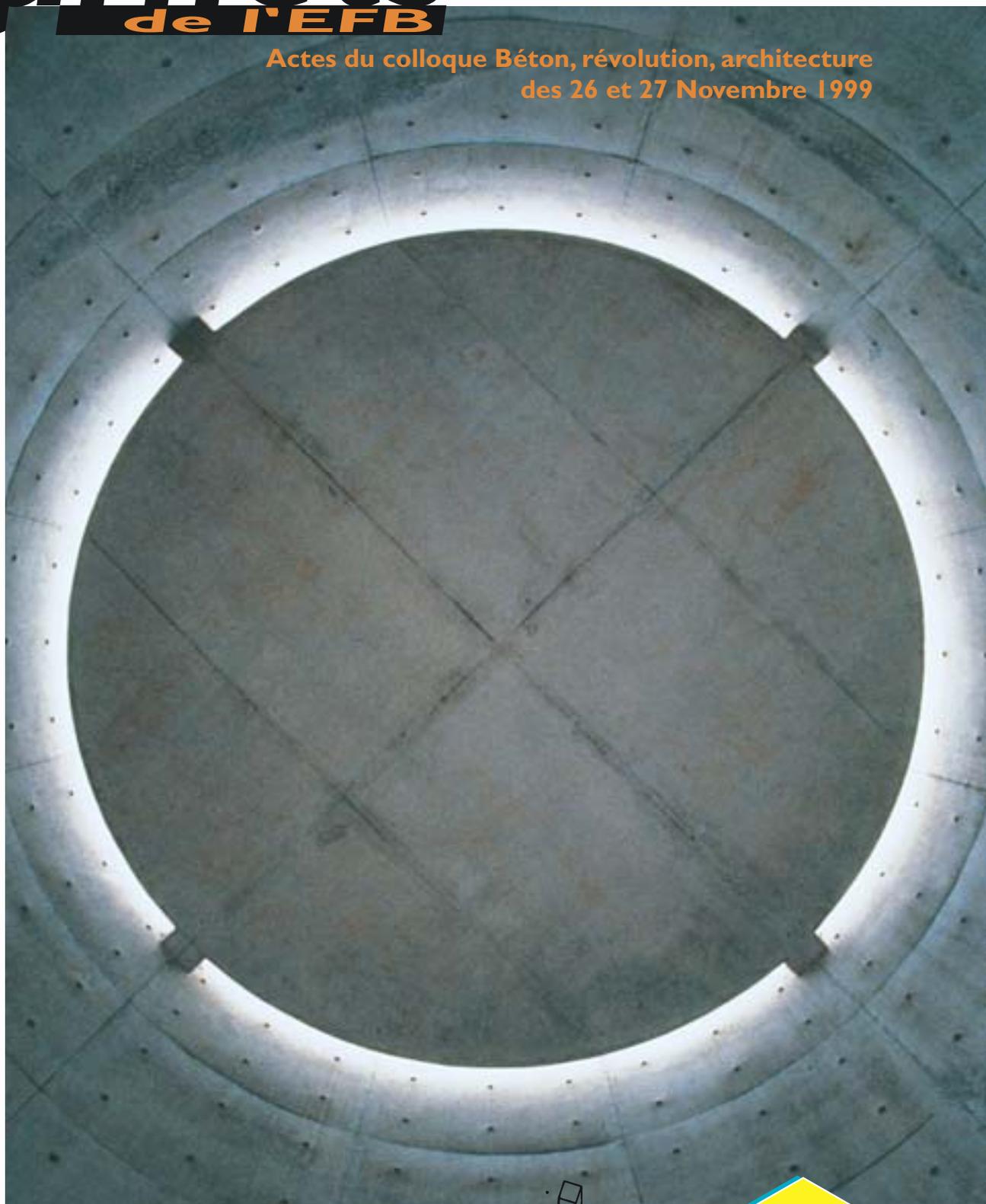


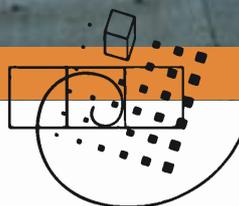
Les Carnets de l'EFB

Actes du colloque Béton, révolution, architecture
des 26 et 27 Novembre 1999



2 0 0 0

numéro 4



ECOLE
FRANÇAISE
DU BETON



Les carnets de l'École Française du Béton - Photo 1^{ère} de couverture : UNESCO - Paris - Espace de méditation, architecte : Tadao Ando, photo : Philippe Maffre - Photo intérieure de couverture : cœur de la Défense, architecte : J.-P. Viguier, photo : Guillaume Maucuit-Leconte - Directeur de la publication : Yves Malier - Rédacteur en chef : Jacques Cortade - Crédits photos : Hervé Abadi, Betocib, Bouygues, Cimbéton, Cerib, Lafarge, Denis Moreg, Jean-Marie Monthiers, Patrick Müller - Dessins : Franck Hammoutène - Secrétariat de l'École Française du Béton : Annie Launay CIMBETON - 7, Place de la Défense - 92974 Paris-la-Défense cedex - Téléphone : (+33) 01 55 23 01 07 - Fax : (+33) 01 55 23 01 10

Sommaire

Editorial	1/2
Conférences :	
1- Un matériau révolutionnaire	3/5
2- Bétons hautes performances : formulation	6/7
3- Bétons : la matière des parements	8/9
4- Un matériau synonyme de liberté ?	10/11
5- Béton, matière de l'espace	12/13
6- Bétons de fibres métalliques	14/15
7- Béton : masse et légèreté, lumière et contraste	16/17
8- Plasticité, finesse, élanement	18
9- Les bétons à ultra-hautes performances	19
Ateliers :	
1- Bétons ultra-hautes performances (BUHP)	20
2- Spécifications, prescriptions architecturales parements, esthétique	21
3- Traitements des surfaces et des matières	21
4- Bétons hautes performances : béton frais compositions, rhéologie	22
5- Champs d'applications architecturales - Travaux d'étudiants de 4 ^{ème} année	23
Tables rondes :	
Bétons : Révolutions - architecture ?	24/25
La matière de tous les possibles ?	26/27
Conclusion	28
Le comité d'orientation	29
Comment adhérer à l'EFB	29

En premier lieu, merci aux nombreuses personnes présentes, qui ont répondu à la provocation du titre de ce colloque "Bétons : Révolution - Architecture ?"

En effet le propos du colloque est tourné vers les architectes pour les solliciter sur les conditions d'appropriation des nouveaux bétons, dans la conception architecturale et réfléchir avec eux sur les transformations et mutations du processus de création que ceux-ci peuvent entraîner. Nous invoquons donc le mot révolution, non pas au sens banalisé de ce qui est surprenant, mais au sens d'une remise en cause, d'un changement dans l'appréhension et l'organisation du monde habité qui ne saurait se limiter à des questions de construction et de produits. L'esprit ici est du domaine de la recherche et de la formation.

Il faut dire quelques mots sur l'origine de ce colloque. Depuis trois ans, notre école, dans le cadre du programme de recherche BHP 2000 a développé en coopération avec l'École Française du Béton, un enseignement "d'architecture et structure" portant sur les BHP, s'adressant à des étudiants en fin du cursus. Très vite ceux-ci ont pris conscience des nouvelles possibilités de ces BHP qui, pour les architectes, pourraient - au delà des conditions techniques de production - devenir des éléments moteurs inhérents au processus de conception, voire de modélisation. On est ainsi très vite passé du matériau industriel performant à l'objet didactique avec pour objectif de faire travailler autrement ces futurs architectes.

Il est rapidement ressorti que l'exploitation et la mise en œuvre de ces BHP allaient permettre de nouveaux volumes, de nouveaux défis à la statique et à l'équilibre, donc à d'autres formes et ordonnancements. Qu'il s'agisse d'équipements ou de logement, l'ensemble de ces nouvelles performances,

y compris en matière de coût, d'usage et de maintenance, est appelé à faire évoluer les prescriptions de l'architecte. Il en va de même pour l'évolution des enjeux fondamentaux architecturaux et urbains : enjeu de notre environnement bâti et de l'aménagement de l'espace, enjeu de la ville et de ses échelles, enjeu d'ambiance, d'ergonomie et d'image du bâti, enjeux économiques. A cela s'ajoutent d'autres conditions de durabilité des bâtiments, ce qui interpelle l'architecte aussi dans sa responsabilité sociale.

