

# Solutions béton

Le Développement Durable, un puissant stimulant pour la créativité	P. 2
Un « durable » peut en cacher un autre	P. 3
Une profession mobilisée depuis longtemps	P. 4
Le béton s'inscrit dans le site	P. 5
Le béton au cœur de la ville	P. 6
L'eau et le béton : une vieille histoire	P. 7
De nouvelles performances pour ouvrir le champ des possibles	P. 8



## Le béton : un allié de choix pour des ouvrages de Génie Civil plus durables

Nous rendre la vie plus facile, plus agréable, tel est l'objet du Génie Civil, en ville et à la campagne. Il nous rend aussi la vie plus écologique, grâce aux nombreux équipements qu'il nous offre. Le béton joue un rôle particulier, du fait de sa solidité et de sa résistance, et aussi du fait qu'il est issu de ressources de proximité. Il crée du lien avec les ponts, il amène l'eau potable, emporte les eaux usées et les eaux de pluie, il protège et consolide des sites exposés à la violence des éléments, il constitue les assises des villes, avec des ouvrages souterrains. La densité, souvent évoquée pour lutter contre l'étalement urbain, trouve dans le béton un allié de choix, qui lui offre un potentiel d'aménagements en profondeur comme en hauteur. Le Génie Civil doit faire *plus avec moins*. Nous offrir plus d'aménités en prélevant moins de ressources. Le béton y prend toute sa part. **Texte : Dominique Bidou**

# Le Développement Durable, un puissant stimulant pour la créativité

Le Développement Durable est une étape essentielle dans la vie de nos sociétés. De nouvelles perspectives, nées d'une prise de conscience. Bertrand de Jouvenel l'a bien exprimée, dès 1968 : « *Nous n'habitons pas la même planète que nos aïeux : la leur était immense, la nôtre est petite* ». Nous sortons d'une époque de croissance fondée sur l'exploitation de ressources minières, qui a permis la révolution industrielle. Celle-ci nous a apporté des bienfaits dont nous ne saurions nous passer aujourd'hui, elle nous a permis de gagner en espérance de vie et en santé, elle nous a ouvert des espaces, géographiques et sociaux. Elle nous a permis d'accumuler des savoir-faire et des connaissances. C'est sur ces bases qu'il faut *construire un avenir différent*.

## VERS DE NOUVEAUX MODÈLES DE DÉVELOPPEMENT

Le contexte a changé. Nous sommes 7 milliards d'êtres humains sur la

planète, et serons bientôt 10 milliards. Chacun consomme de plus en plus, et les nouveaux arrivants dans la société de consommation ne sont pas les derniers à accentuer la pression sur les ressources disponibles. Un rapport récent évalue à 9 % du PIB le coût des dégradations de l'environnement en Chine<sup>2</sup>. Un constat qui met en évidence l'impérieuse nécessité de trouver de nouveaux modèles de développement. C'est cette recherche que nous appelons le *Développement Durable*. La croissance reste un impératif. Nos besoins seront toujours plus importants car nous sommes plus exigeants, nous vivons plus longtemps, nous sommes plus nombreux, et nous voudrions bien que chacun sur la planète puisse vivre en toute dignité. Mais elle doit prendre une nouvelle forme.

Le monde n'est plus infini, les ressources sont limitées, il faut les valoriser au maximum. Tant que l'on considèrerait la Terre comme infiniment grande, la croissance pouvait

se fonder sur une exploitation « minière » des ressources, un écrémage de tout ce qui était facile à prélever. Cette vision est aujourd'hui obsolète. La croissance se situe dans une meilleure valorisation des produits auxquels la planète nous permet d'accéder. *Faire plus avec moins*, en quelque sorte.

Le Développement Durable est un défi à relever. Point de nostalgie, de regrets d'un ordre ancien et souvent idéalisé, mais la recherche d'un nouveau futur, qui ne se situe pas dans le prolongement « naturel » du passé. Il va falloir innover, faire preuve de créativité. Le Développement Durable se révèle ainsi une chance extraordinaire. Une occasion de revisiter les techniques de production, non plus dans une perspective de croissance en volume, mais en satisfaction de besoins.

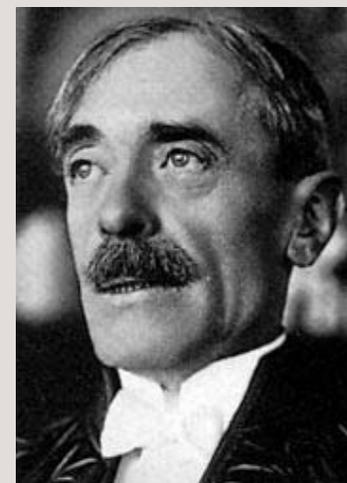
## DE NOUVEAUX DÉFIS POUR LE BÉTON

Le Génie Civil est une réponse à de nombreux besoins. Il est présent dans de nombreux domaines, pour les ouvrages d'eau potable et d'assainissement, les ouvrages d'art, les écrans acoustiques et les ouvrages pour la production ou le stockage de l'énergie, les travaux maritimes et les réseaux de toutes natures, notamment souterrains. Ces besoins sont

satisfaits en partie, mais ils se renouvellent et s'amplifient. Comment faire face tout en économisant les ressources ? Le recours au béton est ancien, et a donné d'excellents résultats. Mais ça ne suffit pas. Le béton doit relever de nouveaux défis, il doit s'améliorer sans cesse. Il le fait tant dans sa composition et ses qualités techniques que dans les usages qui en sont faits, avec toujours plus d'inventivité. ■

