

Solutions béton

Les nouveaux enjeux et défis des villes	P. 2
La nécessité de la densification urbaine	P. 3
Les ressources du sous-sol	P. 4
Le Projet National Ville 10 D	P. 4
Aménagements potentiels en souterrains	P. 5
Les galeries multiréseaux	P. 6
Les réponses du sous-sol	P. 6
Quelques aspects techniques et financiers	P. 7
Les solutions constructives à base de coulis, mortiers et bétons	P. 8



L'espace souterrain, une ressource au service de la ville durable

Une nouvelle stratégie de développement et d'aménagement de l'espace urbain s'impose pour limiter les consommations de ressources, réduire les impacts environnementaux et densifier les villes. L'espace souterrain offre des solutions pour relever ces nouveaux défis. L'utilisation de cette ressource stratégique et précieuse en synergie et complémentarité avec les aménagements de surface doit permettre de créer la ville durable, cadre de vie esthétique et désirable des prochaines générations. Les bétons, les mortiers et les coulis offrent une grande variété de solutions constructives adaptées, performantes et pérennes pour la construction de ces ouvrages souterrains.

Texte : Patrick Guiraud

Les nouveaux enjeux et défis des villes

Photo : Dillif



→ La ville, principal lieu de consommation d'énergies et d'émission de polluants.

Les villes, lieux de vie, d'échanges et de consommation sont des assemblages complexes de nombreuses fonctionnalités : logement, déplacement, travail, éducation et formation, santé, commerce, industries, artisanat, activités culturelles, sportives et de loisirs... au service de leurs habitants.

En faisant **cohabiter habitats, activités de travail et infrastructures de déplacements**, elles sont devenues dans tous les pays du monde, en concentrant les populations et les activités économiques, le principal lieu de consommation d'énergies, de ressources et d'espaces et d'émission de polluants et de déchets. Ce phénomène va inévitablement s'amplifier au cours des prochaines décennies.

Les villes sont actuellement confrontées à un manque de foncier, à l'étalement urbain, à l'arrivée continue de nouveaux habitants, à la congestion du trafic routier et à des préoccupations environnementales (qualité de l'air, pollution des eaux, nuisances sonores, déchets, pollution des sols, risques hydrologiques, préservation de la biodiversité...).

Les villes dans lesquelles vivent de plus en plus de personnes (plus de la moitié de la population à l'échelle de la planète vivra dans les villes en 2050) sont à l'heure de la transition énergétique au cœur du défi pour faire entrer notre société dans l'ère postcarbone. Elles doivent faire face aux nouveaux enjeux sociaux, démographiques, climatiques, énergétiques, économiques et environnementaux, auxquels elles sont confrontées.

LES MULTIPLES DÉFIS DES VILLES

Elles doivent s'adapter à de nouvelles contraintes et aux évolutions des besoins de leurs habitants et apporter des solutions à de multiples défis :

- lutter contre le réchauffement climatique ;
- baisser les émissions de GES et réduire les pollutions atmosphériques ;
- maîtriser les consommations et les dépenses énergétiques ;
- s'adapter aux évolutions liées au changement climatique,
- lutter contre l'étalement urbain et périurbain ;

- gérer une rapide urbanisation ;
- régler le problème de pénurie de foncier et d'espaces naturels ;
- réduire l'imperméabilisation des sols ;
- endiguer la dispersion des fonctions vitales en périphérie ;
- régler le devenir des friches industrielles ;
- réduire les consommations de ressources naturelles ;
- permettre le fonctionnement cohérent de la vie urbaine ;
- développer une approche systémique des fonctions de la ville permettant une gestion optimale des interactions entre les approches sectorielles traditionnelles cloisonnées : transports, eaux, déchets...
 - maîtriser l'utilisation de la voiture ;
 - réduire les temps et les distances de transport ;
 - faciliter les mobilités, les accessibilités et les circulations des habitants et des marchandises ;
 - faire cohabiter les différents modes de déplacement, et favoriser les modes de déplacement doux ;
 - développer des modes de déplacement urbains plus économes en énergie et plus respectueux des res-

