du sol et du sous-sol. Trois parkings souterrains

²⁵ Voir Atlas p 80-81.

sont transformés afin de mettre en lien les différentes institutions entre elles et de s'ouvrir sur la Seine. Des parcours piétons sont créés pour déambuler plus aisément sur l'île et des ouvertures donnent à voir des traces archéologiques de l'île historique. La volonté de Dominique Perault ici est «*d'épaissir la matière urbaine*» en lui rajoutant une couche, en la densifiant pour permettre son évolution, lui rendre un caractère urbain.

Les exemples précédemment expliqués ne sont pas totalement orientés vers une démarche de transition écologique mais ont comme objectif de transformer l'existant, de l'adapter aux enjeux contemporains, de continuer à le faire vivre. Hors cette dimension est importante en architecture car un bâtiment qui ne sert pas, qui ne représente qu'un monument car son usage est obsolète, est un bâtiment figé, sans vie. En le transformant et en y insérant de nouveaux usages, on maintient l'édifice en bon état de conservation et on évite la construction d'un nouveau bâtiment dédié à cet usage. C'est pourquoi il était important de parler de ces travaux qui donnent une nouvelle dimension à l'architecture souterraine, architecture qui se veut la plus résiliente possible.

Cette dernière s'est beaucoup développée au XXème siècle avec la création des métros. En effet, la mobilité urbaine est devenue un facteur de développement majeur des villes modernes. Londres d'abord puis Paris, ce système de transport est aujourd'hui adopté par la plupart des villes majeures. Il permet en effet de traverser une grande distance rapidement en ville et de rendre accessible les zones périphériques. L'avantage premier est de désengorger les routes en incitant les habitants à prendre le métro, à diminuer le nombre de bus en circulation et donc de libérer le sol et de préserver le patrimoine bâti en surface. En effet, les routes étaient parfois devenues trop étroites pour accueillir tous les flux de transports. Le métro est devenu petit à petit une icône dans la ville, un espace public à part entière. La ville de Stockholm a fait de son réseau de métro une galerie d'art par exemple²⁶. De nombreuses stations sont peintes et stylisées par différents artistes.

²⁶ Voir Atlas p 43.

Mais le développement du métro entraîne deux paradoxes. Le premier est celui de l'étalement urbain. En effet, l'installation du métro permet de désengorger les routes des centres des villes mais il accélère en même temps le phénomène d'étalement urbain puisque les périphéries sont rendues accessibles. On peut habiter sur la couronne périphérique et rejoindre le centre-ville en très peu de temps. Le deuxième paradoxe concerne le patrimoine. Une ville qui choisit d'installer une ligne de métro afin de fluidifier le trafic en centre-ville et préserver son patrimoine en surface, prend le risque de causer des dommages à son patrimoine historique souterrain. Par exemple, la construction de la ligne C à Rome a pris énormément de retard à cause des trésors archéologiques qui ont été découverts dans le sous-sol romain pendant les travaux. Les fouilles archéologiques interrompent les travaux, des modifications de parcours ont été décidées causant du retard si bien que treize plus tard, la ligne de métro n'est toujours pas finie. On retrouve la même problématique à Athènes dont le sous-sol se compose de nombreux vestiges de l'Antiquité.

Les métros sont de vastes infrastructures urbaines qui connectent de nombreux éléments entre eux. Hors, ce n'est pas le cas de tous les espaces souterrains. Dominique Perrault déplore que les autres souterrains ne soient pas reliés entre eux, *«les souterrains ne sont pas connectés entre eux, ils sont fermés»*. Il faudrait que les parkings, les galeries, tous les espaces publics souterrains soient organisés ensemble, reliés entre eux et organisés de pair avec les politiques urbaines de surface. Par exemple, Montréal dispose d'une immense ville intérieure reliant stations de métros, commerces, bureaux et immeubles mais cet espace n'est pas considéré comme une partie intégrante du développement urbain. L'espace est exploité indépendamment des politiques de surface, il n'y a pas de planification commune. Pourtant c'est en coordonnant les politiques de surface et les politiques souterraines qu'on réussira à créer une ville dense et plus soutenable.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

III- UNE DEMARCHE A L'ECHELLE URBAINE



A- L'exploitation durable du sous-sol en ville

1- La nécessité d'une pensée à plus grande échelle

a- Plus d'efficacité

Si on souhaite réellement avoir un impact positif sur l'environnement et agir pour une transition écologique plus rapide, il serait nécessaire de considérer l'architecture souterraine à une plus grande échelle, à une échelle urbaine voire territoriale. Nous l'avons vu, il est possible de profiter des propriétés du sous-sol pour imaginer des espaces qui s'inscrivent dans une démarche transitionnelle. Mais pour avoir un impact visible, il faut rendre ces techniques plus efficaces en les mettant en réseau et en créant une véritable politique urbaine souterraine en coordination avec celle de la surface. Edouard Utudjian, pionnier français de l'urbanisme souterrain parlait de la notion de « ville épaisse » : une ville à trois dimensions fonctionnant selon une répartition verticale. Il imaginait une ville non plus organisée selon les axes x et y mais selon z, selon les besoins de lumière notamment. Selon lui, les urbanistes, les aménageurs devraient étudier le sous-sol au même titre que la surface. Cela permettrait une action coordonnée et plus efficace. Ainsi, au lieu d'avoir une rampe d'accès pour un parking, un escalator vers un centre commercial enfoui et un escalier vers une station de métro, on pourrait relier tous ces espaces et descendre où l'on souhaite. Le complexe du musée du Louvre est exemplaire pour cela²⁷. L'espace souterrain, qui fait office d'espace d'accueil et d'entrée du musée sous la pyramide, fait le lien entre le musée, la station de métro, la galerie commerciale, les parkings visiteurs, les voies de services, les zones de stockage et d'archives... Chaque partie est mise en réseau avec les autres ainsi qu'avec la surface.