1 B. de Jouvenel, *Arcadie, essai sur le mieux-vivre*, Futuribles, 1968.

2 Rapport de la Banque mondiale et du Centre de recherche sur le développement du Conseil d'État chinois, *China 2030 : Building a Modern, Harmonious, and Creative High-Income Society*, février 2012.



→ « Le temps du monde fini commence », Paul Valéry, 1945.

### Témoignage

MARC MIMRAM, architecte et ingénieur

### Frugalité

Il fallait être dans une économie de matières. Dans une forme de frugalité. La condition du Développement Durable est là. C'est la dimension géographique de l'extraction et du projet, mais aussi cette hypothèse de frugalité. L'idée que l'on est dans une intention économe en moyens de production. Et ça permet de faire les voûtes d'Esquillan,

de Candela, de Nervi, des voûtes qui font 6, 7, 8 cm d'épaisseur. On est dans l'économie de moyens, de matières. Globalement, ce n'est pas économe, il faut faire des coffrages complexes, mais le béton a une capacité à être économe dans la matière qu'il met en œuvre. Ça, c'est du Développement Durable. ■

Un grand merci aux personnalités qui nous ont permis de préparer ce numéro, Marc Mimram, architecte et ingénieur, Henri Van Damme et Bruno Godart, respectivement Directeur Scientifique et chef du département Structures et Ouvrages d'Art de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux), Didier Brazillier, Directeur de l'Ingénierie à la Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est, Philippe Millard, ancien directeur des Grands travaux du SIAAP (Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne), et Jérémie Jacquemet, Chef de centre Grand Lyon de la SADE.

# Un « durable » peut en cacher un autre

Le béton défie le temps. Il est « durable », et tous les efforts sont faits pour le rendre de plus en plus durable. Un centenaire qui se porte bien. Parfois même au-delà, pour des ouvrages exceptionnels, comme des ponts ou des barrages. La longue durée de vie n'est un gage de durabilité, au sens du Développement Durable, que si le service rendu par l'ouvrage reste de bonne qualité, et adapté aux besoins du moment. L'objectif en termes de durabilité (soutenabilité) est bien de rendre le meilleur service au meilleur coût dans toutes ses composantes. La durée de vie d'un ouvrage permet de rapporter l'investissement environnemental, économique et social à son usage effectif.

Dans la pratique, il existe une gamme très étendue de ciments et de bétons qui permet de choisir en fonction des conditions d'exploitation de l'ouvrage. Certains milieux sont très agressifs, certains ouvrages devront faire face à de fortes contraintes, d'autres encore sont situés dans des zones très difficiles d'accès, où toute réparation devient

une aventure, avec des coûts qui s'envolent rapidement. Il faut donc choisir le matériau qui répond le mieux au besoin, d'une part du fait de la nature même de l'ouvrage et des fonctions qu'il aura à remplir, et d'autre part du fait des contraintes liées au milieu, des attaques et agressions potentielles dont l'ouvrage fera l'objet.

L'offre actuelle, qui ne cesse de s'enrichir avec des bétons de plus en plus performants, propose aux prescripteurs des produits adaptés à l'utilisation des ouvrages (100 ans pour les ouvrages de Génie Civil).

Ces durées se comprennent avec un bon entretien des ouvrages, mais pas de grosses réparations. Il faut par exemple prévoir la réfection des chapes d'étanchéité tous les 20 à 30 ans pour les ponts.

## LA DURABILITÉ PAR LE RECYCLAGE

La durabilité se décline aussi en nombre de vies des matériaux. Réutiliser plusieurs fois le même produit revient à économiser les matières premières et l'énergie

nécessaires à sa fabrication, déduction faite de celles nécessaires pour la déconstruction de l'ouvrage dont il provient et son reconditionnement. Le recyclage du béton est à ce titre une voie d'avenir.

## DES CAPACITÉS D'ADAPTATION

« Il reste un champ de recherche et d'innovation important : tout ce qui permet de requalifier un ouvrage plutôt que de le déclarer perdu et lancer de nouvelles constructions neuves.