- sources et de l'environnement naturel ;
 - rendre les villes résilientes aux risques naturels et industriels ;
 - limiter les nuisances sonores et les pollutions des eaux et des sols ;
 - améliorer la qualité de l'air et de l'eau et du cadre de vie ;
 - gérer et valoriser les déchets ;
 - maîtriser les flux des eaux (potables, usées, pluviales) et les risques d'inondation ;
 - créer une économie circulaire au service de la ville ;
 - développer une mixité sociale et générationnelle ;
 - être accessible à tous en anticipant les phénomènes de vieillissement de la population ;
 - préserver voire introduire plus de biodiversité ;
 - développer des espaces de vie confortables et lisibles pour tous ;
 - concilier densité et espace public au profit de la qualité du cadre de vie ;
 - mettre l'homme et la biodiversité au cœur de la ville ;
 - offrir une qualité de vie urbaine, un cadre de vie apaisant et sûr, permettant de mieux vivre, de mieux respirer, de mieux se déplacer.
- Les villes doivent désormais consommer moins d'énergie et d'espaces, faciliter l'écomobilité des hommes (en privilégiant l'utilisation des modes doux, les transports en commun et les déplacements alternatifs). Elles doivent réduire leur empreinte environnementale en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments et en maîtrisant les flux des diverses eaux et des déchets, tout en accroissant leurs offres de services et leurs fonctionnalités. **Elles doivent faire vivre un nombre d'habitants toujours plus importants tout en offrant des conditions de vie et de mobilité optimales et privilégier la densification tout en préservant les espaces naturels pour offrir un cadre de vie agréable à vivre à ses habitants.** ■

La nécessité de la densification urbaine

L'espace urbain de surface devient une denrée rare et précieuse. Les villes sont discontinues et saturées par l'accroissement de la population et vulnérables face aux risques naturels. Elles doivent devenir fluides, compactes et denses pour lutter contre l'étalement urbain.

C'est dans les villes que se focalisent et se concentrent aujourd'hui les urgences en matière de Développement Durable.

Le développement des villes, pour répondre aux contraintes du Développement Durable, implique qu'elles évoluent vers plus de compacité, densité, proximité et mobilité. Ce qui justifie une réflexion approfondie sur

l'organisation de l'espace, une meilleure utilisation de toutes les potentialités disponibles, des adaptations aux conséquences du changement climatique, un développement des mobilités de proximité, un nouveau modèle d'urbanisme et une nouvelle stratégie de conception, de construction et de gestion de la ville, ainsi que des évolutions de fonctionnalités pour garantir la qualité des services.

Le besoin de densification de l'espace urbain, pour développer un habitat plus économe en espace dans une ville mieux structurée, impose de rechercher de nouveaux volumes et d'inventer de nouveaux aménagements faisant appel à la

créativité et la capacité d'innovation des architectes, des urbanistes, des paysagistes et des ingénieurs. Ces volumes peuvent être trouvés vers le haut en construisant des tours ou vers le bas en exploitant les ressources du sous-sol.

VERS UN URBANISME COMPACT

Il convient désormais de transformer les formes urbaines, l'organisation des villes et les modes de vie, d'adapter les infrastructures et les habitats et de converger d'un urbanisme plan vers un urbanisme spatial.

Un urbanisme compact permet d'économiser de l'espace foncier, de

diminuer la consommation énergétique par habitant en maîtrisant les besoins en transport et en facilitant l'accès et l'utilisation des transports en commun, mais aussi de rapprocher habitat, services et équipements et de développer des espaces publics (placettes, parcs, pistes cyclables, aires de jeux, promenades arborées...) au profit de la qualité du cadre de vie de tous les habitants.

Le sous-sol, réserve stratégique d'espaces, s'impose logiquement comme un volume privilégié pour construire les villes denses de demain et jouer un rôle primordial pour répondre aux nouveaux enjeux de l'aménagement urbain. ■

Extrait de blog

DOMINIQUE BIDOU, (extrait de son blog personnel) président du CIDB

Le Développement Durable par les mots

Un mot, un mot courant, de la vie de tous les jours, et une approche du Développement Durable, inspirée par ce mot. Chaque mot, pris dans l'actualité ou au fil d'une conversation, donne l'occasion d'une réflexion sur le Développement Durable.