²⁷ Voir Atlas p 79.

b- Différentes appellations pour une même vision

Edouard Utudjian parle de ville épaisse mais d'autres appellations ont été inventés ensuite pour parler d'un urbanisme souterrain planifié en harmonie avec un urbanisme de surface. Dominique Perrault par exemple, qui s'est spécialisé dans la réalisation d'infrastructures souterraines, parle de « *Groundscape* ». Le *Groundscape* ou « paysage du sol » est une discipline dont le rôle est d'activer la ville par le dessous, il ne souhaite pas qu'on vive en sous-sol mais qu'il soit un outil pour transformer la ville, la « révéler ».

Gideon Golany et Toshio Ojima parlent quant à eux de *Geospace Urban Design*. Ils considèrent cela comme une méthode de développement de l'espace souterrain en complément de villes existantes ou nouvelles. Les intérêts de cette méthode sont la préservation du sol, de la terre, la recherche de mètres carrés à des prix accessibles, la défense du territoire, l'adaptation aux climats extrêmes et la lutte contre l'étalement urbain.

Aurèle Parriaux, géologue à l'EPFL de Lausanne, a développé le projet *Deep City*. Un projet qui vise à étudier le sous-sol des villes et à révéler les potentialités de développement en souterrain. Nous en parlerons plus en détail par la suite.

Enfin, l'AFTES, l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain a lancé le projet national *Ville 10D* qui vise à la mise en œuvre d'un processus qui, grâce à un travail interdisciplinaire, modifie la manière de concevoir le sous-sol. Selon l'AFTES, les villes doivent revoir leur organisation et leur modèle de développement si elles veulent rester des lieux accueillants pour les habitants. Ce projet serait l'occasion d'exploiter une ressource négligée : le sous-sol et son espace.

« Le sous-sol est une ressource pour le développement urbain durable. Il s'agira de poser les bases d'une nouvelle philosophie de développement urbain durable utilisant le sous-sol. Le projet « Ville 10D - Ville d'idée » vise à développer une recherche appliquée sur la contribution du sous-sol au développement urbain durable. Il cherche à faire émer-

ger les conditions d'un nouveau type de planification de l'aménagement des villes par une meilleure prise en compte des interactions positives entre la surface et le sous-sol. Il a pour ambition d'améliorer la connaissance sur la ressource sous-sol et de montrer qu'il existe une alternative crédible au seul aménagement de la surface. »

Le projet Ville 10D cherche à lancer une dynamique dessus-dessous. Pour la rendre possible, elle prend en compte différentes dimensions :

- La dimension cognitive (interdisciplinarité des compétences entre géologues, géographes, aménageurs, architectes, sociologues et urbanistes)

- La dimension sociétale (appropriation des espaces souterrains, usage des espaces publics, prise en compte des ressorts psychologiques sociaux et cindynique²⁸)

- La dimension environnementale (évaluation des impacts environnementaux, faisabilité des projets)

- La dimension économique (équilibre économique afin de pouvoir réaliser des aménagements à grande échelle)

Cette méthode de recherche a pour objectif de trouver les modalités de développement d'un urbanisme souterrain.

Ainsi, depuis longtemps déjà, des personnes réfléchissent sur le sujet, partout dans le monde. Si certaines méthodes sont au stade d'expérimentation, d'autres fonctionnent déjà mais ont besoin de passer à une plus grande échelle ou d'autres encore se développent très vite. Ainsi, une dynamique est d'ores et déjà en marche. Dans tous les cas, la question n'est pas de savoir si une ville va creuser son sol ou non, nous savons que la réponse est positive, la question est de savoir comment elle va creuser son sous-sol, pour poursuivre quels objectifs ? Les acteurs de l'urbanisme doivent prendre conscience des avantages et des dangers du sous-sol pour rester dans une démarche soutenable. Il faut en effet exploiter le sous-sol d'une manière durable. C'est indispensable pour imaginer un urbanisme souterrain respectant son environnement.

²⁸ La science du risque.

2- Quatre ressources sous nos pieds

Les porteurs de projets vus précédemment voient tous le sous-sol comme une ressource, une ressource mésestimée. Considéré comme un tout, c'est un volume contenant des ressources fondamentales pour le développement durable. Mais ce développement doit être planifié pour éviter les erreurs irréparables. Le projet Deep City divise le sous-sol en quatre catégories de ressources : le volume de construction, les géomatériaux, la géothermie et les eaux souterraines.

Premièrement, le volume de construction en souterrain. Ce dernier a un potentiel infini. C'est une opportunité de densification pour nos villes. On libère de la surface au sol et on en crée en sous-sol. Rien qu'à Paris, beaucoup de bâtiments iconiques de la capitale se sont étendus en sous-sol comme le musée du Louvre, la BNF, le centre Pompidou, les Halles...

Deuxièmement, les géomatériaux d'extraction sont tous les matériaux qui sont excavés en dehors du sol : roches et argile principalement. On parle aussi d'exhaure. Auparavant, les déblais importants provenant des excavations souterraines étaient destinés à la maçonnerie des voûtes ou à la construction des accès de chantier et aux routes. Aujourd'hui, les minéraux extraits sont utilisés en tant que granulats pour le béton, en matériaux pour la fabrication de blocs anti-érosion ou encore pour la fabrication du ciment et du plâtre. Ils trouvent aussi une utilité en tant que remblais pour les infrastructures routières et ferroviaires ou pour les comblements de fouilles. Si on extrait de la pierre naturelle massive, on peut imaginer que celle-ci soit utilisée comme matériau de construction pour un approvisionnement proche ou pour restaurer des édifices historiques nécessitant le même matériau qu'à l'origine. Si ces « carrières » sont en zone urbaine, il y a moins de distance d'acheminement. On réalise une économie de transport puisque le matériau est sur place. On construit avec les matériaux qu'on a autour comme par le passé où les murs des villes avaient la couleur de leur sol. Par ailleurs, un sol argileux peut être exploité pour édifier des bâtiments en terre comme c'est le cas dans certaines régions d'Afrique²⁹.

²⁹ Voir Atlas p 52-53.

Prenons la capitale finlandaise comme exemple. Helsinki exploite intensément son sous-sol depuis les années 1920. Une grande partie des géomatériaux extraits a été utilisée pour gagner de l'espace sur la mer et s'agrandir. Ainsi, en creusant, Helsinki gagne de l'espace en souterrain mais crée par la même occasion de la surface supplémentaire sur la mer. Ce sont les géotechniciens qui peuvent aider les architectes et les municipalités à orienter leur réemploi. Leur mission est de reconnaître le type de sol d'un terrain.