Ainsi, l'interaction entre le concept et sa matérialisation BHP impose aux responsables de la formation des architectes d'intégrer l'approche de ce nouveau matériau en terme d'expérimentation, de recherche et d'enseignement. Il nous est alors apparu comme une évidence que nous avions - l'École Française du Béton, ses grands partenaires, et l'École d'Architecture de Paris-Villemin - une responsabilité en termes d'information et de formation vis à vis des architectes. Nous devons donc dans une parfaite mixité de culture et d'interaction permanente architecture/ technique développer des actions de formation continue sur ces questions. Ce colloque est en quelque sorte la séance inaugurale d'un cycle d'actions de formation continue en la matière.

Bien évidemment et pour répondre à quelques inquiétudes, il ne s'agit pas de donner une tribune à tel ou tel matériau ou de primer telle ou telle architecture. Il s'agit, dans la limite de temps impartie de donner la parole, dans un esprit de recherche, à des spécialistes et auteurs d'architecture en béton, sachant que d'autres intervenants seront invités à participer aux futures sessions de formation continue. En bref, cohérence entre conception et matériau, nouvelles façons de concevoir recherche et prospective, utopie technique, en un mot révolution est la toile de fond de ces débats. ●

En introduction à ce colloque il est naturel de présenter l'École Française du Béton en particulier pour celles et ceux qui ne la connaîtraient pas encore. L'objectif de cette école est de favoriser l'information sur le béton et ses progrès auprès de tous les acteurs de la construction.

A la différence de certaines industries comme l'automobile où il existe un nombre limité de constructeurs et d'acteurs, dans le monde de la construction se trouve une foule d'acteurs qui ont des fonctions différentes. On trouve en effet les concepteurs, les entreprises, les maîtres d'ouvrages. Ces acteurs sont très nombreux, divers, dispersés et de tailles extrêmement variées. Pour leur faire passer les informations, il est nécessaire d'avoir des catalyseurs capables d'activer cette transmission. Née de ce constat et des nécessités qui en découlent, l'École Française du Béton joue ce rôle de catalyseur.

Comme le souligne son président Y. Malier, il s'agit d'une école sans murs, très ouverte, qui apporte ses services aux établissements de formation existants.

Sa création est récente, et après une phase de montée en puissance, elle atteint son régime de croisière. Elle est présidée par Y. Malier, qui est à l'origine de sa création. Elle fonctionne avec un comité d'orientation qui regroupe une quarantaine de personnes représentant l'ensemble des professions de la construction : les concepteurs, les maîtres d'ouvrages, les maîtres d'œuvre, les établissements d'enseignement et aussi l'administration.

L'École Française du Béton assure bien évidemment des missions de formation et d'information sous forme de conférences, de colloques, de documentations. L'édition d'un bulletin périodique de l'école permet d'informer toutes les personnes intéressées sur

les progrès du matériau, sur les manifestations organisées par l'École Française du Béton. Enfin, elle intervient aussi en matière de labelisation d'ouvrages ou de documents de façon à fournir aux différents acteurs de la filière construction des outils de mise à jour des connaissances.

En effet, le béton est un matériau qui progresse sans arrêt comme il sera possible de s'en rendre compte tout au long de ce colloque.

La logistique de l'école est assurée par CIMPÉTON, auprès de qui sont disponibles de la documentation et toutes les informations concernant les actions de formation menées par l'École Française du Béton. ●

*“une école sans murs,
très ouverte qui apporte
ses services
aux établissements de
formation existants ”*

Un matériau révolutionnaire (Yves Malier, Président de l'EFB)

Photo 1 : B30



Photo 2 : B60



Panier d'oursins ou roche homogène ? that's the question !
*Deux bétons de chantier faits par les mêmes ouvriers, le même jour,
 l'un par formulation ordinaire (B30) l'autre par emploi d'un défloculant (B60)
 Chantier de Joigny, réalisation Novembre 1988, grossissement x 5000.*

L'évolution des bétons à partir de la décennie 80

RÉDUIRE LA PRÉSENCE DE L'EAU

Depuis le début des années 1980, une grande pluralité de bétons est à notre disposition avec aujourd'hui des propriétés tout à fait "gouvernables". Cette évolution s'est développée à partir des travaux effectués sur le rôle de l'eau dans le béton. Globalement, l'eau est utilisée pour deux types d'actions, l'hydratation et l'ouvrabilité du béton. L'hydratation va donner au béton ses propriétés mécaniques. En fait très peu d'eau est nécessaire pour hydrater le ciment contenu dans le béton ; cependant une importante part complémentaire d'eau est ajoutée afin d'obtenir une bonne ouvrabilité du béton donc une bonne mise en place dans les coffrages. Cette eau complémentaire, que l'on a longtemps cru nécessaire à la mise en œuvre, reste à l'état d'eau libre dans le béton durci et son lent départ au contact du milieu extérieur plus sec, va générer beaucoup de micro défauts tels les microfissurations, micro-ruptures, déformations différées de retrait et de fluage, etc.

L'approche globale, avec les bétons modernes va donc consister à réduire cette eau notamment en obtenant la fluidité du mélange, à l'état frais, par d'autres voies.

MAÎTRISER LA FLOCCULATION

Comme toutes les poudres mélangées dans un liquide, les grains de ciment ont tendance à s'agglomérer entre eux du fait

de la polarité de ce liquide. Les grains de ciment ont un diamètre moyen de 10 à 50 microns. Dans la pratique, lors de la mise en œuvre dans le béton, ils ne restent pas à l'état de grains isolés mais se regroupent pour constituer des agglomérats (les floccs) bien plus gros. Ces floccs piègent une partie de l'eau destinée à la fluidité. La présence des floccs réduit donc l'ouvrabilité, ce qui a pour conséquence un ajout d'eau dont les nuisances en terme de qualité future du béton viennent d'être évoquées.

Des produits "défloculants" (les superplastifiants) mis au point à partir des années 1980 et en très constante amélioration aujourd'hui permettent de casser les floccs et d'obtenir une meilleure répartition des grains de ciment. Grâce à cela, les bétons présentent une meilleure rhéologie avec pourtant, moins d'eau. Par ailleurs, les grains étant mieux répartis la résistance est plus homogène et améliorée (cf. photos 1 et 2).

OPTIMISER LE MÉLANGE GRANULAIRE

Une des évolutions des bétons récents est donc liée à la réduction de l'eau ; l'autre voie de progrès est en relation avec les théories modernes de la physique (P.-G. de Gennes - E. Guyon) sur l'optimisation des empilements granulaires. En simplifiant beaucoup, on peut dire que du point de vue de la compacité et de la résistance, les meilleurs empilements granulaires sont ceux qui font appel à quatre échelles de grains. De ce fait, le béton classique est relativement condamné, car il ne fait appel qu'à trois

Le béton est un matériau en pleine révolution. Si l'on fait un peu d'histoire, de 1900 à 1980 le béton a été un matériau dont les propriétés ont été essentiellement "figées", tant du point de vue de la couleur, de la rugosité de surface, de la porosité interne que des propriétés mécaniques telles la résistance à la compression, le module d'élasticité, la (faible) résistance en traction, la relativement modeste aptitude à la non-fissuration ou encore l'ouvrabilité. Toutes ces propriétés étaient quasiment identiques et, à quelques variations assez minimes près, le même béton était toujours utilisé.