SOUTERRAIN :

Un mot plein de mystère, qui évoque les catacombes et les chauves-souris, quand ce n'est pas la musique « underground ». Nous sommes déjà au cœur du Développement Durable, avec plusieurs approches caractéristiques : les carrières, donc ressources ; des lieux de réunion et de refuge, deux fonctions importantes pour une société qui veut « durer » ; la richesse biologique, la création culturelle. Le sous-sol constitue un milieu à part entière, avec ses caractéristiques physiques et biologiques : résistance à la pression, nappes et rivières souterraines, cavités, matériaux, vie animale et végétale. Pour ouvrir vérita-

blement le champ du possible, et trouver de nouveaux espaces dans les centres urbains, pour quoi ne pas explorer les possibilités offertes par le sous-sol ? Le sous-sol est plein de ressources. Il procure des matériaux et de l'eau ; il apporte de l'énergie, soit qu'il contienne des réserves d'eau chaude pour la géothermie, soit tout simplement par son inertie thermique. La température du sous-sol étant constante à partir d'une certaine profondeur, on peut réchauffer l'air des maisons pendant l'hiver, ou le refroidir pendant l'été. On peut aussi y installer des « pompes à chaleur ». Le sous-sol est en soi une ressource. Il offre un espace, ou

plutôt un volume, disponible au-dessous des maisons, des places et des rues. On y a depuis longtemps installé des tuyaux d'alimentation en eau, des égouts, des réseaux électriques, des lignes téléphoniques, des tunnels, des parcs de stationnement et bien d'autres choses encore comme le métro. On commence à y mettre des tuyaux pour aspirer les déchets. Ce volume stratégique qui est sous nos pieds ne doit pas être gâché par une utilisation hâtive et sans réflexion sur l'avenir. Adaptabilité et réversibilité, deux vertus cardinales du Développement Durable, s'appliquent là comme ailleurs. Parmi les grands enjeux des centres

urbains, se trouve la livraison des marchandises en ville. Encore une fonction nouvelle pour le sous-sol !

Libérer des espaces en surface, ou permettre l'implantation de fonctions nouvelles dans les centres, le sous-sol a un bel avenir devant lui. Une condition est nécessaire pour que le sous-sol joue pleinement son rôle : qu'il soit pris en considération dans les programmes de développement urbain et les documents d'urbanisme. Le sous-sol, et l'occupation du sol ne sauraient être traités indépendamment l'un de l'autre. Le Développement Durable des villes, c'est aussi de la « bonne gouvernance ». ■

Les ressources du sous-sol

Le sous-sol met à disposition des villes quatre types de ressources précieuses dont il faut tirer profit pour répondre aux nouveaux défis des aménagements urbains.

Photo : A. Beraud



→ L'espace souterrain, une réserve précieuse d'espaces.

L'ESPACE

L'espace souterrain constitue une réserve très importante pour satisfaire les multiples fonctionnalités de

la ville sans nuisances pour les habitants en surface. Un apport de volumes dans lesquels il est possible d'aménager des espaces de stockage, de transport, de réseaux, de services au bénéfice d'une meilleure fluidité et cohérence des activités, des échanges et des livraisons en surface.

L'ÉNERGIE

Le sous-sol offre un gisement considérable de chaleur. L'énergie thermique du sous-sol est une énergie facilement exploitable, propre et renouvelable. Elle peut être utilisée pour satisfaire les besoins en chauffage, en climatisation et en eaux chaudes pour les habitations et les

locaux de surface. L'utilisation de cette ressource géothermique souterraine permet de réduire la consommation en énergie des bâtiments, voire de créer des aménagements à énergie globale positive. Le sous-sol offre aussi une inertie thermique particulièrement utile pour certains usages (stockage de froid et de chaud).

LE MATÉRIAU MINÉRAL

Le sous-sol représente un stock et un gisement potentiel de matériaux (sable, calcaire, argile...) dont la ville a besoin en surface pour développer ses aménagements.

Les matériaux extraits des sous-sols des villes ou issus du creusement

des ouvrages souterrains peuvent être exploités et valorisés pour la construction des ouvrages en surface, ce qui permet de compenser en particulier la raréfaction de la ressource en granulats.

L'exploitation sur site des matériaux extraits du sous-sol permet aussi de minimiser les impacts liés aux transports des matériaux en particulier en zone urbanisée.