Troisièmement, la chaleur géothermique du sous-sol peut être exploitée comme source d'énergie pour l'électricité, le chauffage... Par simple installation de sondes géothermiques, on peut chauffer efficacement des espaces. Un fluide (de l'eau ou de l'air) descend en profondeur, se réchauffe, remonte et distribue la chaleur au volume de sa destination. Il faut toutefois prendre garde à ne pas utiliser cette méthode trop densément car cela causerait une perte de rendement. En effet, si le flux exploité est supérieur à la recharge naturelle de la roche, celle-ci se refroidit et par conséquent le rendement diminue. Ce système peut être mis en place pour des usages individuels mais devient intéressant lorsqu'il est mis en réseau avec une centrale géothermique qui opère à l'échelle d'un quartier, d'une ville. L'Islande, pays au climat froid, dispose d'un sous-sol chaud de par son activité volcanique. Le pays a beaucoup développé ce mode de chauffage pour des raisons écologiques mais aussi économiques. En effet, c'est la ressource la plus facilement accessible pour cette île isolée au nord de l'Europe.

Par ailleurs, des sondes géothermiques dites mixtes existent aussi. Elles sont mixtes car les sondes prélèvent de la chaleur du sous-sol vers la surface en hiver, fonctionnement habituel, mais stockent en été dans la roche les rejets de chaleur des climatiseurs. Le souterrain est utilisé ici comme une pile rechargeable.

Enfin, les eaux potables souterraines. Cette ressource est déjà largement exploitée par prélèvements des nappes phréatiques et rivières souterraines. Leur gestion est primordiale. Notre consommation d'eau ne doit pas excéder leur recharge et nous devons prendre garde à ne pas les polluer car leur qualité d'eau potable en serait à jamais perturbée.

bée. De cette façon, lors de creusement d'ouvrages souterrains, des *by-pass* peuvent s'ouvrir entre les eaux de surface (souvent polluées par l'urbanisation) et les eaux souterraines qui sont par conséquent contaminées. Par ailleurs, des problèmes d'approvisionnement en eau de boisson peuvent avoir lieu en cas d'effet barrière. L'effet barrière se produit lorsqu'un obstacle empêche l'écoulement normal de l'eau. Cet obstacle peut être continu (en cas de tunnel par exemple) ou discontinu (un sous-sol d'immeuble isolé). La conséquence d'un effet barrière est un rehaussement anormal de la nappe en amont et une baisse en aval. Si le niveau de l'eau est trop bas, l'approvisionnement peut être perturbé. C'est le même phénomène quand on construit en souterrain dans un sol aqueux. Il faut rabattre les nappes afin de travailler au sec. Souvent ce rabattement est temporaire, juste le temps du chantier, mais parfois il est durable en cas de bâtiment non étanche. On a donc une modification durable du niveau de la nappe phréatique.

Ainsi, ces quatre ressources sont disponibles partout sur Terre et souvent en quantité importante. Mais elles ne sont pas pour autant exploitables partout et toutes en même temps. En effet, l'exploitation d'une ressource peut en altérer une autre ou provoquer des dégâts non prévus sur le long terme. C'est pourquoi il est important de considérer le sous-sol comme un tout et non pas de regarder les ressources une par une indépendamment les unes des autres. Un urbanisme souterrain durable doit planifier et gérer au mieux ces ressources.

3- Des risques à considérer

Le sol est un élément qui ne se recrée pas. C'est pourquoi il est si important d'éviter les erreurs, les pollutions et de bien évaluer tous les risques avant de se lancer dans son exploitation. En effet, comme l'écrit Monique Labbé, « [...] *si une partie est indûment creusée, il sera difficile de la combler, impossible de la reconstituer. Les cavités doivent être surveillées et entretenues pour éviter affaissements, fontis et solifluxions* »³⁰. Nous n'avons donc pas le droit à l'erreur car il est impossible de reconstituer le sol. Le premier risque est de penser le souterrain sur

³⁰ 20 000 lieues sous les terres.

le court terme. C'est sur le long terme qu'il devient intéressant et compétitif économiquement. La rentabilité des équipements géothermiques ainsi que la gestion des eaux souterraines ne peuvent être pensée que sur le long terme. Raison de plus pour ne pas creuser au hasard. C'est la différence avec les bâtiments de la surface.

« Au bout de 50 ans, vous le détruisez et vous construisez autre chose. Mais dans le sous-sol, une fois que vous avez excavé, creusé c'est difficile à réparer, vous ne pouvez pas aller chercher les matériaux pour les remettre dedans. »

Aurèle Parriaux

Un autre risque est son isolation. On doit à tout prix imaginer le souterrain en interaction avec la surface. C'est la même chose pour les acteurs, les urbanistes, aménageurs doivent travailler de pair avec les géologues, les géotechniciens. Dans le cas contraire, l'aménagement du souterrain atteint ses limites. A Genève par exemple, le service municipal SEMO gère le cadastre souterrain de la ville³¹. Ce cadastre répertorie tous les éléments présents dans le sous-sol et leur localisation : canalisations, pieux des bâtiments, infrastructures souterraines, étendues racinaires des arbres, eaux souterraines... Les différents opérateurs de la construction, de l'ingénierie civile ont pour obligation législative de fournir les mises à jour à ce service depuis 2005. La mission de ce cadastre est simple : rassembler les données des gestionnaires des réseaux souterrains, les transformer, les contrôler et les diffuser sur le web pour les futurs chantiers dans la phase d'avant-projet. Ce cadastre ne fait pas figure de preuve. La preuve doit provenir directement de l'opérateur mais ça reste une bonne source d'informations. Ce cadastre est donc utilisé pour l'aménagement de la ville à l'échelle d'un quartier ou d'un immeuble. Le point négatif est que cet outil se base encore sur les plans d'aménagements de la surface. Il y a un manque de réflexion globale à l'échelle cantonale de Genève pour l'aménagement souterrain du territoire. Il n'y a pas de plan directeur. Chaque projet est isolé et les souterrains n'ont aucune correspondance entre eux car les disciplines sont cloisonnées.