échelles de grains : l'échelle centimétrique avec les cailloux, l'échelle millimétrique avec les sables, l'échelle de quelques dizaines de microns avec les ciments. Les théories relatives aux empilements de grains optimisés, montrent que la quatrième échelle de grains qu'il faut introduire est de l'ordre de 0,1 à 0,5 micron. Ainsi avant même l'hydratation, qui reste, bien sûr, essentielle, le mélange granulaire obtenu sera parfaitement optimisé. Dans la pratique, diverses "ultra-fines", et notamment les fumées de silice, ont cette propriété et leur emploi conduit donc à une considérable amélioration des performances mécaniques. Par ailleurs, ces microbilles ont aussi pour effet de lubrifier les grains plus gros que sont le ciment, le sable, les graviers et donc d'avoir ainsi une fluidité et une ouvrabilité naturelles tout en réduisant encore l'eau de malaxage.

LE BÉTON, UN MATÉRIAU AUX PROPRIÉTÉS GOUVERNABLES ET DONC PRESCRIPTIBLES

Ces deux voies, défloculer et optimiser le mélange granulaire, sont à la base de toutes les améliorations des bétons contemporains. Ainsi, par la composition, on peut obtenir des bétons qui ont des propriétés tout à fait gouvernables. Cela signifie que l'on peut désormais agir sur quatre familles de propriétés constructives :

1 - sur la consistance et l'ouvrabilité du béton frais. Il est possible d'obtenir des bétons très fluides (cas du béton autoplaçant) ou au contraire avoir des bétons de très hautes performances très fermes (cas des bétons extrudés),

2 - sur les propriétés mécaniques du béton, qu'il s'agisse de la résistance à la compression, de la résistance au très jeune âge, du fluage, de la résistance en traction, de l'aptitude à résister à la fissuration, etc.

3 - sur la durabilité liée à l'évolution interne du matériau ou de la durabilité liée aux agressions externes dues à l'environnement,

4 - sur les aspects esthétiques, au niveau de la micro rugosité de surface, de la couleur, de l'aptitude au moulage de micro-formes, de l'aptitude au polissage, au lavage, etc.

*“ Ainsi,
par la composition,
on peut obtenir des bétons
qui ont des propriétés
tout à fait
gouvernables. ”*

Il existe donc une foule de propriétés constructives qui sont maintenant programmables, avec cette notion de pluralité des bétons. Cela a des conséquences sur la façon d'aborder le projet en se posant d'abord l'ensemble des problèmes de conception, de méthodes de construction, de maintenance voire d'adaptabilité fonctionnelle future de l'ouvrage pour en déduire les propriétés que l'on voudra obtenir.

Ainsi le choix du béton le plus adapté est vraiment au cœur du projet et à travers les possibilités de ce choix le rôle du maître d'œuvre est considérablement renforcé, notamment dès la prescription.

Les bétons modernes à l'écoute de la science, ou du Nobel de physique au Nobel d'économie.

La valorisation de ces nouveaux bétons appelle une analyse macro-économique du projet. Sans doute, doit-on tirer les conséquences de certains aspects des théories du Prix Nobel d'économie, Maurice Allais. Ainsi on peut dire que le moindre coût d'une opération n'est jamais la somme des moindres coûts de chacun des constituants de cette opéra-

tion. Appliqué à la construction en béton cela signifie que la construction la moins coûteuse n'est jamais celle qui est réalisée avec le béton le moins coûteux.

Cette idée va totalement à l'encontre du point de vue le plus répandu dans le milieu du BTP. Il s'agit donc bien là d'une question de fond, voire d'un changement culturel. Il en résulte que la recherche de la plus juste prescription implique pour l'architecte une approche système du projet qui analyse toutes les phases de l'acte de construire en s'attachant à multiplier les interactivités entre ces phases.

Corollairement, il est donc intéressant d'évoquer les évolutions au niveau de certaines propriétés constructives évoquées précédemment et ce qu'elles impliquent car cela a ou aura des conséquences sur l'économie globale des projets. En ce qui concerne la consistance et l'ouvrabilité on peut penser que les innovations vont porter sur les process de construction, les méthodes et la planification. On peut penser par exemple à des pompages sur de très longues distances ou à de très hautes altitudes, à des bétons autoplaçants ou autonivelants, à des coulages sous pression de pièces moulées, à des extrusions sur longue distance, etc.

Bref, beaucoup de nouveaux process sont permis grâce à cette possibilité de "programmer" les bétons. Pour les nouvelles méthodes, il faut citer la suppression de la vibration des bétons. Ce qui permet d'éliminer sur le chantier une source de bruit et d'insécurité dont les retombées sont positives pour les ouvriers et pour le voisinage.

A la fois au niveau des méthodes et de la planification, les nouvelles possibilités d'agir sur le béton frais ou jeune autorisent des décoffrages très rapides car les résistances mécaniques nécessaires sont maintenant obtenues en quelques heures.

Il en résulte des bouleversements dans la planification, l'ordonnement de chantiers, dans la gestion du matériel et par conséquent dans les investissements de l'entreprise et in fine dans les prix de revient de la construction.

De hautes performances mécaniques au service de nouveaux designs

Au sujet des innovations sur les propriétés mécaniques, il est évident qu'il y aura dans les années à venir un développement des structures en arc, exploitant les hautes résistances en compression et, plus encore, des structures triangulées en béton seul ou en construction mixte acier-béton ... si cette dernière parvient à se rénover et à s'écarter des seuls concepts qui ont fait son succès à l'origine (1960).

On peut ainsi obtenir des structures en béton similaires à des structures métalliques, sans en avoir les inconvénients. Il existe tout un champ de formes nouvelles ou anciennes qui vont être mises en valeur par les nouvelles propriétés mécaniques du matériau. Les portées vont, elles aussi, évoluer. Ainsi, en préfabrication, on sait que les éléments économiques courants à inertie constante présentent des perspectives modestes tant au niveau des portées que de la conception architecturale.

L'emploi du béton plus performant repousse les seuils habituels et de nouveaux marchés s'offrent à ces produits. Dans les bâtiments industriels, par exemple, des solutions allégées amélioreront la compétitivité des structures en béton face à la construction métallique. Cela est également vrai vis à vis du bois lamellé-collé.

Ces nouveaux bétons induisent de nouvelles technologies. Ainsi, par exemple, dans la précontrainte classique, l'enrobage des câbles conduit à des dimensions transversales importantes de béton. Il résulte de ces fortes épaisseurs que le béton ne peut généralement pas être sollicité au-delà de 30 à 40 Mpa. Avec la précontrainte extérieure, il est possible de réduire drastiquement l'épaisseur de ces mêmes éléments en béton et de solliciter ainsi le matériau à de plus hautes résistances. Il en résulte bien sûr, une réduction du poids propre de l'ouvrage particulièrement favorable à l'économie. Les premiers ouvrages en précontrainte extérieure datent de 1982, les perspec-

tives sont très grandes avec un potentiel d'allègement important des structures et des formes qu'il appartient au maître d'œuvre, à l'architecte d'utiliser et de valoriser. Dans un autre domaine, en préfabrication, les propriétés plus homogènes des bétons de peau donnent d'excellentes qualités mécaniques de surface et on peut penser pour l'avenir à des techniques d'assemblage par boulonnage, par collage, de nature à bouleverser les techniques de montage in situ des éléments préfabriqués en simplifiant considérablement techniques et délais de montage.

La très grande fluidité de ces bétons et le fait qu'il n'est plus utile de les vibrer permet la mise en place d'inserts dans les pièces préfabriquées avec une précision micrométrique

*“ On se dirige
vers une prévision
et une prise en compte
de la durée de vie
des ouvrages ”*

Enfin ces nouveaux bétons permettent de répondre aux évolutions de l'approche de la maintenance. On se dirige vers une prévision et une prise en compte de la durée de vie des ouvrages, ou de la durée de vie de telle ou telle pièce d'un ouvrage. Il en va de même pour la prise en compte de l'évolution possible des fonctions des ouvrages et donc de leur adaptabilité future.

Architectes, maîtres d'œuvre ! ... vous avez dit chefs d'orchestre !