L'EAU

Les eaux souterraines peuvent assurer les besoins en eaux industrielles et domestiques des villes. Mais les nappes situées sous les villes doivent être protégées de toute pollution. ■

Le Projet National Ville 10 D, ville d'idées

L'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) milite depuis de nombreuses années pour un aménagement concerté du sous-sol, pour la promotion de l'intérêt de l'utilisation raisonnée et optimale de l'espace souterrain et pour en faire un outil de reconquête urbaine. Son action vise à réfléchir à une meilleure utilisation du sous-sol des villes et à explorer les conditions de son utilisation pour répondre aux problématiques d'une ville dense et durable.

Les diverses réflexions des experts de l'AFTES ont abouti, en partenariat avec l'Institut pour la Recherche appliquée et l'Expérimentation (IREX), au lancement du Projet National intitulé **Ville 10 D** : Différentes Dimensions pour un Développement urbain

Durable et Désirable Décliné Dans une Dynamique « Dessous-Dessus ». L'objet du **PN Ville 10 D** est de démontrer que l'utilisation optimisée de l'espace souterrain des villes peut contribuer au développement d'un urbanisme durable et que le sous-sol peut constituer une opportunité complémentaire pour l'aménagement en surface.

Le projet **Ville 10 D** vise à développer une recherche appliquée pour faire émerger les conditions d'un nouveau type de planification de l'aménagement des villes par une meilleure prise en compte des interactions entre la surface et le sous-sol. Il a pour ambition d'améliorer la connaissance sur la ressource que représente le sous-sol et de démontrer qu'il existe une alternative crédi-

ble au seul aménagement de surface. Il vise à sensibiliser et convaincre les décideurs et l'opinion publique de l'intérêt, du bien-fondé et de l'évidence d'utiliser la richesse que constitue le sous-sol en site urbain.

Le **PN** mobilise des chercheurs, des organismes, des entreprises et des bureaux d'ingénierie, des aménageurs urbains, des collectivités territoriales... La première assemblée générale du **PN** s'est tenue en novembre 2012, elle a concrétisé le lancement du projet et mis en place l'organisation et les structures de pilotage. Le **PN** va permettre d'identifier :

- les fonctions urbaines qui peuvent être transférées en sous-sol ;
- les synergies potentielles entre les aménagements de surface et en souterrain ;

■ les conditions d'appropriation et d'acceptation par l'homme de ces nouveaux volumes ;

■ les freins culturels, juridiques, sociaux, réglementaires, techniques, économiques, psychologiques qui s'opposent à l'utilisation du sous-sol urbain ;

■ les pistes et actions permettant une meilleure prise en compte de cet espace par les concepteurs, les aménageurs, les architectes et les gestionnaires des villes.

Il permettra de mettre au point des recommandations, des méthodologies, des guides de bonnes pratiques et des outils destinés aux divers acteurs de la ville, pour permettre de développer un nouveau modèle de ville dense et durable. ■

Aménagements potentiels en souterrains

L'espace souterrain, extraordinaire réserve d'espaces, peut satisfaire de très nombreuses fonctionnalités de la ville et accueillir des services urbains multiples.

Photo : Vicat



→ La « Dorsale de Monaco », principauté de Monaco.

Photo : A. Berraud



→ Le tunnel de l'A86.

ESPACES ET RÉSEAUX DE SERVICES

- Galeries marchandes, centres commerciaux.
- Centres sportifs, piscines.
- Lieux culturels.
- Salles de conférence.
- Salles d'archives.
- Laboratoires de recherche.
- Aires techniques et de maintenance.
- Espaces multi-usages.
- Galeries multiréseaux pour les divers réseaux des concessionnaires.

RÉSEAUX DE TRANSPORT ET DE LOGISTIQUE

- Réseaux de transports en commun : bus, car, réseau ferré, métro.
- Stations de transports en commun et gares ferroviaires.
- Voiries souterraines.
- Parcs de stationnement.
- Centres de stockage, dépôts de marchandises et d'approvisionnement des commerces.
- Réseaux de livraison (automatisés) des marchandises et de logistique du « dernier kilomètre ».
- Plates-formes multimodales.

RÉSEAUX ET ESPACES DE VALORISATION DES DÉCHETS

- Usines d'incinération d'ordures ménagères.
- Centres de traitement des déchets.
- Stations d'épuration des eaux usées.
- Réseaux de collecte pneumatique des déchets.