Ce sont donc les deux principaux risques : le cloisonnement des disci-

³¹ Voir Atlas p 76.

plines et une vision à court terme. Si on ne les prend pas en compte, l'aménagement souterrain ne joue pas en faveur d'une transition écologique et sociale, il peut même aller à son encontre. Prenons l'exemple de Mexico. La ville est construite sur un vaste lac souterrain et exploite cette eau depuis des siècles comme eau de boisson. Dès le XIX^{ème} siècle, l'eau a été surexploitée. Le niveau du lac a baissé et un important phénomène de subsidence a été remarqué avec un abaissement moyen du centre-ville de 7.5m voire jusqu'à 9mètres à certains endroits. Au XX^{ème} siècle, la ville a construit sa première ligne de métro. Sa construction a entraîné la pollution de ces aquifères et a rendu non potable ces eaux de boisson souterraines.

Construire un souterrain signifie faire appel au génie civil et faire travailler ensemble une multitude d'acteurs différents. Ce sont à chaque fois des chantiers complexes avec une multitude de critères à étudier. C'est pourquoi il ne faut jamais oublier une analyse approfondie des risques. Les accidents qui ont pu avoir lieu durant les chantiers de tunnels ou galeries sont la conséquence d'une absence d'études complémentaires de sols qui ont entraîné des choix constructifs inadaptés. Pour éviter tout accident, il faut multiplier les sondages afin de ne pas avoir de mauvaises surprises, éviter un effondrement, prévoir quel type de coque mettre en place pour l'excavation et résister à la corrosion, au gonflement et aussi utiliser les bons produits pour ne pas contaminer les eaux.

Enfin, nous avons un risque sismique non négligeable. Si on construit à un niveau trop profond dans un sol qui est constitué de roches sans fissures, il est nécessaire d'avoir recours à la fracturation hydraulique afin de casser la roche. Cela a pour conséquence la création de microséismes voire de secousses plus violentes. A Bâle, un séisme de magnitude 4 a été ressenti pendant un chantier souterrain utilisant cette technique. Le chantier a été arrêté.

4- Comprendre les contraintes géologiques du sous-sol

Techniquement, l'Homme est en capacité de creuser partout, à travers tous les types de sols. Seule la variable économique change. En effet, il sera plus simple de creuser à Helsinki qu'à Amsterdam car la

nature sablonneuse du sous-sol néerlandais et la présence d'eau impose de rabattre les nappes phréatiques, ce qui déstabilise les édifices autour. Les bâtiments sont fondés sur un sol sablonneux chargé d'eau. Et si on aspire l'eau, le sol s'affaisse et les bâtiments aussi. Il est donc très important de connaître la constitution du sous-sol afin de savoir ce que l'on peut faire ou non en un endroit précis car creuser peut modifier l'équilibre de cours d'eau par exemple. Dans le cas d'un sol granitique comme Helsinki, l'excavation souterraine est autostable, c'est-à-dire qu'il n'y pas besoin de structure périphérique et de très peu d'éléments structurels dans le volume souterrain. La roche peut être laissée apparente³². Ainsi, le type de sol est primordial pour la stabilité d'un ouvrage souterrain. Un bon sol est un sol qui n'a pas de venue d'eau, qui se prête au creusement, qui se compose de couches sédimentaires compactes d'épaisseurs suffisantes sans fissures et pouvant se maintenir sans revêtement sur une largeur de 9 à 10 mètres. Pour connaître la composition d'un sol, on réalise des sondages verticaux ou horizontaux (dans le cas d'un tunnel). On peut ensuite initier les travaux préparatoires c'est-à-dire, la déviation des canalisations souterraines, le rabattement des nappes par pompage, la mise à sec du chantier et l'excavation. Différentes techniques sont possibles pour la mise à sec : la congélation du terrain autour des puits par la mise en circulation d'eau saumure dans des tubes refroidisseurs pour créer une croûte temporaire ou l'injection de ciment ou de produits silicatants en vue de créer une croûte permanente à l'intérieur.

Une fois l'ouvrage souterrain construit, d'autres contraintes sécuritaires apparaissent : l'évacuation de l'eau et les risques d'incendie. On évacue l'eau en la faisant descendre au plus bas par simple gravité puis on l'évacue à l'aide d'air comprimé ou de pompes électriques. En cas d'incendie, on prévoit en général des circulations les plus simples possibles, larges et s'ouvrant vers l'extérieur. La forme des couloirs des métros parisiens par exemple a été inspirée par l'évacuation de l'eau dans les siphons et tuyaux des salles de bains afin de faire sortir tout le monde le plus vite possible en cas d'alerte. Des rideaux coupe-feu ainsi que des réserves d'eau sont parfois prévus en fonction de la taille de l'édifice et de sa destination.

Enfin, nous ne pouvons pas ignorer la contrainte de l'existant. Dans un

³² Voir Atlas p 66.

milieu urbain, l'urbanisme souterrain est limité par les bâtiments autour qui empêchent certaines techniques de réalisation, qui entravent la rentabilité d'un ouvrage et contraignent les liaisons avec l'extérieur et donc la sécurité incendie.