On a beaucoup construit dans les années 70-80 et on va entrer dans une période avec des ouvrages âgés de 45 à 50 ans, des ouvrages avec des difficultés potentielles. Souvent ils sont utilisés dans des conditions d'usage qui ne sont plus celles du départ, avec par exemple

des charges de trafic supérieures sur les ouvrages d'art.

L'adaptabilité de la structure est une notion qui relève du concept du Développement Durable car elle permet une plus longue durée de vie même avec des usages différents non connus à l'époque de la construction. On trouve des ouvrages urbains sur lesquels on fait passer des tramways aujourd'hui. Cela provoque des sollicitations qui ne sont pas celles d'une circulation routière habituelle.

Certaines structures sont assez facilement adaptables à des évolutions d'usage, en anticipant leur renforcement à l'aide de câbles de précontrainte.

La précontrainte du béton permet des jeux de construction assez efficaces et assez astucieux », explique Didier Brazillier. ■

### 7 voies d'amélioration de la « durabilité » du béton

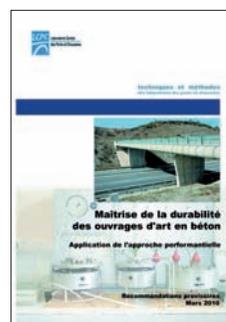
- Amélioration de l'efficacité énergétique des fours de cimenterie.
- Utilisation de combustibles alternatifs.
- Optimisation des composants du béton :
  - granulats alternatifs,
  - valorisation matière pour la fabrication des ciments,
  - produits de recyclage.
- Optimisation de la formulation du béton :
  - optimisation de l'empilement granulaire,
  - optimisation des adjuvants,
  - utilisation d'additions et d'ultrafines,
- maîtrise des pathologies potentielles du béton,
- augmentation de la durée de vie des ouvrages.
- Optimisation de la logistique de livraison des chantiers :
  - transports ferroviaires et fluviaux,
  - utilisation de matériaux de proximité.
- Conception des ouvrages :
  - structures optimisées,
  - anticipation des scénarios d'entretien et de maintenance.
- Recyclage des bétons en fin de vie.

### Choisir le béton en fonction de la durée d'utilisation de l'ouvrage

Des essais en laboratoire permettent de tester le comportement du béton face au vieillissement. Des cycles sont reproduits à une vitesse accélérée, comme le cycle gel/dégel que l'on reconstitue 300 à 400 fois en un mois. On observe aussi la résistance dans le temps à des phénomènes tels que la carbonatation, la pénétration des chlorures, l'alcali-réaction, le gonflement sulfatique.

Des indicateurs de durabilité ont été mis au point dans le cadre d'une approche performantielle. Ils ont été retenus pour caractériser en particulier les risques dans trois domaines, la corrosion des armatures, les effets du gel et les réactions de gonflement interne. Ils permettent de traduire les performances attendues de l'ouvrage, durée de vie, conditions d'exploitation, conditions environnementales et risques de dégradation, en caractéristiques techniques

exigées du béton. Il est ainsi possible d'adapter très précisément la qualité du béton aux besoins propres de l'ouvrage, du sur-mesure en quelque sorte. Sur ce point, on pourra se reporter aux recommandations du LCPC (IFSTTAR maintenant) : « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton, application de l'approche performantielle », mars 2010. ■



# Une profession mobilisée depuis longtemps

C'est la gestion des ressources et la maîtrise des rejets dans l'environnement qui sont au cœur des préoccupations de la profession.

## L'ÉCONOMIE DE RESSOURCES

C'est un souci tout au long de la chaîne, de la production du ciment à l'usage des bétons. Tout d'abord, produire du ciment en consommant moins d'énergie. Il a fallu pour cela moderniser les procédés de fabrication par une série d'améliorations techniques : passage de la filière semi-humide à la voie sèche intégrale, ajustement des dispositifs d'injection du combustible dans les fours, optimisation des rendements de la cuisson, préchauffage des matières premières avec les gaz de combustion.

Ensuite, diversifier les sources d'énergie, de manière à pouvoir intégrer des combustibles alternatifs en remplacement des combustibles fossiles dans la fabrication du ciment. L'action se poursuit sur les ingrédients entrant dans la composition du ciment. C'est ce que l'on appelle la « valorisation matière » pour la constitution du ciment. Elle consiste à substituer des matériaux aux matières premières de référence, calcaire (80 %) et argile (20 %). Ces matériaux sont des coproduits d'autres secteurs d'activité. Il s'agit de cendres volantes, issues de centrales thermiques, de laitier de hauts fourneaux, de gypse de désulfuration, et de fumée de silice. Ils permettent de réduire la quantité de clinker dans la composition du ciment, et de conférer à certains ciments des propriétés particulières. La fumée de silice, par exemple, améliore les performances mécaniques et la durabilité des bétons.

L'évolution de la qualité du béton est une autre source d'économies de ressources. Il est possible de parve-

nir au même résultat, au même service rendu, par exemple un pont ou une station de traitement des eaux, en utilisant de moindres quantités de matériaux.