RÉSEAUX DE DISTRIBUTION ET D'ASSAINISSEMENT DES EAUX

- Réseaux d'assainissement des eaux usées.
- Réseaux de distribution d'eaux potables.
- Réseaux de collecte des eaux pluviales.
- Collecteurs d'orage.
- Tunnels réservoirs.

ESPACES ÉNERGIE, CHAUFFAGE ET CLIMATISATION

- Centres de stockage d'énergie.
- Centrales de froid et de chaud.
- Centrales géothermiques.

Les galeries multiréseaux

Le concept de galeries multiréseaux consiste à regrouper dans une galerie commune et visitable (d'accessibilité contrôlée), utilisable par l'ensemble des opérateurs des services urbains en réseaux, les multiples conduites et canalisations servant à transporter les divers flux urbains (électricité, gaz, téléphone, fibre optique, eau chaude...).

Ce type de galerie offre une solution alternative aux pratiques traditionnelles où chaque opérateur enfouit séparément ses réseaux dans des tranchées différentes.

LE PN CLÉ DE SOL

Le concept a fait l'objet au début des années 2000 d'un Projet National de recherche, piloté par l'IRESX et regroupant de nombreux acteurs, intitulé : **Clé de sol**.

Les galeries multiréseaux offrent de nombreux avantages pour les collectivités en particulier :

- réduction de l'encombrement du sous-sol ;
- réduction des coûts d'entretien et de maintenance des réseaux ;
- réduction des gênes et nuisances aux usagers générées par les travaux d'entretien et de nouvelles poses ;
- amélioration de la surveillance des réseaux, de la maintenance et de la connaissance des réseaux et de leur éventuelle obsolescence ;
- amélioration de la sécurité d'intervention pour les ouvriers et les usagers, en particulier réduction des risques encourus lors de la réalisation de travaux à proximité des réseaux ;
- prévention des fuites ;
- maîtrise de la gestion de l'ensem-

ble du patrimoine urbain constitué des divers réseaux.

UNE AVANCÉE MAJEURE

Les réflexions et recherches du Projet National ont abouti à la mise au point, à destination des acteurs de la ville et des réseaux urbains, des guides synthétisant les informations nécessaires :

- à la conception technique des galeries : géométrie de l'habillage et remplissage par les réseaux ;
- à la gestion, l'exploitation et la maintenance des galeries ;
- à l'évaluation et la prévention des risques éventuels ;
- aux choix et critères comparatifs des techniques ;
- au montage juridique et financier des projets et à l'analyse en coût global des solutions.

La création de galeries multiréseaux s'avère très pertinente, en particulier à l'occasion de projets d'aménagements urbains structurants nécessitant un réaménagement des réseaux enterrés tels que :

- les lignes de tramway et de transports en commun en site propre ;
- les requalifications urbaines : quartiers historiques, zones piétonnes ;
- la création de ZAC ;
- la création de réseau de chauffage urbain...

Le concept de galeries multiréseaux offre une avancée majeure innovante aux collectivités et participe à la valorisation de l'espace souterrain dans l'aménagement global de la ville durable. ■

Les réponses du sous-sol

Le sous-sol apparaît comme une réponse pertinente à la création d'une nouvelle urbanité et une véritable requalification urbaine. Il offre une extraordinaire réserve d'espaces pour restructurer et réorganiser les villes en profondeur. Disponible partout sous les villes, il répond aux enjeux urbains de compacité, d'intensité, de circuits courts, de qualité urbaine.

UNE RESSOURCE POUR UN DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE

En se développant au-delà de ses utilisations actuelles (assainissement, métro, parking), il peut répondre à de nouvelles fonctionnalités, multiplier les possibilités d'aménagement et permettre une proximité et une mixité des composantes urbaines. Son exploitation offre des opportunités pour endiguer l'éta-

lement en surface et créer des volumes pour accueillir les fonctions urbaines qui sont actuellement rejetées en périphérie des villes.