Chaque sol implique donc différentes contraintes qu'il faut connaître afin de trouver les solutions adaptées à une exploitation durable. La citation suivante de Monique Labbé résume bien cette idée :

« Parce que la technique actuelle le permet, faut-il creuser tout droit quels que soient les mouvements du sous-sol, avec des tunneliers tout terrain dont la jupe peut franchir aussi bien le roc que les terrains meubles [...] ou ne faut-il pas plutôt suivre les strates, les cours intérieurs des eaux, les anfractuosités ? Ne faudrait-il pas, comme on le fait en surface, respecter, pour toute implantation dans le sous-sol une « intégration paysagère » selon le concept de paysage souterrain de Pierre Dufaut qui tient compte du paysage propre du terrain, des lignes de force, de sa capacité à admettre les grandes cavités... ? En effet, il ne s'agit pas de « venir à bout » du sous-sol avec des outils techniques de plus en plus en plus perfectionnés mais de suivre et accompagner sa structure propre. Exercice difficile mais incontournable. Forcé, contraint, le sous-sol comme à Mexico se révolte à grande échelle. Exploiter durablement le sous-sol c'est explorer le sous-sol dans son identité, y repérer ses strates, ses opportunités, son hétérogénéité, ses paysages et permettre qu'il se renouvelle – démarche déjà traditionnellement utilisée pour les eaux. C'est là sans doute la clé de l'équilibre à trouver entre l'offre et la demande d'espace souterrain pour que la demande s'accomplisse dans une offre reconnue et durable. »

Monique Labbé

L'exploitation durable du sous-sol est une condition *sine qua non* à une transition écologique. Si les volumes intérieurs sont pensés pour être le plus neutre en émission carbone, sa construction et son impact sur l'environnement autour doit l'être aussi. De plus, en exploitant durablement le sol, on peut s'en servir comme levier pour créer une ville plus durable.

B- L'exploitation du sous-sol pour une ville durable

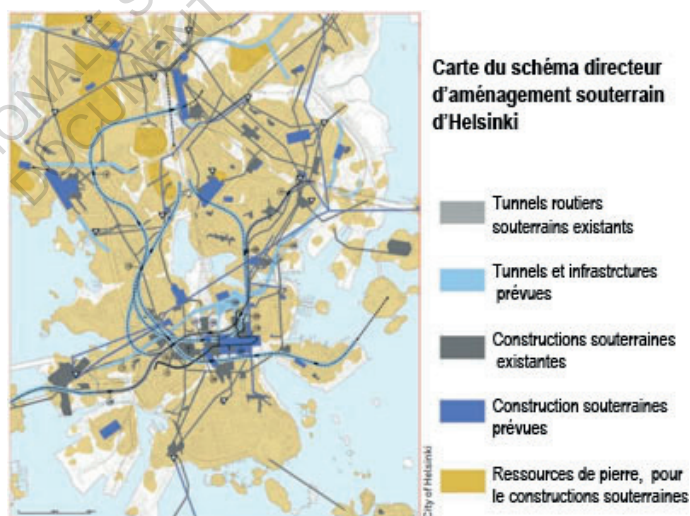
1- La synergie des ressources souterraines : une méthodologie

La transition écologique a pour objectif d'atténuer le changement climatique et d'adapter les populations à cette transition. Un des points critiques le plus important est l'habitabilité des villes. Elles abriteront deux tiers de la population mondiale en 2050. Afin de créer les conditions de vie acceptables dans ces espaces et imaginer une ville résistante à des températures toujours plus élevées à cause du phénomène d'îlot de chaleur, l'exploitation du sous-sol est un outil à ne pas négliger. Le projet Deep City propose une méthodologie aux villes souhaitant investir leur souterrain. Le sous-sol est déjà utilisé, nous l'avons vu tout au long des paragraphes ainsi que dans l'atlas, il ne s'agit pas de démontrer qu'on peut l'exploiter mais de trouver les moyens permettant son exploitation multiple et raisonnée. Le but final est de proposer une planification, la planification d'un urbanisme tridimensionnel et d'un territoire dans son ensemble. Pour cela, la première étape est d'établir une cartographie 3D simplifiée des sous-sols afin de comprendre puis choisir où le potentiel est le plus important en termes de ressources (Les quatre ressources considérées sont pour rappel : volume souterrain, géomatériaux, géothermie et eaux souterraines). Les deux objectifs de cette méthodologie sont :

- Utiliser de manière optimale la richesse du sous-sol en développant les synergies entre les ressources disponibles
- Minimiser les conflits entre les ressources disponibles

Pour cela, après avoir effectué une cartographie tridimensionnelle d'un territoire, sa composition et ses ressources, les géologues analysent leur répartition, leur qualité puis étudient les interactions entre elles, qu'elles soient positives ou négatives. Ils évaluent les degrés de compatibilité des différents usages et ressources avant de proposer une planification de l'aménagement des sous-sols si présence de synergies ou ils déconseillent, interdisent à certains endroits. Une matrice a été proposée pour

donner des exemples de synergies et des exemples de conflits entre les ressources (Voir tableau page suivante). Le but est d'avoir une gestion du sous-sol à long terme et non pour un besoin unique et immédiat. La méthodologie est là pour aider à prendre une décision. En effet, les quatre ressources interagissent entre elles par leurs usages. Elles ont déjà permis par le passé à la ville de se densifier, se développer mais en l'absence de coordination, et donc au détriment de d'autres ressources parfois. Nous pouvons reprendre l'exemple de Mexico, le besoin immédiat d'un métro sans la prise en compte de la présence d'eau souterraine a condamné la qualité de l'eau. L'approche sectorielle dans ce cas a eu pour conséquence conflits d'usage et gaspillage. On oppose l'approche sectorielle à l'approche à usage multiple. Une approche sectorielle est une analyse où on prend en compte une seule ressource correspondant à un besoin immédiat. Au contraire, une approche à usage multiple implique une utilisation coordonnée des ressources sur le long terme, une approche essentielle dans le processus de transition écologique. C'est ce que défend le projet Deep City. Comme le rappelle Monique Labbé, le but est d' *«en finir avec l'attitude qui veut que le premier arrivé prenne la meilleure place»*³³. Ce projet rend service aux municipalités, aux aménageurs en les aidant, en leur donnant une vision du potentiel de leur sous-sol. Helsinki est sans doute la ville ayant le modèle le plus abouti d'urbanisme souterrain. Elle dispose effectivement d'un Masterplan souterrain (Voir carte ci-dessous).



³³ 20 000 lieues sous les terres.