Pour conclure, la pluralité des bétons, à condition de bien l'utiliser, est un formidable outil de pouvoir qui conforte le rôle de chef d'orchestre du maître d'œuvre. Il lui donne le moyen de proposer au maître d'ouvrage un projet cohérent économiquement en terme d'approche globale, au sens de la macro-économie, c'est à dire d'approche intégrant la conception, la construction, la maintenance et l'adaptabilité future de l'ouvrage.

Bien sûr, comme tous les outils de pouvoir, l'utilisation de celui-ci implique des devoirs. Dans ce cas, il m'apparaît très clairement que le devoir essentiel, impératif, est de se former à la connaissance de ces nouveaux matériaux. J'observe, pour être souvent appelé à l'étranger afin de contribuer à la définition du programme de formation des architectes que certains pays sont résolument engagés dans cette voie.

J'observe aussi, avec tristesse, que, actuellement, sur ce sujet, la situation française n'est guère exemplaire et n'est guère tournée vers l'avenir. C'est pour moi une raison de plus pour souligner la qualité de l'effort fait - dans l'indifférence générale des tutelles semble-t-il - par certains professeurs et directeurs d'écoles d'architecture et par certains architectes.

C'est aussi pour moi l'occasion de dire combien à l'École Française du Béton, nous croyons à l'intérêt d'actions comme celles qui nous rassemblent, architectes et ingénieurs, durant ces deux jours de fructueux travail. ●

Bibliographie :

- E. Guyon (préface P.G. de Gennes) - *Granites et fumées*, Ed. O. Jacob, 1997 ;
- M. Allais - *Traité d'économie*, Ed. ce. juglard, 1994 ;
- Y. Malier - *les bétons à hautes performances*, Ed. Presses ENPC, 1992.

Bétons hautes performances : formulation

(Robert Le Roy, Docteur ENPC)

Cet exposé a pour objet d'aborder les principes de formulation des BHP en se limitant volontairement aux caractéristiques de résistance en compression et de comportement à l'état frais.

L'observation de la microstructure d'une matrice de ciment durcie révèle qu'elle est relativement poreuse, comme le montre une photo au microscope électronique à balayage d'un gel de silicate de calcium hydraté (fig. 1). La porosité totale peut atteindre 20 % à 40 %. Or, en observant la résistance relative de différents matériaux en fonction de leur porosité, on obtient une courbe maîtresse de type hyperbolique, montrant que beaucoup de matériaux répondent au même principe : la diminution de la porosité conduit à une augmentation de la résistance, et cette augmentation s'accroît plus rapidement vers les faibles porosités.

En considérant le béton comme un matériau composite à 2 phases (la matrice cimentaire et les granulats), la recherche des hautes résistances conduit logiquement à utiliser des granulats et une matrice de hautes résistances.

La courbe montrant la distribution poreuse de la matrice cimentaire (fig. 3), courbe qui ne comprend pas la porosité des hydrates, laquelle est de l'ordre de 2 nanomètres, fait ressortir deux classes distinctes, que l'on peut décrire de manière simplifiée. A l'échelle de 20 nanomètres (1 nanomètre = 10^{-6} millimètre) on constate une première catégorie de porosité, qui dépend peu de la gamme de résistance du matériau et semble plus difficile à faire varier. Dans un domaine allant de 0,1 micron jusqu'au millimètre, la porosité est principalement due à la présence de l'eau non liée chimiquement (qui peut donc s'évaporer), des pores aux interfaces entre les granulats et la pâte de ciment, des bulles d'air, des microfissures. C'est sur cette gamme de pores que l'on peut agir pour consolider la matrice cimentaire et atteindre des

résistances plus élevées.

En ce qui concerne les granulats, les expériences montrent qu'à forte concentration granulaire (en pratique supérieure à 60 % en volume, ce qui représente aux alentours de 1800 kg de granulats par m^3 de béton) la résistance en compression augmente avec cette concentration. De plus, par l'utilisation de petits granulats on améliore encore la résistance en compression. Sur ce dernier point, deux mécanismes peuvent être avancés : la matrice subit des concentrations de contraintes au voisinage des granulats et en particulier des gros, et cette concentration est moins grande en présence de petits grains, ou la résistance de la matrice est augmentée par le frottement exercé par les granulats, ce frottement plus marqué en présence de petits grains. De ces observations, on peut conclure que pour augmenter la résistance du béton, il faut diminuer la porosité de la matrice et optimiser le squelette solide (granularité : distribution de taille des grains, forme des grains, résistance propre des grains,...).

COMMENT DIMINUER LA POROSITÉ DE LA MATRICE

Déjà en 1892, Ferret établissait une loi qui proposait d'inclure dans la pâte de ciment, le maximum de ciment pour un minimum d'eau. L'analyse de la résistance en compression d'une pâte de ciment durcie en fonction de la proportion de ciment fait apparaître une courbe non linéaire (fig. 4). Avec un ciment moderne de résistance assez élevée (les résistances mesurées selon la norme peuvent dépasser 70 MPa), il est possible d'obtenir des pâtes de ciment dont les résistances dépassent les 100 MPa. La difficulté est cependant de pouvoir réaliser dans la pratique ces mélanges qui sont alors très secs. Pour le béton, on suit l'évolution de sa résistance en fonction du rapport E/C (rapport de la masse d'eau à celle de ciment pour un m^3 de béton) (fig. 5). Ainsi, un rapport E/C inférieur à 0,4 correspond au domaine des BHP (la résistance dépasse alors 50 MPa).

Cependant, dans la pratique, plus le rapport E/C diminue, plus le mélange devient difficile à réaliser car il n'y a plus assez d'eau pour assurer la fluidité.

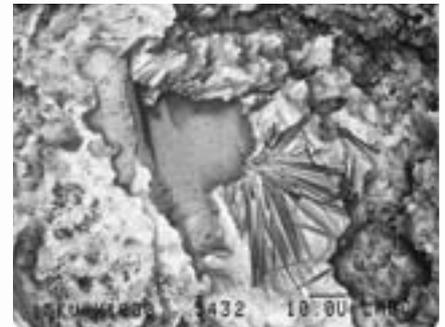


figure 1

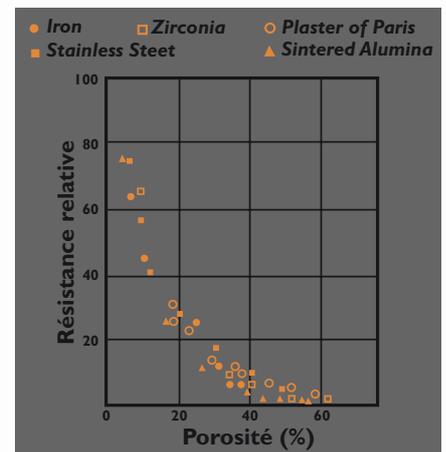


figure 2

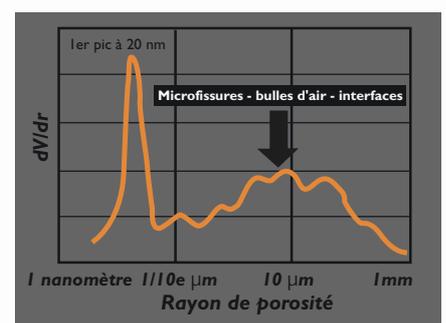


figure 3 : Distribution classique de la porosité du béton ordinaire

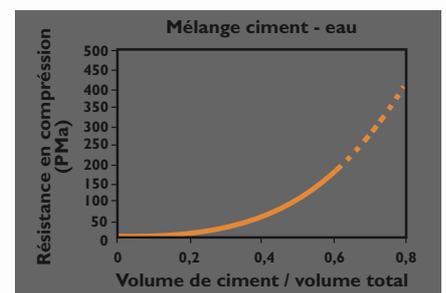


figure 4 : La loi de Féret (1892)

Une quantité importante d'air est alors prise dans le mélange, ce qui crée de nouveau de la porosité et fait chuter la résistance (fig. 5). Il faut fluidifier ce mélange pour ne pas entraîner d'air. La solution consiste alors à défloculer. En solution, à la surface des grains de ciment sont localisés des charges électriques. Les ions de charges différentes font que les grains s'attirent et forment des "petits paquets" appelés des floccs. Au sein d'un flocc les grains sont solidaires les uns des autres et se déplacent ensemble.