Les ouvrages souterrains sont une véritable ressource pour un développement urbain durable car ils permettent :

- de structurer la ville en profondeur et de manière cohérente ;
- de faire face à la croissance démographique en réglant la problématique de la pénurie du foncier en faisant cohabiter dans des villes restant vivables des populations plus nombreuses ;
- de décloisonner et relier les hommes ;
- de rétablir des circuits courts de services aux habitants ;
- d'assurer des fonctions logistiques ou de production que l'on trouve en général dans les zones industrielles en périphérie des villes et qui se

trouvent ainsi à proximité des zones d'habitation ;

- de fluidifier la circulation automobile en surface et libérer l'espace pour créer des zones piétonnes ;
- d'améliorer le transport de personnes et le transport de marchandises en ville notamment pour la livraison du dernier kilomètre ;
- d'offrir une fluidification et une cohésion des échanges et des déplacements et donc une réduction des temps de transport ;
- de développer des réseaux de transports en commun reliant les quartiers périphériques aux centres urbains et permettant de réduire les temps de parcours et faciliter les déplacements ;
- d'assurer des liaisons en parfaite continuité sans perturber les activités en surface et donc en réduisant les risques d'encombrement ;
- de diminuer le besoin de mobilité

et simplifier l'accès aux transports collectifs ;

- d'accueillir des infrastructures de transport, des espaces de logistique, des réseaux de distribution des flux, sans nécessiter des emprises en surface ;
- de construire sans obstacle physique des ouvrages en trois dimensions ;
- de réaliser des installations complexes à flux multiples qui peuvent être interconnectées ;
- de sécuriser les équipements ;
- de mettre à disposition des volumes importants et de créer des zones de stockage et des espaces de service qui réduisent la pression sur l'espace à l'air libre et permettent de valoriser la surface pour d'autres usages ;
- d'éviter les impacts préjudiciables générés par la coupure de quartier par une infrastructure au sol ;
- de conserver des espaces nobles

en surface et libérer de l'espace à l'air libre pour la création d'espaces verts et de zones piétonnes ;

- d'offrir un lieu privilégié de stockage qui protège, confine et isole ;
- de construire des ouvrages moins sensibles aux catastrophes naturelles telles que les séismes, ouragans et offrant une parfaite inertie aux aléas climatiques,
- d'exploiter et de valoriser la protection naturelle (mécanique, thermique, hydraulique) apportée par le sol ;
- d'améliorer la résilience de la ville, c'est-à-dire la capacité de ses aménagements à s'adapter aux évolu-

tions climatiques ou faire face aux risques naturels ou technologiques avec le minimum de dommages possible ;

- d'atteindre la compacité et l'intensité urbaine en favorisant une mixité fonctionnelle et autorisant des synergies nouvelles et une proximité des diverses composantes urbaines ;
- d'améliorer la qualité de la vie urbaine, de contribuer au fonctionnement d'une ville dense et fluide en assurant une cohabitation verticale des fonctions urbaines ;
- d'offrir un environnement climatique à température constante, ce qui

permet un excellent bilan thermique des activités qui y sont implantées ;

- de protéger les équipements vis-à-vis des événements climatiques extérieurs : neige, forte chaleur, froid intense, effets du changement climatique ;
- de concevoir des ouvrages insensibles aux aléas climatiques et aux vibrations, limitant les émissions de vibrations vers l'extérieur ;
- de favoriser la création des trames verte et bleue ;
- de réaliser des équipements et des structures économes en énergie, voire à énergie positive ;

- de permettre des économies d'énergie en assurant la climatisation de locaux en surface par extraction de l'air chaud du sous-sol ;
- de réduire la pollution et les nuisances sonores ;
- de créer des volumes pour stocker l'eau et ainsi écrêter les fortes pluies ;
- de préserver la biodiversité et l'environnement naturel.

L'espace souterrain, outil de reconquête urbaine, offre une ressource stratégique et un potentiel considérable pour la création des villes désirables et résilientes de demain. ■

Quelques aspects techniques et financiers

L'organisation de l'espace souterrain nécessite une planification préalable des aménagements avec une cohérence, une harmonie, une continuité et une complémentarité parfaites entre le sous-sol et la surface et une vision prospective à long terme sur les futurs besoins au cours des prochaines décennies. Le développement de la ville en souterrain doit être abordé dans sa globalité. Il nécessite une approche pluridisciplinaire de la conception et de la gestion des infrastructures urbaines et une recherche de synergies potentielles surface/sous-sol en termes de fonctionnalités, de mutualisation des usages, d'efficacité énergétique et de réduction des impacts environnementaux.

UN VÉRITABLE VOLUME URBAIN

La planification doit se faire en cout global sur la durée de vie des aménagements en intégrant les gains favorables au sous-sol.