Matrice des interactions

AGENT IMPACTANT		AGENT IMPACTÉ				D'après Blunier
	Espace	Eau Souterraine	Géothermie	Géomatériaux		
	Espace	-Conflit d'espace -Subsidence +Mise en réseau	-Concurrence hydrogéologique -Effet barrage -Pollution des eaux¹ -Court-circuits entre aquifères +Captages dans les ouvrages souterrains	+Géostructures énergétiques +Valorisation thermique des flux techniques	-Élimination des matériaux d'excavation +Valorisation des géomatériaux	
	Eau Souterraine	-Infiltration dans les ouvrages -Poussée d'archimède -Subsidence et soulèvement -Corrosion et détérioration des ouvrages	-Concurrence hydrogéologique	-Dessaturation des terrains		
	Géothermie	-Conflit d'espace -Modifications thermo-mécaniques -Gel du terrain -Impact des prélèvements	-Concurrence hydrogéologique -Effet barrage -Pollution des eaux¹ -Modifications de l'activité biologique -Modification des paramètres physico-chimiques	-Interaction des plumes de froid ou de chaud -Surexploitation du flux thermique		
	Géomatériaux	+Coordination extractions-constructions	-Modifications du bilan hydrogéologique -Effet barrage -Court-circuits entre aquifères -Pollution des eaux¹			

2- L'exemple de Dakar et de Verbier : enjeux et besoins

Des projets Deep City ont déjà été réalisés dans différentes villes dans le monde par l'équipe de Deep City organisée autour d'Aurèle Parriaux: Hong Kong, Mexico, Sao Paulo, Genève mais aussi Dakar et la station de ski Verbier en Suisse. Nous allons approfondir ces deux derniers exemples.

Dakar est une ville qui, comme beaucoup de métropoles africaines, s'est urbanisée très vite ces dernières décennies. Sa population s'est accrue à une vitesse exponentielle et par la même occasion le nombre de voitures en circulation. Aujourd'hui, la capitale du Sénégal est saturée. Les embouteillages sont quotidiens et l'air est pollué à des valeurs bien au-delà des recommandations de l'OMS.

L'analyse de Deep City a montré qu'on pouvait exploiter le sous-sol pour réaliser de nouvelles infrastructures de transports pour décongestionner les autoroutes et boulevards de la ville sans que cela coûte trop cher. Par ailleurs, Dakar est construit sur un haut plateau rocheux. Ce sol se prête admirablement aux excavations et la municipalité voudrait pouvoir l'exploiter pour aménager des espaces souterrains sous la place principale de la ville. Il existe toujours par contre un frein économique à ces projets.

Un frein économique que n'a pas la station hivernale de Verbier dans les Alpes suisses. Dans ce village qui se transforme en ville durant l'hiver, les problématiques sont différentes. La commune de Verbier cherche à aménager son souterrain afin de densifier ses activités. En effet, l'hiver Verbier a besoin de plus d'électricité et plus d'eau potable puisque sa population passe de 8000 habitants³⁴ à 60 000 durant les vacances de fin d'année. Le meilleur moyen est de s'approvisionner directement dans la montagne. Par ailleurs, les terrains sont très chers et beaucoup d'édifices construisent plusieurs niveaux de souterrains afin de rentabiliser au maximum le prix du mètre carré. Une réflexion est en cours sur le devenir des matériaux excavés. Le projet Deep City cherche à trier les matériaux sur place et essayer de les valoriser sur site afin d'éviter de les faire descendre en plaine par camion. La réalisation de ces possibilités

³⁴ Chiffres pour la commune de Bagnes dont dépend la station hivernale de Verbier.

dépend de la composition du sol. C'est pourquoi l'équipe de géologues crée une maquette numérique du sous-sol afin de pouvoir paramétrer le tout et faire des simulations. A la fin, Deep City rend le modèle géologique mais aussi des recommandations pour favoriser les synergies et éviter les conflits d'usages entre les ressources sur le long terme. Verbier peut donc petit à petit planifier l'aménagement de son souterrain dans une démarche durable.

3- Une législation à adapter

Par ailleurs, afin de réunir les conditions nécessaires au développement d'un réel urbanisme souterrain, il est indispensable de mettre en œuvre une modification de la législation.

Aujourd'hui, la réglementation française ignore le sous-sol voire l'interdit dans certains cas. Par exemple, l'accès au public est prohibé dans les ERP³⁵ (Edifices Recevant du Public) à moins de 6 mètres de la surface pour des raisons de sécurité incendie. De plus, le code de travail interdit le travail en sous-sol, sauf cas exceptionnels, et oblige à avoir des vues sur l'extérieur. Ces réglementations sont tout à fait normales, de bonnes conditions de travail sont indispensables au bien-être des travailleurs. Cependant, elles contraignent et rendent la tâche difficile pour les opérateurs souhaitant édifier un espace en sous-sol. De plus, les codes de l'urbanisme et les PLU ignorent totalement le souterrain. Lorsqu'un ouvrage en sous-sol est en construction, les opérateurs doivent avoir en amont l'accord du propriétaire du fond. En effet, en France, un propriétaire d'un terrain est propriétaire du dessus et du dessous, c'est-à-dire théoriquement, de la surface jusqu'au centre de la Terre. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une expropriation partielle, ce qui peut prendre du temps et coûte plus cher. C'est pourquoi la plupart du temps, on essaie de suivre le tracé des voies de circulation publiques afin d'éviter d'exproprier le tréfonds.

En Suisse, c'est un peu différent. Il est écrit dans la loi qu'un propriétaire a la propriété du dessus et du dessous mais jusqu'à une profondeur utile. Le terme « *profondeur utile* » est ambigu et c'est cette ambiguïté

³⁵ Edifices Recevant du Public.

qui donne un accès plus simple au sous-sol par d'autres acteurs. Il s'agit de prouver l'utilité publique de l'ouvrage pour obtenir le droit d'initier des travaux. En général, il est admis qu'après 5 mètres de profondeur, il n'y a pas de procédure d'expropriation.

Au Japon enfin, l'espace souterrain est de droit public depuis 1998. En effet, les villes japonaises ont une forte densité de métro et de commerces souterrains. Il est donc plus aisé d'exploiter le sous-sol. Aucune démarche d'expropriation n'est nécessaire. Il faudrait donc adapter la législation afin de rendre son exploitation plus facile et plus incitative sous condition qu'il y ait une utilité publique et une contribution à la transition écologique.

4- Le nouvel Eldorado hyper-moderne ?