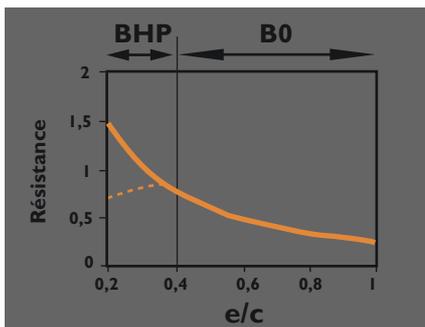


figure 5 : Résistance du béton par rapport à celle du ciment

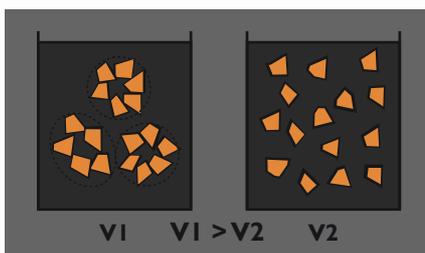


figure 6 : La floculation augmente le volume apparent des particules fines. Défloculation obtenue par les superplastifiants.

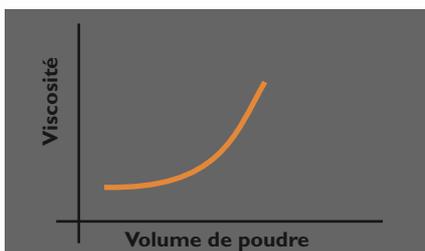


figure 7 : Viscosité en fonction du volume de poudre

Quand il y a eu défloculation ce sont les grains qui se déplacent individuellement les uns par rapport aux autres. Il en résulte que sans défloculation le volume apparent de poudre est plus grand que lorsqu'il y a eu défloculation, puisque les floccs entraînent avec eux une certaine quantité d'eau (fig. 6).

Si le volume apparent diminue la viscosité diminue (fig. 7) et donc la défloculation permet de fluidifier. Les produits qui permettent de défloculer sont connus sous le nom de superplastifiants. De façon schématisée le mécanisme principal de défloculation fonctionne de la façon suivante : les copolymères du superplastifiant qui ont une affinité avec le ciment par attraction électrostatique, viennent se plaquer en couche très fines (mécanisme d'adsorption) autour des grains de ciment. Les couches qui recouvrent les grains ne peuvent pas s'interpénétrer et de ce fait les grains ne peuvent plus flocculer (à ce mécanisme appelé répulsion stérique peut s'ajouter celui de répulsion électrostatique).

En sachant ainsi fluidifier et réduire la quantité d'eau, il est alors possible de faire une pâte de ciment fluide de haute performance.

L'OPTIMISATION DE L'EMPILEMENT GRANULAIRE

Les effets granulaires peuvent être importants pour les BHP ; on peut en effet obtenir des variations de près de 20% de la résistance en ne modifiant que la courbe granulométrique.

L'optimisation granulaire est donc une étape importante de la formulation. Pour chaque classe granulaire, il existe des mélanges optimaux de grains qui permettent d'obtenir la porosité minimum du système.

La recherche de l'optimum peut s'effectuer théoriquement, par des modèles plus ou moins sophistiqués, ou expérimentalement. En se plaçant à la proportion optimale de granulats et de sable, et en conservant un même rapport E/C, il est possible de réduire le volume de la matrice de ciment, tout en conservant la fluidité désirée. Outre un léger gain de résistance, il en résulte aussi une économie, ainsi qu'une diminution du retrait et du fluage.

En fait, ce concept de compacité des mélanges granulaires, utilisé depuis longtemps pour toutes les catégories de béton, peut s'appliquer aussi aux poudres. Ainsi comme le sable entre les gravillons, des ultrafines peuvent jouer le rôle de petits éléments entre les grains de ciment, conduisant ainsi à une possible diminution de l'eau dans le mélange tout en préservant les propriétés de mise en œuvre. Ces ultrafines existent ; la plus utilisée est la fumée de silice, sous produit de l'électrometallurgie. Il s'agit de petites sphères principalement constituées de dioxyde de silicium (SiO_2), 10 à 100 fois plus petites que les grains de ciment. Utilisé avec un superplastifiant, pour assurer la défloculation, on constate qu'il existe également des proportions de ciment et de fumée de silice optimales conduisant à une fluidité maximale. Le gain obtenu sur le dosage en eau permet ainsi d'augmenter encore la résistance (loi de Féret).

Finalement, on s'aperçoit que l'optimisation granulaire s'effectue sur 4 niveaux de tailles de grains, dont l'étendue va du 10^{ème} de micron au centimètre.

LA RÉACTION POZZOLANIQUE

En plus de la contribution à la fluidité, les microsiles sont chimiquement actives. A l'instar de la réaction du silicate de calcium avec l'eau pour créer les hydrates, elle se combine avec la chaux qui s'est libérée pendant l'hydratation du ciment, pour former à son tour un silicate de calcium hydraté résistant. La microstructure a été ainsi renforcée.

Le respect des règles énoncées ici permet de réaliser des bétons de plus de 100 MPa de résistance en compression. Plusieurs ouvrages d'art ont été construits en France dès les années 80-90 avec cette gamme de bétons. Poussées à l'extrême, ces méthodes permettent de repousser encore les limites et d'obtenir des matériaux de près de 200 MPa de résistance en compression, avec des rapports E/C proches de 0,2. On quitte alors le domaine des hautes performances pour entrer dans celui des bétons "ultra-performants". ●

Bétons : la matière des parements (Jean-Pierre Aury, Plasticien)



Le béton architectonique n'est pas une invention nouvelle. En philosophie est appelé architectonique un raisonnement de synthèse. Le transfert du terme à l'architecture ainsi qu'à d'autres domaines est aisé. Un béton est dit architectonique (ou architectural ce qui est synonyme) lorsqu'il est un élément de synthèse entre la technique et l'esthétique. Cette nécessaire harmonie qui doit exister entre les caractéristiques techniques, les caractéristiques architecturales et les caractéristiques de parement d'un béton sont primordiales pour que le béton soit, par sa qualité, un matériau digne de ce nom.

ACQUÉRIR CONNAISSANCE ET EXPÉRIENCE

La technique du béton est du domaine de la connaissance. En effet, il faut acquérir de l'expérience, gérer un grand nombre de paramètres, maîtriser la chimie et la physique du matériau, procéder à un assemblage complexe de composants, etc. L'aspect sensible et la signification du béton, c'est à dire son parement est du domaine de la culture. Cela est très lié à la sensibilité des intervenants, par exemple les bétons bruts de Le Corbusier n'ont rien à voir avec ceux de Tadao Ando. L'un n'est pas supérieur à l'autre, tout simplement ces deux architectes sont d'époques et de cultures différentes et leurs sensibilités sont différentes. Il ne serait pas sérieux d'aborder la notion de parement béton sans mettre l'accent sur cette relation très forte qui existe entre l'expression du béton et la sensibilité de son auteur. Il existe une poésie du béton qui s'exprime par ses formes, ses couleurs et ses textures. Le terme "béton matière à réflexion" illustre l'essence même du matériau béton qui nécessite de s'inscrire dans une rigueur technique tout en donnant une large place à l'expression sensible et par conséquent à la poésie.

LE PAREMENT EXPRESSION PROFONDE DU BÉTON

Il n'existe pas de système pour faire des parements de béton. Cela ne peut se réduire à un catalogue comme par exemple pour le papier peint. La notion

d'un béton décoratif, qui n'existerait que pour sa beauté est à banir. Qualités esthétiques et performances techniques du béton vont le plus souvent de paire. Le parement ne constitue en aucune manière une décoration du béton. Il est bien au contraire l'expression profonde du béton. Le parement n'est pas quelque chose de rajouté sur le béton il exprime la réalité, la vérité du matériau. Il est important lorsqu'on utilise du béton de tout mettre en œuvre pour que la vérité de ce matériau soit déjà sa première caractéristique au niveau de la communication.