Les techniques utilisées permettent aussi de parvenir à des économies substantielles. C'est la révolution du béton précontraint, par exemple, qui permet d'obtenir des structures très élancées et une excellente résistance là où il fallait accumuler des volumes considérables de matériaux, avec des ouvertures de carrière et des terrassements beaucoup plus importants.

## LA MAÎTRISE DES REJETS

Il existe une relation forte entre les cimenteries et les territoires où elles sont implantées. C'est pour 100 ans qu'une cimenterie s'installe dans un secteur. C'est une industrie lourde, qui tire sa matière première du sol, pour créer le ciment qui apporte sa résistance à des matériaux eux-mêmes issus de carrières locales pour fabriquer le béton. Un tiers des investissements de l'industrie cimentière est consacré à la réduction des impacts environnementaux. Modernisation et protection de l'environnement sont intimement liées. Cela commence dans les carrières, tant dans leur phase d'exploitation que pour leur réaménagement. Sur les sites industriels les progrès se manifestent dans tous les domaines.

Tout d'abord pour maîtriser la pollution de l'air au voisinage des installations. La filtration des gaz en sortie de cheminée a permis de réduire les émissions de poussière à des niveaux infimes, bien au-dessous des limites réglementaires. Les émissions d'oxydes d'azote (NOx) dont la production est une conséquence de la haute température dans les fours, sont en baisse régulière, - 25 % en 10 ans. Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) a quant à lui baissé

de 3/4 entre 1990 et 2003. L'impact local de l'activité industrielle est devenu très faible. Les cimenteries contribuent aussi à réduire des pollutions en utilisant des déchets comme combustibles. Elles transforment ainsi des déchets en ressources. On l'a vu il y a quelques années avec les farines animales, quand il a fallu les éliminer. Elles valorisent des sous-produits ou coproduits d'autres industries, tels que des pneus, des huiles usagées, des boues de stations d'épuration, des matières plastiques. Ces combustibles alternatifs sont sélectionnés avec beaucoup de soin, de manière à vérifier à la fois la compatibilité avec le procédé cimentier et la qualité du produit final, ainsi que leur absence d'incidences sur l'environnement et la santé des utilisateurs. La très haute température qui règne dans les fours, flamme à 2 000 °C et gaz à au moins 1 200 °C, offre une totale sécurité pour l'élimination des composés organiques, et un rendement thermique exceptionnel, de l'ordre de 95 %, pour valoriser les déchets.

Actuellement, la substitution énergétique permet chaque année de valoriser plus de 900 000 t de déchets combustibles, et d'écono-

miser 500 000 t d'équivalent pétrole pour la production du clinker. Ces économies de ressources se traduisent en réduction de rejets, déchets, polluants atmosphériques, gaz à effet de serre. Elles s'ajoutent à la valorisation matière, évoquée ci-dessus, qui permet de transformer plus de 750 000 t de déchets en matières premières.

Comme toutes les industries grosses consommatrices d'énergie, la fabrication du ciment provoque une émission de gaz à effet de serre. Un effort considérable est déployé pour réduire ces émissions, avec notamment un engagement volontaire de la profession. Il permet d'envisager de réelles perspectives de réduction. Il revêt plusieurs manières complémentaires.

■ Dans les processus de production, en consommant moins d'énergie fossile et en améliorant les rendements. Depuis 1990, les émissions de CO<sub>2</sub> ont été réduites de 20 % à la tonne de ciment.

■ Dans le transport, vers les lieux d'utilisation, en privilégiant la voie d'eau et le train.

■ Dans l'usage, en permettant de réduire les volumes utilisés grâce aux qualités des bétons et aux modalités de mise en place. ■

## Témoignage

HENRI VAN DAMME, *Directeur Scientifique de l'IFSTTAR*

### Un cercle vertueux

Les produits plus performants sont aussi les produits plus durables. Les différentes variantes de matériaux à hautes voire très hautes ou ultra hautes performances mécaniques sont aussi les matériaux les plus durables. Ils sont plus résistants aux

agressions quelles qu'elles soient, pour la raison simple que ce sont les matériaux les moins poreux, qui offrent le moins de portes d'entrée aux agressions. Qui plus est, ils sont même autoréparants dans une certaine mesure. ■

# Le béton s'inscrit dans le site



→ Pont de Tianjin en Chine. Architecte : Marc Mimram.

Sa résistance, ses qualités mécaniques font du béton un matériau particulièrement souple. Il offre aux concepteurs une remarquable capacité d'adaptation. Deux exemples illustrent ce potentiel.

La ligne LGV Est comporte 7 viaducs d'une portée supérieure à 100 m, dont certains ont été construits dans le but de préserver la biodiversité des milieux traversés. Les perturbations au sol sont réduites au strict minimum. Sur le territoire de Bourgaltroff, en Moselle, par exemple, pour préserver une zone humide et une roselière, un viaduc de 195 m a été construit avec un tablier mixte

acier-béton. Il enjambe un étang et un ruisseau.