Ainsi, en réunissant un panel d'acteurs différents mais complémentaires autour d'une même vision, celle d'une ville considérant son sous-sol comme un moyen de développement et un outil pour créer un milieu plus durable, il est possible d'agir pour une transition écologique et sociale. Cependant, on peut parfois rester perplexe sur les solutions proposées. Va-t-on dans la bonne direction ? En effet, une des causes du changement climatique, est la volonté de l'Homme de toujours vouloir plus, exploiter tout ce qui est exploitable et profiter de chaque ressource disponible sans partage avec les autres écosystèmes. Dans le cadre d'un développement souterrain urbain dit « durable », on reste dans la même logique : se développer en exploitant des ressources. Le vocabulaire de ressources et de développement est également présent dans le champ sémantique de Deep City ou de Ville10D. Dominique Perrault dans son ouvrage sur le Groundscape s'exprime avec ces mots : « *L'architecture souterraine révèle le sol comme un nouveau territoire inexploré* ». En faisant des recherches, on comprend que le souterrain est un monde oublié de par son invisibilité. Le frein de son aménagement peut être le coût de ces infrastructures mais aussi sa méconnaissance. C'est pourquoi il est vu par certain comme un nouveau monde à explorer. Ce sentiment a beaucoup été exploité par les auteurs de science-fiction qui ont fait du souterrain un monde caché et mystérieux dans lequel se produisent des événements que les humains ignorent. Creuser et y aménager des

espaces seraient donc comme de peupler un nouveau territoire, une nouvelle planète.

"Much has been written about exploring the remotest corners of the earth and probing the vast depths of space, but what of the world beneath our feet?"

The Author, *London's Underground*, 1969

En développant des activités souterraines en ville, nous continuons vers un modèle de développement similaire à aujourd'hui et non vers un changement radical d'approche. La solution apportée au changement climatique et la contribution à la transition écologique sont le progrès technologique de l'Homme. Hors, les progrès de l'Homme l'ont jusqu'ici conduit à avoir un impact significatif sur la Terre, au point de devenir une « *force géologique* » à part entière selon les points de vue de certains scientifiques qui parlent d'Anthropocène³⁶. Faut-il que l'Homme continue en ce sens jusqu'à ce que ses progrès lui permettent d'avoir un impact bénéfique sur la planète ?

Ainsi, une piste sérieuse pour contrer le changement climatique est de stocker le gaz carbonique dans la roche. C'est une autre utilisation du souterrain possible pour une transition écologique. Cette technique, encore expérimentale, a pour but d'enfouir le gaz carbonique produit en excès par les activités humaines dans le sol terrestre et de le faire disparaître. Idée séduisante, Aurèle Parriaux admet qu'elle fonctionne mais « qu'il ne faut pas que [le gaz] remonte sinon c'est une imbécilité ». Par ailleurs, il ne faut pas compter que sur ça, il devient urgent de diminuer notre production de gaz à effet de serre.

Enfin, si on reprend la définition de l'atténuation des émissions des GES de l'Ademe : activités qui contribuent à la stabilisation des concentrations des GES dans l'atmosphère, il y a deux actions principales : réduire et limiter les émissions, ce que nous avons démontré avant, et amélioration et protection des puits et réservoirs de GES. Ces réservoirs de GES sont les forêts, les cultures mais aussi et surtout le sol. En effet,

³⁶ L'Anthropocène, soit l'Ère de l'Homme, est un terme relatif à la chronologie de la géologie proposé pour caractériser l'époque de l'histoire de la Terre qui a débuté lorsque les activités humaines ont eu un impact global significatif sur l'écosystème terrestre.

des tonnes de CO₂ sont stockées dans la terre et la roche sous forme de matière organique. Leur utilisation engendre des flux de CO₂. Ainsi, un agriculteur qui laboure son champ trop profondément émet du gaz carbonique dans l'air, un tunnelier creusant une colline libère aussi du gaz carbonique. Tous les sols n'ont pas la même teneur de carbone, par exemple les sols des villes sont souvent pauvres. Toutefois, il ne faut pas oublier cette dimension dans l'exploitation du souterrain. On pourrait faire plus de dégâts qu'on ne le pense.

De même, le sous-sol apparaît comme solution de remplacement. Les ressources se raréfient, tous les territoires ont été explorés, on cherche alors à en explorer un nouveau pour continuer à y puiser des richesses comme si le sous-sol était le nouvel Eldorado, un Eldorado hyper-moderne dans lequel l'Homme utilise toutes les techniques dont il dispose pour arriver à ses fins.

Le sous-sol a donc son rôle à jouer pour amoindrir le changement climatique mais il est clair qu'il ne peut pas être l'unique solution. La transition écologique doit se faire sur tous les fronts par tous les moyens disponibles sans laisser personne de côté.

CONCLUSION

Pour conclure nous pouvons dire que le souterrain est un monde à part, qu'il est utile de comprendre pour l'apprivoiser. Ses propriétés et sa composition unique font de lui un environnement fascinant et intéressant. L'architecture peut y être sublimée tout comme celle-ci peut exalter la beauté de l'élément Terre. Son exploitation a permis à l'Homme de se protéger, de s'hydrater, de construire des murs, de pratiquer son culte, de traverser des montagnes sans difficulté et de gagner de l'espace. Sans que l'on s'en aperçoive, le souterrain est devenu indispensable à l'Homme. C'est pourquoi il est nécessaire que l'on en prenne soin car l'avenir de notre planète ainsi que le nôtre se joue aussi dans ces espaces.

Nous avons vu précédemment que les propriétés du sous-sol permettent d'y imaginer des espaces plus respectueux de l'environnement, plus efficaces énergétiquement notamment sous certaines latitudes, qu'il est plus facile de les entretenir et, qu'en plus de pouvoir protéger les populations en cas de danger, il n'est au final pas vraiment plus cher à réaliser qu'un bâtiment en surface. De plus, on peut investir des espaces qui sont déjà creusés et les rendre de nouveau utiles tout comme on peut transformer des bâtiments par le dessous, solution efficace lorsqu'on ne peut pas toucher à un patrimoine protégé. Enfin, étendre cette réflexion à l'échelle urbaine devient très intéressant et même urgent à condition d'avoir une vision à long terme et de prendre en considération de nombreux facteurs afin de ne pas polluer définitivement les eaux souterraines par exemple.