LE PAREMENT BRUT VÉRITÉ DU MATÉRIAU

Le parement brut est le premier degré de cette vérité du matériau. Souvent décrié cet aspect brut de décoffrage est perçu de façon négative par le grand public, qui le considère comme une prestation bas de gamme. Pourtant de nombreux architectes s'intéressent toujours à cette forme de vérité et de simplicité de l'expression du béton. Les progrès en cours permettent d'obtenir une bonne qualité de ces parements. Il s'agit ici de l'esthétique du grain le plus fin de la composition, du grain de ciment, qui constitue la couche de contact avec l'extérieur. Si des hyperfines sont présentes dans la composition du béton, c'est leur grain qui est présent en priorité. Il en résulte la création de véritables "bétons de lumière". Homogènes et d'une belle couleur naturelle, ils se mettent à vibrer avec la lumière.

TRAITEMENTS MÉCANIQUES ET CHIMIQUES

Pour tous les autres aspects, les parements sont travaillés. Ils s'obtiennent en enlevant de la matière. Ceci peut se faire de façon mécanique ou de façon chimique. La voie mécanique (bouchardage, grésage, polissage...) se rattache à la tradition du travail de la pierre.

La voie chimique (lavage, acidage, désactivation...) est liée à des procédés plus récents. Chacune de ces démarches a pour but de faire apparaître le squelette du béton. Dans tous les cas, il est fondamental de travailler la composition minérale du béton, non seulement au niveau de la granularité mais aussi au niveau de la qualité esthétique de tel ou tel composant de la formulation.

Il existe deux grandes familles, les parements sélectifs et les parements intégraux. Les premiers concernent les parements pour lesquels le traitement a enlevé une partie de la composition

superficielle. Il s'agit par exemple des bétons désactivés. Les composants ne sont pas altérés, ils sont simplement dégagés. Pour les seconds, le traitement éclate la couche fine superficielle, et crée des impacts sur les granulats dégagés. Il en est ainsi dans le cas d'un grenailage ou d'un grésage, pour un polissage les granulats sont taillés.

Par essence, le béton appartient au domaine minéral. Le ciment est un minéral, il est issu de la terre, a subi un traitement et redevient roche sous une autre forme. Les composants essentiels du béton sont minéraux. Cette affinité avec le monde minéral renvoie à la nature, aux roches, à la matière, à la notion de texture. A l'état naturel les roches offrent des multitudes de parements et de textures. A travers une série de diapositive J.-P. Aury illustre l'aspect minéral du béton, le lien avec les architectures de pierres et présente différents aspects de la poésie du béton exprimée à travers le jeu des formes, des couleurs et des textures. ●

“ Si des hyperfines sont présentes dans la composition du béton, c'est leur grain qui est présent en priorité. Il en résulte la création de véritables “bétons de lumière” ”



Un matériau synonyme de liberté ? (Franck Hammoutène, Architecte)

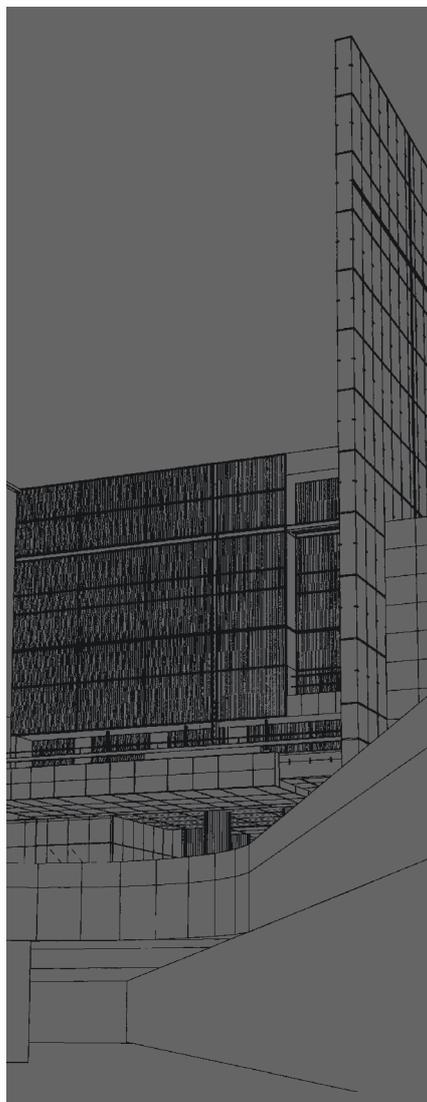
Le béton accompagne l'histoire de l'architecture dans ce siècle.

Il a conduit, voire obligé, les architectes à fonctionner différemment. Le béton armé offrait en effet cette qualité extraordinaire d'être le premier matériau à permettre de transformer le dessin, dans toutes ses acceptions, en projet : il n'y avait plus de limite. Et en corollaire ce danger gigantesque que toute volonté devienne constructible. L'art de construire, fondement de l'architecture, fragilisé au point de s'évanouir dans le formalisme ou l'ignorance. Parler aujourd'hui de techniques et de bétons qui permettent de transformer tout fruit de l'imagination en figure concrète et matérialisée, c'est aussi dire combien l'architecture est indispensable pour donner du sens, et inscrire dans l'histoire et la culture l'utilisation des techniques et des matériaux.

Parce que matériau d'une liberté extrême, mais d'une facilité trompeuse, le béton s'est ainsi trouvé écartelé entre les dimensions opposées de l'invention et de la prospective, de la contrainte et de la coercition.

Avec l'émergence du béton une lignée d'inventeurs et de créateurs rénovent l'art de bâtir et renouvèlent l'architecture.

Avec ces mêmes qualités qui ont présidé à ce mouvement de progrès, le béton outil de l'urbanisation brutale



et de l'uniformisation acculturée est devenu synonyme d'indestructibilité autant que de contrainte et d'inhumanité.

Présentation de la faculté des sciences et techniques de Tours

DEUX ÉCHELLES DE LECTURE

Franck Hammoutène présente deux réalisations qui témoignent de son travail avec le béton. La Faculté des sciences et des techniques à Tours, livrée en 1996, s'élève

dans un parc. Le bâtiment adossé à un espace boisé préservé répond à des règles strictes de gabarit. Deux échelles se lisent, l'une basse répond aux constructions voisines des années 60 à R+2, l'autre haute est une émergence en retrait par rapport à l'axe principal du campus. Tout ce qui est lié à l'enseignement, salles des cours, de TP, laboratoires, etc, est constitué d'éléments de programme très souples qui doivent être reconfigurables, ouverts, lisibles dans leur fonctionnement et aisément identifiables. A l'opposé, les locaux réservés à la recherche sont plus introvertis.

Cette séparation lisible dans le programme est traduite dans l'espace. Ainsi les niveaux bas directement accessibles pour les locaux destinés à l'enseignement et aux étudiants.

Dans les étages supérieurs plus secrets et fermés les laboratoires de recherche. La partie basse du bâtiment est en rapport direct avec le sous-bois, la partie haute domine les frondaisons et émerge du campus. Cette organisation est retranscrite dans la structure de l'édifice et dans l'épannelage des volumes.

VÉRITÉ STRUCTURELLE ET CONSTRUCTIVE

En partie basse, chaque élément de la construction est dessiné pour être compris, clairement lu et donné un référent immédiat en terme d'échelle.

Dans la partie haute, une mantille de fils d'aluminium, assurant la protection solaire, trouble la lecture et l'échelle réelle de la masse abstraite d'un volume presque aveugle, monolithique, émergeant des frondaisons, posé sur le socle des locaux d'enseignement. Ce socle, lui, est constitué de plateaux entièrement libres et traversants permettant des configurations variées. Les matériaux sont utilisés bruts sans que le second œuvre soit jamais synonyme d'habillage ou de maquillage.