La station d'épuration de Capo Lauruso, située dans le golfe de Propriano, en Corse, a pu s'insérer dans un site particulièrement sensible grâce au choix d'une technique d'épuration compacte, et à l'usage de plusieurs bétons permettant de répondre aux exigences spécifiques de l'installation.

## DES PAYSAGES REMODELÉS

Le béton permet aussi de composer des paysages originaux, marques nouvelles de territoires en mutation, comme à Tianjin, en Chine. La ville se développe le long d'anciennes rizières transformées en lacs. Une très forte présence de l'eau, qu'il convenait d'intégrer au projet. Marc Mimram a proposé un projet établi « sur deux critères principaux. Le premier est de se rapprocher de l'eau. On livre l'image d'un pont flottant, en rapport à l'eau, dans un dialogue très direct avec le milieu de l'eau. Et deuxièmement, grâce au béton armé, on développe un système de coques en grands voiles en béton, de 57 m. On a 10 mamelons, 5 de chaque côté, comme flottant sur l'eau. C'est la capacité ancienne de fabriquer des formes nouvelles. Ancienne parce que cette architecture des grands voiles s'est développée dans les années 50-60, avec Freyssinet et le hangar à dirigeables qu'il avait construit à Orly, ou encore Candela, Nervi ou Esquillan ».

## UNE « MARQUE » À LA FOIS LÉGÈRE ET FORTE

Le béton offre ainsi la double capacité de protéger le milieu, grâce à la légèreté des formes qu'il permet de construire, et à leur faible pression au sol, et de marquer fortement un paysage, tout en accordant la plus grande attention au « déjà là ». ■

## Témoignage

MARC MIMRAM, architecte et ingénieur

« *Nous sommes des paysagistes du béton armé* »

Vous me parlez de béton, d'infrastructures, je vous parle de service social. C'est la condition du projet. Ce qui permet de dessiner le projet, de le calculer, de le fabriquer. Le projet sert à faire l'analyse. C'est en le fondant sur les conditions du site, conditions de production, conditions matérielles, conditions économiques que l'on arrive à faire le projet. C'est un projet situé à partir des conditions du « déjà là » que j'évoquais précédemment. Le béton armé permet de le faire dans certaines conditions, de minéralité, d'orientation, d'organisation.

C'est être économe dans l'attention que l'on porte à la planète dans l'extraction, économe dans l'attention que l'on porte aux conditions du site. Économe, le terme peut être positif. Être économe, c'est observer les conditions, ne pas trop mon-

trer ses muscles, être attentif. C'est une forme d'économie. Et puis se servir de ce que la technologie, le calcul, les développements techniques nous ont permis et nous autorisent, pour être économe en matières. Il faut réaliser des prouesses économes en matières. Ce sont les conditions du Développement Durable.

Il faut avoir une philosophie plus globale de l'attention au monde et le projet serait comme la mise en cohérence de tout ça.

Il faut une mise en résonance des conditions initiales et du projet lui-même. Il y a nécessité de comprendre le protocole. Au sens scientifique du terme. Le protocole ici, le protocole durable prend toutes ses dimensions, ne se restreint pas à quelques grilles analytiques.

Ma grille d'analyse est toujours la même mais elle s'applique

aux conditions du lieu. Notre intervention n'est pas la même ici ou là. Les raisons qui portent le projet ne sont jamais les mêmes.

Je suis très influencé par l'école des paysagistes français qui a développé dans les 20 dernières années, autour de Michel Corajoud, une forme de « sensibilité instruite » du paysage. Regarder, c'est bien, et trouver les conditions de son intelligence est une véritable science que les paysagistes français ont su développer. Notre travail, par sa dimension, crée un paysage. On est des paysagistes du béton armé. Je parle de la relation au sol, de la relation à l'eau, ce sont des conditions que le béton armé peut remplir à certains moments, à travers certaines technologies. À d'autres moments, en d'autres lieux, ce sera d'autres technologies. ■

# Le béton au cœur de la ville

Le béton est un élément constitutif de la ville. Les infrastructures et les espaces publics font largement appel à ce matériau, résistant, de longue durée de vie, facile d'entretien. Il permet d'inscrire des ouvrages dans des contextes particulièrement difficiles. À Colombes (92), on a réalisé une station d'épuration « urbaine », dans un bâtiment au cœur de la ville. À Issy-les-Moulineaux (92), l'usine de traitement des déchets ménagers a été enterrée, libérant

ainsi l'espace en surface pour des développements urbains.