Bien sûr, cette vision de développement est, en certains points, bien différente de d'autres modèles tels que la décroissance. En effet, en prônant une utilisation plus intensive du sous-sol terrestre, on accepte l'idée de s'étendre toujours plus, de consommer ce que l'on peut consommer. C'est contraire à la simplicité volontaire ou au minimalisme de certains courants de pensée. Il est certes illusoire de penser que l'urbanisme souterrain aussi durable et soigneux soit-il n'a aucun impact sur la Terre. Il en a un. Mais dans un monde où la disparition des termes croissance et

développement fait encore croire que l'on reviendrait à une civilisation moyenâgeuse, il faut trouver les outils qui amoindrissent le mal et agir pour une transition la plus écologique possible. Deux modèles de transition se frottent mais ils ne se collisionnent pas complètement. A nous de faire apparaître la lumière de cette friction.

Dans tous les cas, ne renonçons pas au monde souterrain, aussi noir et profond soit-il, il a quelque chose à nous offrir. Il faut pour cela aller vers lui avec humilité. « Mieux vaut allumer une seule et minuscule chandelle que de maudire l'obscurité » dit un proverbe chinois. Le potentiel du souterrain dans la transition écologique est trop important et la situation climatique trop urgente pour se permettre de l'ignorer.

Par ailleurs, si les enjeux du souterrain sont évidents en milieu urbain, ils restent tout aussi véridiques en milieu rural. Imaginer des habitats transitionnels en campagne est possible. Par exemple, on pourrait exploiter l'argile du sol pour construire des murs et utiliser le volume excavé pour s'y installer comme le font si bien les habitants du Yaodong en Chine.

Tous les outils vus précédemment pour une application à l'échelle urbaine sont transposables à une échelle cellulaire. Les agences d'architecture exerçant pour le monde rural auraient tout intérêt à se servir elles aussi des propriétés du souterrain. C'est peut-être en cet endroit que les deux modèles de développement peuvent s'accorder sur des principes communs.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Frédéric BARBE, professeur référent de ce mémoire, d'avoir collaboré avec moi sur ce sujet. Merci de m'avoir aiguillé et de m'avoir fait réfléchir dans les bonnes directions.

Merci également à M. Aurèle PARRIAUX, géologue, d'avoir accepté de me rencontrer à Lausanne et d'avoir répondu à mes questions avec passion et discernement. Son apport de connaissances a été fondamental.

Merci enfin à M. Alexandre GUILLO pour son éclairant témoignage et son partage d'expérience sur la ville intérieure de Montréal au Canada.

BIBLIOGRAPHIE

MOOC

Groundscapes Architecture Design Lab, re-thinking cities underground, EPFL Lausanne, EDX , 2018

Livres

- Swayze Jay, Le meilleur des (deux) mondes, maisons et jardins souterrains, collection Design, 2012
- Kang-Soo Kim, Solar World Congress, Korea, 1997, Daylight Prediction and Measurement of underground spaces
- London Underground, Rassegna magazine, Italie, 1996
- Perrault Dominique, Groundscapes : Other topographies, HYX Editions, Orléans, 2016
- Von Meiss Pierre & Radu Florinel, 20 000 lieux sous les terres : Espaces Publics souterrains, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2004
- Verne Jules Voyage au centre de la Terre, France, 1864
- Toth Jennifer The Mole People, life beneath New York City, A Cappelle Books, 1993
- Schuiten Luc et François, Les Terres Creuses, Les Humanoïdes associés, Belgique, 1980, Bande-dessinée
- Costes Guy et Altairac Joseph, Les Terres creuses, bibliographie commentée des mondes souterrains imaginaires, Les Belles Lettres, Amiens, 2006
- Tanizaki Junichirô, L'éloge de l'ombre, Orion Press, Tokyo, 1933
- Utudjian Edouard, Architecture et urbanisme souterrains, Robert Lafon, Paris, 1996

- Utudjian Edouard, L'urbanisme souterrain, Que sais-je, Paris, 1972
- Clément Alain & Thomas Gilles, Atlas du Paris Souterrain, la doublure sombre de la ville lumière, Parigramme, Paris, 2016
- Barrocca Bruno, Diab Youssef et Serre Damien, Penser la ville et agir par le souterrain, Presses des ponts, Paris, 2014
- Parriaux Aurèle, Géologie, bases pour l'ingénieur, PPUR presses polytechniques, 2006
- Parriaux Aurèle, Projet Deep City : Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains, Rapport de recherche, Fonds National Suisse, 2010
- Golany & Ojima, Geo-space Urban Design, John Wiley & Sons Inc, 1996

Podcast & Interviews

- Delorme Florian, Dans les entrailles de la Terre, France Culture, 2017
- Entretien entre Yannick Rumpala et Marie-Catherine Mérat, La Science-fiction au service de l'écologie, Sciences Humaines Magazine, 2014

Documentaires & Films

- Lasbats Chantal, Dans les entrailles de New-York, 2009
- Metropolis, Lang Fritz, 1927

Entretiens

- Guillo Alexandre, étudiant à Polytechnique Montréal
- Parriaux Aurèle, géotechnicien et chercheur à l'EPFL Lausanne

Le sous-sol est un environnement à part pour l'Humanité. Peur, enthousiasme ou simple curiosité, il ne laisse jamais personne indifférent. Il est exploité depuis des millénaires pour le besoin des Hommes et peut demain jouer un rôle clé dans la lutte contre le réchauffement climatique, notamment dans les villes. Sa capacité de développement est grande. Au fil des pages de ce livre, nous comprenons son potentiel et dans quelles mesures l'urbanisation souterraine peut contribuer à rendre nos villes plus durables.

A l'aide d'une nouvelle d'anticipation fictionnelle, d'un atlas illustré des souterrains à travers le monde et d'un essai sur l'architecture souterraine écologique, nous allons découvrir le monde souterrain, sa richesse, ses enjeux, ses risques et les moyens de tirer parti de cet environnement dans une perspective de transition écologique et sociale.