Le béton est préfabriqué ou coulé en place. De couleur noire, il est teinté dans la masse et des granulats de la Loire entrent dans sa composition, accrochant des reflets mordorés dans la masse. Le parement est sablé ou bouchardé avant d'être lasuré et verni. Ce traitement permet d'obtenir une homogénéité d'aspect

et de résultat malgré les aléas inhérents aux savoir-faires ou aux modes constructifs. Dans ce projet la vérité structurelle et constructive du matériau répond parfaitement à la vérité du plan, de la coupe et du fonctionnement.

Présentation d'une église en cours de réalisation à la Défense

L'église Notre Dame de Pentecôte ❶ est actuellement en cours de construction à la Défense dans un site avec de fortes contraintes, à proximité de la voûte du CNIT. Elle est en fait construite en frange du parvis, en encorbellement sur le boulevard circulaire. Sa situation un peu en retrait par rapport à l'axe de la Défense, tout en étant parfaitement très visible, dit sa volonté d'être à la fois en retrait et présente au monde.

INVENTER UNE ÉGLISE

Aujourd'hui, il n'existe plus de typologie institutionnelle pour les églises. La traduction cohérente et immédiatement identifiable par chacun de ce qu'est un lieu de culte, n'est plus convenue. Il faut donc inventer ce que peut être un tel édifice dans un tel contexte. Une réponse aurait consisté à créer un événement plastique misant sur la forme et le dessin pour 0

“La solution retenue prend le parti de constituer un lieu qui raconte le parcours d'un individu.”

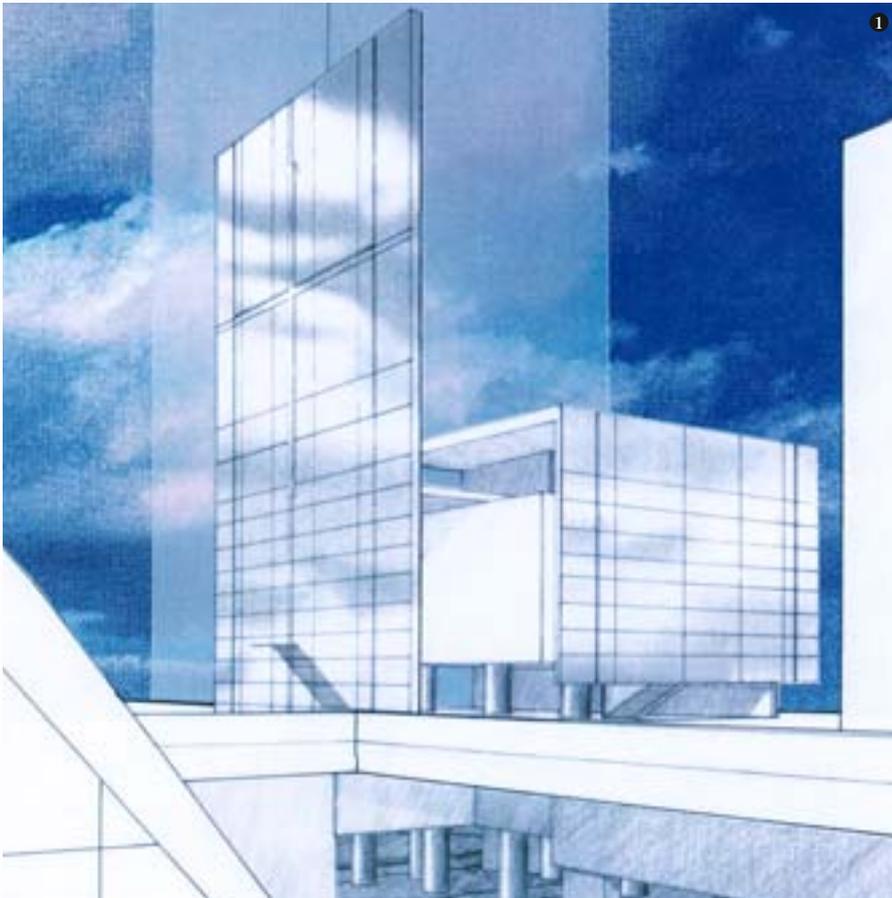
susciter la reconnaissance ou l'émotion. Au contraire la solution retenue prend le parti de constituer un lieu qui raconte le parcours d'un individu : extrait du parvis de la Défense, il quitte un monde excitant de vitesse, de mouvement, de rencontres, de commerces, d'affaires..., va suivre un cheminement qui le conduit vers un lieu de questions, de communication, ou de solitude absolue, c'est selon...

L'architecture de l'édifice raconte cette histoire. L'obligation de construire l'église sur plusieurs niveaux, va multiplier les lieux de transition ; l'espace se resserre, la lumière devient indirecte, le monde extérieur s'oublie... puis la lumière derrière l'autel. Toute cette progression veut accompagner la personne, vers un lieu où elle peut s'abstraire un temps du monde environnant.

PERFORMANCE STRUCTURELLE

Sur le plan constructif, le bâtiment dispose en tout et pour tout de 6 points d'appuis. Ces six colonnes de 5 m de haut sont les points permettant de fonder l'ouvrage en passant à travers la gare routière, le réseau RATP, la voirie, une route nationale enterrée en tunnel, etc. Sur cet ancrage au sol, vient se poser une boîte indéformable en béton B 60 qui constitue un socle artificiel. Ce socle va supporter sur trois appuis et un pignon le volume enchâssé de la salle de l'église, et les 40 m d'élévation qui correspondent au module supérieur et au voile d'acier et de verre opale percé de la croix. La performance de structure est ici obligée par les contraintes d'implantation du projet. Le béton de structure est coulé en place, les éléments non structurels sont préfabriqués.

Pour conclure, Franck Hammoutène souligne que les enjeux d'aujourd'hui ne sont pas dans la technique. Ils sont plutôt dans la forme que l'on donne au monde. Il est fondamental pour les architectes d'arriver à écouter, à comprendre et à donner forme. Quelques soient les options de base, les pensées, les théories, les goûts, les convictions de chacun, nos architectures doivent s'ancrer sans se grimer, ni se masquer dans la vérité de notre époque derrière des faux-semblants qui les placent en décalage et donnent le sentiment d'être à la traîne des réalités du temps. ●



Béton, matière de l'espace (Henri Ciriani, Architecte)

Si le béton est un matériau minéral, il se différencie de la pierre par le fait qu'on le coule pour le mettre en œuvre.

Le travail de l'architecte consiste à emprisonner de l'espace et le béton est le seul matériau capable de le faire avec autant d'évidence.

Il a une qualité fondamentale, qui est la continuité parfaite de sa matière. Le béton n'a absolument pas besoin d'être soudé, boulonné, etc.

Il est en lui-même une continuité de matière et est le seul matériau d'architecture présentant cette caractéristique.

Cette observation peut paraître simple. Mais il faut avoir présent à l'esprit qu'actuellement l'architecture est par trop redevable de ce qui se passe dans le monde. Elle suit un peu l'évolution de l'industrie automobile. Aujourd'hui, les voitures, ce qui est logique, sont construites par morceaux et non plus moulées ou fabriquées d'une pièce. Les architectes, qui ont le souci d'être à la page, veulent faire leurs bâtiments comme des voitures. Ceci est incohérent et absurde, car l'architecture se trouve ainsi privée de cette permanence de cette pérennité qui lui donne une dimension d'éternité. Plus l'architecture est faite comme un objet de consommation, plus l'homme perd cette capacité qu'il a de défier la mort en faisant de l'architecture. Nous sommes aujourd'hui devant une fracture terrible. Un bâtiment a aujourd'hui une durée de vie inférieure à celle de son architecte. Pour la première fois dans l'histoire, un architecte a une forte probabilité de voir disparaître de son vivant les bâtiments qu'il a dessinés. Un bâtiment dépend du programme.

Ce dernier n'est plus aujourd'hui une nécessité, ni une responsabilité. Il existe une démission complète de la société face au programme qui est incapable de dire ce qu'elle veut pour le futur. La pensée dominante tend à croire que moins les choses sont définies plus la liberté est grande. Actuellement, un bâtiment peut tout à fait changer de programme avant son achèvement. Il existe des résistances face à cela, qui se battent pour que l'architecture ne soit pas à l'image de cette forme de démission.