L'espace souterrain n'est pas une ville à l'envers. Il doit se ramifier horizontalement et verticalement et être conçu comme un prolongement de l'espace de surface.

Il ne doit pas devenir la « banlieue » de l'espace à l'air libre et une juxtaposition d'ouvrages et de réseaux fonctionnels, mais un véritable volume urbain en parfaite cohérence avec l'espace de surface. Il doit être conçu avec le maximum de modularité pour faciliter la reconversion et les adaptations ultérieures et l'évolution des usages. Il convient d'éviter le cumul d'ouvrages à usages cloisonnés qui aboutit à une multiplication des réseaux ou à des aménagements dont l'évolution et l'adaptation ultérieure soient impossibles. Il ne doit plus être conçu avec une simple vision fonctionnelle mais avec une conception architecturale d'espace habité par l'homme. Les aménagements souterrains nécessitent une intégration et des interfaces entre les équipements de

surface et les équipements souterrains pour une nouvelle organisation spatiale des fonctions urbaines et une valorisation mutuelle, dans une logique de coexistence en termes d'usage et de fonctionnement.

Le sous-sol a déjà permis la réalisation en France de grands projets tels que les réseaux de métro et les galeries d'assainissement. Mais le sous-sol des villes est rarement occupé aujourd'hui avec un souci de rationalisation.

Les techniques de reconnaissances géotechniques préalables, de suivi en cours de chantier et le développement des outils d'analyses mathématiques et numériques permettent de limiter désormais les risques lors de la réalisation des ouvrages, de diminuer les incertitudes sur les coûts et de mieux maîtriser les aléas de chantier.

Les technologies de construction des ouvrages en souterrain ont considérablement évolué et permettent aujourd'hui de réaliser tout

type d'ouvrages en sous-sol. On sait aujourd'hui parfaitement creuser de grands tunnels et espaces souterrains en maîtrisant les coûts, les délais et les aléas.

UN COÛT GLOBAL PLUS FAIBLE

Les constructions en sous-sol ont du fait de leur faible exposition aux agressions climatiques de longues durées de vie. Elles sont en général plus coûteuses en terme d'investissement mais offrent des avantages en phase de construction (rapidité d'exécution, faibles gêne et nuisances aux usagers en surface...), en matière d'entretien et de maintenance des ouvrages ainsi que des gains collatéraux (libération d'espaces en surface, confinement offert par le sous-sol...) et environnementaux indiscutables (faibles nuisances, non-coupeure du paysage). Le surcoût initial de construction est aussi largement compensé par la valorisation des emprises disponibles en surface. ■

Les solutions constructives à base de coulis, mortiers et bétons

Les techniques à base de **coulis**, de **mortiers** ou de **bétons** contribuent à la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages souterrains. Elles sont utilisées soit pour permettre ou faciliter la réalisation des ouvrages (injection, soutènement en béton projeté, prévoûte en béton, calage de voussoirs en béton, etc.), soit pour constituer le revêtement définitif des tunnels, des galeries et des espaces souterrains.

Les solutions constructives pour travaux souterrains sont multiples et adaptables aux caractéristiques des différents projets à réaliser.

On distingue les ouvrages réalisés « sous terre » et les ouvrages réalisés « à ciel ouvert » qui font appel à des techniques différentes.

Les progrès de ces dernières années dans les techniques de creusement, de soutènement et de revêtement et l'évolution des performances des matériaux permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous types de terrains avec des cadences d'excavation de plus en plus élevées, une plus grande fiabilité et une sécurité accrue pour les ouvriers.

LES TRANCHÉES COUVERTES

La technique des **tranchées couvertes** consiste à réaliser une tranchée dans le sol, à exécuter l'ouvrage à ciel ouvert, puis à le recouvrir en général par un remblai. Elle s'applique pour tous types d'ouvrages routiers, autoroutiers et ferroviaires. Les différentes techniques de réalisation sont fonction du mode de maintien en place des versants de la fouille et de la présence éventuelle de la nappe phréatique.

La couverture de la tranchée permet de rétablir, si nécessaire, la circulation en surface ou d'aménager des

parkings ou des espaces verts ou éventuellement des constructions.

La tranchée est en général réalisée au sein d'une fouille talutée qui est remblayée après réalisation de l'ouvrage.