## VALORISER LE SOUS-SOL

Ces possibilités permettent de lutter contre l'étalement urbain, en offrant des services au cœur de la ville, sans qu'il soit nécessaire de « coloniser » des espaces ruraux. Les villes françaises pourraient valoriser leur sous-sol, ce qui contribuerait à les rendre plus compactes, tout en libérant des espaces en surface. ■

## Point de vue de l'expert

HENRI VAN DAMME, *Directeur Scientifique de l'IFSTTAR*

On retire le béton, et il n'y a plus de ville. Pensez aux infrastructures qui permettent aux villes de fonctionner, que ce soit par exemple pour l'évacuation des eaux usées ou pour les infrastructures des transports. Sans le béton, tout s'écroule. On oublie que le volume souterrain de la ville est égal sinon supérieur à celui de la vérité aérienne. Et le volume souterrain est un volume en béton. Je ne vois pas quel matériau de substitution pourrait remplacer le béton pour tous ces ouvrages souterrains. ■

## Témoignage

MARC MIMRAM, *architecte et ingénieur*

## Un art de transformation de la planète

Nous, architectes, ingénieurs, acteurs de la construction, nous sommes les acteurs de la transformation de ressources naturelles. Le béton armé est fait avec une partie de la planète, il ne vient pas de Mars. Il est fait de granulats, de ciment, et d'eau. Tous ces ingrédients sont issus de la planète. C'est un art de la transformation de la planète. Notre responsabilité est dans ce domaine sans limite. L'architecture est un art de la transformation.

La première attention à la planète, la deuxième au site, et la troisième à la transformation de tout ça en espace public. Tout cela forme des conditions de base de notre travail. Il faut être attentif aux conditions initiales, comme on dit en chimie, quelles sont les conditions initiales pour que le système se mette en marche.

À Rabat, le pont en béton fait 1,6 km de long, il permet de faire passer le tramway entre Rabat et Salé. La première

condition, c'est le service public. L'ouvrage s'inscrit dans un horizon extrêmement fragile. Il y a la médina, les oudayas, le mausolée de Hassan. Il faut y construire un lien entre les deux villes. C'est un pont qui a plusieurs séquences, une falaise, un franchissement du fleuve, et un viaduc d'accès. Cette dentelle en béton se fait à partir de quelques conditions initiales. Être dans ce lieu, attentif à cet horizon très fragile. L'attention au lieu. On parle de Développement Durable, et la première des conditions, c'est le « déjà là ». Nous ne sommes pas dans un ordre mimétique, dans un ordre de l'absence. Tout ce que nous construisons est d'une violence rare. Le paysage initie les conditions de la transformation. La première chose que nous faisons, c'est extraire des granulats de la rivière, ou de la carrière, ouvrir une brèche pour sortir ces granulats. Ce n'est pas du tout léger. Intervenir avec un pont dans une vallée, c'est évi-

demment la vallée avant et la vallée après.

Je dis ça parce que l'on nous parle de l'insertion. L'insertion, c'est l'attention, les conditions initiales du projet. Quand on intervient dans une vallée comme cela, il faut être un peu modeste. Attentif.

Il y a la capacité qu'a le béton de parler de la minéralité du site. Parler de cet horizon minéral de la falaise, pour moi c'était une évidence qu'à cet endroit il fallait que ce soit du béton. Je n'oppose pas les matériaux, ni dans leur modernité ni dans la valeur supérieure qu'ils auraient les uns par rapport aux autres. Mais dans cet univers-là il fallait libérer le ciel, s'ancrer dans le sol, parler d'un chemin gravitaire et seul le béton pouvait le faire à cet endroit-là, dans la délicatesse des assemblages du béton, du rapport au site, du rapport au sol, du rapport au ciel.

Le viaduc d'accès, 800 m d'ouvrage, on le transforme en espace public. La « sous-face »

devient un espace habité protégé par un toit qui est l'infrastructure. On est en train de réaliser un service multiple, un service de transport, d'infrastructures, mais un service public dans l'espace public – puisqu'il crée un espace public en sous-face. Et j'espère bien qu'un jour cela sera une grande Rambla couverte, un marché, un espace public qui sera offert à tous. Voilà les conditions du projet à Rabat, il y a une forme d'universalité dans la manière de regarder la question de l'appartenance et c'est cela qui forme les conditions du Développement Durable. Appartenir aux conditions du site, appartenir aux gens qui le fabriquent, l'habitant, considérer les moyens de transformer la planète et offrir un espace public partagé. L'infrastructure est un bien partagé. C'est un site et un service public. Il s'adresse au public par essence. Le lien technique entre Rabat et Salé, le lien infrastructurel, est un lien social. ■

# L'eau et le béton : une vieille histoire



→ Pose d'éléments préfabriqués en béton.

Nous pourrions remonter aux viaducs romains, avec les bétons de l'époque, mais restons dans les temps modernes. Le béton est omniprésent sur le circuit de l'eau pour deux raisons : sa résistance mécanique, et ses vertus bactériologiques. On le trouve en amont avec les adductions d'eau, les usines de traitement et les bassins de stockage, et en aval dans les canalisations et les stations d'épuration. En amont, les qualités du béton permettent de maintenir la qualité de l'eau, et en aval, sa résistance lui permet de ne pas souffrir des agressions des agents chimiques présents dans les effluents.

## POUR LES EAUX PLUVIALES

Le béton est aussi présent là où l'eau ne peut être infiltrée, pour la recueillir, la stocker et lui offrir un chemin vers des milieux accueillants. En zone urbaine, où l'imperméabilisation des sols est importante, les canalisations d'eau pluviales jouent un rôle déterminant pour lutter contre les inondations. Prenons un exemple.

Le parc Borély, dans les quartiers sud de Marseille, à deux pas de la mer, est le plus fréquenté des espaces verts de la ville. Avec son château où l'on trouve le musée des

Arts décoratifs et de la Mode, il fait l'objet de travaux pour préparer Marseille Provence 2013, capitale européenne de la culture. Pour drainer les eaux pluviales et récupérer les eaux provenant en amont du ruisseau de la Sérène, une canalisation a été installée dans le courant de l'été 2012. Dans une fouille de 2,90 m de large et 2 m de profondeur, l'entreprise a posé des éléments préfabriqués en béton, mis au point pour cette opération. Sur 500 m, ce sont 207 cadres préfabriqués, de 2,40 m de long, dont 198 pièces standards et 9 pièces spéciales pour le changement de direction (coudes de 132 à 173°), qui sont installés. L'ensemble est fabriqué localement dans l'usine BONNA SABLA de Lamanon (13). La canalisation est remblayée avec le remblai de la fouille. Il faut noter que la préfabrication permet de réaliser des ouvrages dans des délais rapides, et avec des chantiers bien maîtrisés.

## DES CHANTIERS PROPRES

Point de vue confirmé par Jérémie Jacquemet, SADE, Chef de centre Grand Lyon. « Ça me permet, à moi qui ne suis pas un « Génie Civiliste », de faire de beaux ouvrages de Génie Civil. C'est le gros avantage du béton. Que ce soit des tuyaux ou

des regards on utilise beaucoup d'éléments préfabriqués, qui pèsent parfois plusieurs tonnes. On a ainsi utilisé des produits préfabriqués pour créer un énorme bassin de régulation dans une usine. C'est génial d'avoir accès à des pièces préfabriquées qu'on peut, juste à l'aide d'une grue, descendre dans la fouille qu'on a créée. »

Les travaux ainsi réalisés atteignent une qualité remarquable. Dans les canalisations, les contrôles d'étanchéité sont rares, car il faut les vider, ce qui comporte bien des difficultés.

On profite des rares « chômages » des ouvrages, en général ceux imposés par l'entretien des matériels immergés. La pose des éléments préfabriqués et des joints doit faire l'objet des plus grands soins. D'autant que les sols évoluent, ce qui produit des tensions sur les ouvrages enterrés. « Pour les réceptions de travaux, on allait en chaussées. Une réception d'ouvrages d'assainissement en bottes, c'est que les gens ont mal travaillé. Cela impose que l'ouvrage soit strictement étanche », explique Philippe Millard. ■

## Témoignage

**PHILIPPE MILLARD**, ancien directeur des Grands Travaux du SIAAP

### La raison majeure pour laquelle on utilise le béton, c'est sa résistance

On ne peut pas mettre l'eau usée directement en contact avec le sol. On doit la traiter dans des cuves, en partie enterrées. Ce sont des cuves en béton. Le béton, c'est mécanique, c'est étanche. La première usine a été construite à Achères avec une première tranche en 1940. Le béton est encore en bon état aujourd'hui. Pour la partie sous l'eau, la partie immergée, il n'y a pas de souci. Dans la partie émergée, les zones de marnage peuvent être attaquées. Les eaux usées contiennent des produits soufrés avec de l'hydrogène sulfuré, H<sub>2</sub>S, qui, concentré, attaque le béton. Dans cette partie, il faut donc parfois protéger le béton. On applique un revêtement stratifié à base de résine époxy. Sa mise en œuvre

doit être très soignée et il faut un cahier des charges très strict des différentes phases d'application. La boue issue des différentes phases du traitement de l'eau fermente dans des digesteurs, réservoirs en béton fermés dans lesquels elle séjourne environ 20 jours en produisant du gaz riche en méthane. À Achères, après vidange des digesteurs de la troisième tranche mis en service trente ans auparavant, sans interruption, l'inspection des bétons a montré des ouvrages en parfait état. Les structures en béton précontraint n'avaient aucune altération. Seule l'étanchéité supérieure des jupes et des coupoles pour contenir le gaz de digestion a été refaite, et on est reparti pour 30 ans. ■

# De nouvelles performances pour ouvrir le champ des possibles

Les bétons les plus performants sont aussi les plus durables au sens de la longévité, ils sont plus compacts et économes en matériaux, ils sont plus techniques à réaliser, et favorisent un enrichissement des compétences des entreprises et de leurs personnels.