Une autre technique consiste à réaliser l'ouvrage en sous-œuvre (terrassement sous dalle ou en « taupe »). Après avoir réalisé les piédroits (en parois moulées) et la dalle de couverture, les sols situés à l'intérieur des parois sont excavés à l'abri de cette dalle. Elle permet de limiter l'impact du chantier en surface (mis à part la fenêtre d'accès, par laquelle sont évacués les déblais). Le radier en béton est coulé en fond de fouille, une fois le terrassement terminé.

La **dalle** peut être en **béton armé ou précontraint** coulé en place ou constituée de poutres préfabriquées par prétension (de type PRAD ou en forme de T inversé mises en place de manière jointive).

LES PAROIS MOULÉES

Ce sont des ouvrages de fondations en béton armé, utilisées comme structure définitive pour la réalisation de nombreux ouvrages. Ancrées dans une couche résistante étanche, elles permettent d'excaver en toute sécurité sous la nappe phréatique. Elles assurent simultanément trois fonctions : soutènement, portance et étanchéité.

La technique se prête à la réalisation d'une grande diversité d'ouvrages dans des sites et des conditions géotechniques très variés. Elle permet de réaliser des ouvrages de formes et de dimensions diverses jusqu'à des profondeurs très importantes :

- parois de soutènement pour murs latéraux de tranchées couvertes, de parkings souterrains ;

- parois circulaires pour la réalisation de bassins d'orage, de puits de ventilation de tunnels ;

- grandes fouilles en site urbain ;

- puits et enceintes cylindriques de grand diamètre à forte profondeur ;

- tranchées en site urbain à l'air libre ou enterrées : voies autoroutières ou routières, voies ferrées ;

LE BÉTON PROJETÉ

C'est un béton mis en œuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur une paroi par un jet d'air comprimé.

Cette technique permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur et d'épouser parfaitement le profil de l'excavation.

Il existe deux techniques de projection :

- par voie sèche ;

- par voie humide.

La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors de la fabrication du béton, soit lors de l'application du béton).

La technique du **béton projeté** est utilisée comme :

- soutènement de parois de galeries ou de puits : ce soutènement est mis en œuvre immédiatement après excavation du front de taille, ou ultérieurement si le terrain est stable ;

- soutènement provisoire de front de taille d'ouvrages en cours de creusement.

DES REVÊTEMENTS ET DES VOUSOIRS

Le **revêtement** d'un tunnel ou d'un ouvrage souterrain est la structure résistante placée au contact de l'excavation. Il permet d'assurer la stabilité mécanique à long terme de l'ouvrage et de contribuer à son étanchéité.

On distingue deux principales techniques de réalisation des revêtements selon le procédé d'excavation utilisé :

- **revêtement en béton coffré non armé** ;

- **revêtement en voussoirs préfabriqués en béton armé**.

Après excavation du terrain par la méthode traditionnelle à l'explosif ou par attaque ponctuelle, le revêtement est, en général, constitué d'une **voûte en béton coulée en place** dont l'épaisseur varie entre 30 et 45 cm.

On utilise désormais des bétons autoplaçants qui facilitent la mise en œuvre du béton et permettent d'obtenir, sans vibration, un parfait remplissage des coffrages.

Le **revêtement** d'un tunnel, foré à l'aide d'un tunnelier est composé d'une succession d'anneaux juxtaposés mis en place à l'arrière du bouclier pour assurer immédiatement la stabilisation des terres. Chaque anneau est constitué d'un assemblage d'éléments appelés **voussoirs préfabriqués en béton armé**, d'épaisseur courante de 20 à 30 cm.

Des essais réalisés sur des **bétons fibrés** avec des **fibres polypropylène** (à des dosages de 1,5 à 2 kg/m³) ont démontré l'efficacité de ces fibres vis-à-vis des risques d'éclatement du béton lorsqu'il est soumis à des températures élevées.

« L'habillage » des ouvrages souterrains est destiné à améliorer l'esthétique de l'ouvrage et le confort des usagers. Il peut être réalisé à l'aide d'une **coque mince en béton** qui est, soit accrochée à la voûte, soit autostable. Les traitements architectoniques du béton de la coque permettent d'améliorer l'ambiance intérieure de l'ouvrage. ■