## LA BONNE PERFORMANCE

Au cours des dernières années, on a ainsi vu apparaître des bétons aux performances de plus en plus ambitieuses, avec notamment les bétons à hautes performances (BHP), et les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP).

Un programme national de recherche de 1995 à 2000 sur les BHP a permis de mettre au point des modes opératoires, de comparer des ouvrages similaires réalisés avec des bétons de différentes qualités. Il a permis des progrès multiples, tant sur la formulation des bétons que sur les techniques de mise en œuvre. Il en résulte notamment une

méthode dite « performantielle », qui conduit à un ajustement plus précis des performances recherchées en particulier dans le domaine de la durabilité, et donc des qualités exigées pour le béton, par rapport aux usages et aux conditions d'exploitation des ouvrages.

« On a des gisements potentiels de fortes évolutions en termes de conception et d'approche des ouvrages. À chaque fois qu'on a fait des ouvrages un peu innovants, on a rencontré des bureaux d'études ou des entreprises qui, une fois passée la découverte, se prennent au jeu, se motivent, trouvent ça beaucoup plus intéressant que de faire toujours la même chose. C'est bon pour les neurones des uns et des autres. Il faut des hommes compétents et ouverts qui s'intéressent aux évolutions des matériaux de manière à pouvoir jouer sur les diverses palettes possibles de solutions techniques sans juste recopier ce qu'ils ont vu chez le voisin », explique Didier Brazillier.

### Point de vue de l'expert

**BRUNO GODART, IFSTTAR**, chef du département Structures et Ouvrages d'Art

### Toute une gamme de bétons

L'intérêt du béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) est de consommer moins de béton et de réaliser des structures plus fines. On peut obtenir des portées plus longues, réduire le nombre de piles et alléger les fondations, ce qui est important du point de vue de l'environnement. Ces matériaux sont en outre extrêmement résistants aux diverses agressions. Le bilan environnemental est souvent en faveur du BFUP, car il utilise moins de matières, et il nécessitera moins d'entretien. Entre les bétons traditionnels et les BFUP, il y a toute une gamme de bétons, à hautes et très hautes performances, sans oublier les bétons autoplaçants. Il existe aujourd'hui une grande variété de bétons et il faut choisir pour chaque projet le béton qui convient le mieux, en fonction de bilans environnementaux et économiques, élaborés sur le cycle de vie de l'ouvrage. ■

## L'IMPORTANCE DE LA SURFACE

La surface extérieure du béton est une zone de contact entre l'air et les matériaux, avec deux aspects à souligner : l'esthétique et la capacité d'élimination de polluants.

Une protection à base de dioxyde de titane rend les bétons autonettoyants. C'est une réaction d'oxydation par l'air. Le béton devient capable de décomposer les salissures qui se déposent sur sa surface et certains polluants atmosphériques tels que les oxydes d'azote et les composés organiques volatils. « En atmosphère

urbaine on observe une réduction des taux d'oxyde d'azote dans l'air, en plus de l'aspect autonettoyant. En zone urbaine dense, la réduction est de l'ordre de 50 % avec des trafics automobiles de plusieurs milliers de voitures à l'heure », précise Henri Van Damme.

Il manque toutefois au béton ce qui fait la beauté du patrimoine, la patine qui se forme sur la pierre naturelle. Une mince couche d'altération en surface qui protège le reste. « Ce serait fantastique de donner au béton une patine », conclut Henri Van Damme. ■

## Témoignage

**DIDIER BRAZILLIER**, Direction interdépartementale des Routes Centre-Est, Directeur de l'Ingénierie

### Une conception structurelle plus intéressante

Un des axes majeurs de développement du BHP était justement la durabilité. C'est un béton obtenu avec une optimisation de l'empilement granulaire et souvent avec adjonction de fumée de silice. Un béton très compact avec une porosité extrêmement faible, qui résiste beaucoup mieux que le béton traditionnel aux attaques des agents chimiques. Avec ces bétons, on augmente fortement la durée de vie des ouvrages, tout en minimisant les opérations de maintenance et d'entretien.

Par rapport à un ouvrage classique, les analyses de cycle de vie (ACV) ont montré que les solutions BHP représentaient un gain extrêmement

important. Bilan moins favorable pour un mètre cube de béton mais moitié moins de matière à fonctions équivalentes.

De plus lorsque le terrain impose des fondations sur pieux, alors, le gain de poids du tablier se traduit aussi sur les fondations.

Ce sont des bétons fluides, qui se mettent en œuvre de manière très facile, bien que plus compacts.

La demande doit être faite par les maîtres d'ouvrage qui cherchent un gain de poids et de durabilité. Ça fait aussi des ouvrages plus élancés, il y a des possibilités de conception structurelle bien plus intéressantes. ■