Présentation de projets

LE BÉTON, UN MATÉRIAU NATUREL CONTRÔLÉ

L'Historial de Péronne ❶ est entièrement en béton. Un béton blanc, brut, seul, car l'édifice n'est pas exposé à la pollution, il est derrière un château médiéval. Le site est une parfaite image de l'écologie nordique. Le béton vit et vieillit parfaitement bien, il fait parti du paysage. Ce bâtiment illustre tout ce que représente ce matériau. D'une part on y trouve le béton matière, le béton beauté, le béton texture, le béton lumière et d'autre part le béton peint, le béton lourd, le béton léger, le béton qui franchit. Le béton est merveilleux parce qu'il est artificiel. C'est de la pierre artificielle, du minéral artificiel, c'est la nature contrôlée.

Quand il faut mettre un revêtement, cela revient à habiller un bâtiment. Dans le passé on s'habillait pour sortir en ville. Si un édifice se trouve en pleine pollution, il peut s'avérer nécessaire de l'habiller pour que son béton ne soit pas déshonoré, comme cela a été fait au musée d'Arles. Mais à l'intérieur le béton de cette architecture est intégralement présent et reste beau.



FABRIQUER AUTANT D'ESPACE TENU PAR L'ARCHITECTURE QUE D'ESPACE INTÉRIEUR

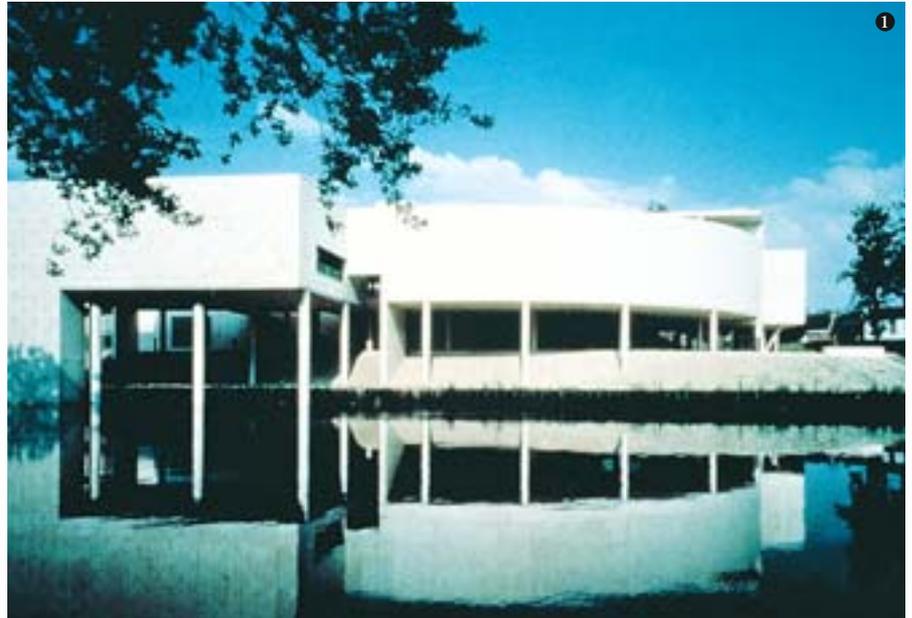


Avec le concours d'Evry en 1970, les logements de la Noiseraie à Marne la Vallée en 1975 la logique de construction par coffrage tunnel a été poussée à son paroxysme. Avec les améliorations du second œuvre, il est possible aujourd'hui de faire des bâtiments de logements plus perméables, plus fins. Par exemple les deux projets de logements pour la Hollande démontrent que l'on peut fabriquer de la spatialité et des volumes dans la ville, qui ne sont pas opaques. L'opacité d'un pâté de maison n'est plus admissible. On souhaite avoir la transparence du cœur d'îlot sur la périphérie. Ceci est déjà un peu traité dans l'ensemble de logement de Colombes où les bâtiments présentent une certaine perméabilité. La seule modernité possible telle que l'entend Henri Ciriani, consiste à fabriquer autant d'espace tenu par l'architecture que d'espace intérieur.

LE BÉTON ASSURE LA PÉRENNITÉ DE L'ŒUVRE

Pour la maison de la petite enfance de Torcy, tout un travail de programmation et de participation a eu lieu. Cependant des changements politiques ont provoqué des changements divers de programmes. Malgré tous ces aléas une chose est restée, l'architecture en béton. Au-delà de l'anecdote, ceci démontre que le béton assure la pérennité de l'œuvre et tout le reste est d'une grande brièveté. Tout ce qui est important et strictement essentiel pour une œuvre sera en béton, pour le reste les matériaux peuvent avoir une pérennité moindre. Par contre, il est primordial pour le béton, qu'avec le moins il puisse faire le plus toujours. Le béton n'est pas le lieu de l'opacité, il est l'opacité minimum.

“Le béton n’est pas le lieu de l’opacité, il est l’opacité minimum.”



VERS UNE ESTHÉTIQUE DE L'ÉQUIVALENCE ENTRE L'HORIZONTALE ET LA VERTICALE

Depuis le projet de Torcy, tout le travail de H. Ciriani va porter sur une volonté d'abstraction, qui est le symbole, le signe, de la prétention d'un architecte face à la réalité physique. Pour pouvoir atteindre cette abstraction il faut que l'horizontale soit l'équivalent de la verticale. Comment faire pour que ce qui s'appuie verticalement et ce qui franchit ait la même force, la même matérialité. Le béton est le seul matériau qui permet de voir une ligne ou un plan horizontal, devenir vertical et revenir à l'horizontale. Savoir tenir de l'espace, le mettre en tension, transformer la matière même de l'espace, ceci est la charge fondamentale du béton.

Dans tous les projets de concours récents, Avignon, Compiègne, Pontoise, etc, une esthétique de l'équivalence entre l'horizontale et la verticale s'installe. D'un projet à l'autre elle cherche, elle apprend à connaître une nouvelle abstraction. Cette abstraction calme et sereine accepte et aime la gravité, mais n'en est pas esclave. Quand on sait traiter la gravité, elle donne de l'émotion. Il est fondamental que la gravité soit la raison même du travail de l'architecte. Actuellement, la plupart des gens pense qu'il n'y a pas de

futur. Le futur n'est plus synonyme de progrès, il faut donc vivre, penser, au plus vite. La vitesse génère l'oubli, seul ce qui est lent produit de la mémoire. Plus personne n'est intéressé par la mémoire. Le travail dans tous les derniers projets revient sur ce qui est essentiel comme la gravité. Il faut inventer une architecture légère qui parle plus de la gravité que les pyramides égyptiennes. Les architectes doivent continuer à avoir des désirs de nouveauté, de spatialité. Qu'ils soient capables de surprendre les gens pour les émouvoir par l'architecture. Avec des bétons de haute résistance d'un coût peu élevé, on pourrait faire une architecture fabuleuse. Il est aussi primordial que le béton soit à la pointe du progrès en permettant aux architectes de faire des projets de haute technologie, qui restent simples. Le béton ne doit pas apparaître "vieux jeu" face à d'autres matériaux.

UNE PETITE MAISON TRAVERSÉE PAR LA MER

La petite maison au Pérou, se dresse en bord de plage. Il s'agit d'un cube ouvert. Le terrain en pente oblige à développer un système tripartite. La partie inférieure fait socle et abrite un garage fermé par une porte en "Makrolon" translucide et très légère. La maison s'enroule autour

d'un espace vide qui traverse toute la maison et dans lequel est planté un palmier. Les matériaux et les couleurs donnent là une atmosphère de fraîcheur et le sentiment d'être en vacances. Au-dessus s'organise la partie inférieure de l'habitation, les chambres des enfants et les services. Une piscine en longueur regarde vers la mer. Au dernier niveau se trouve l'étage noble et en suspension sur sa double hauteur donne la chambre de maître. Son volume cubique présente tout son poids au-dessus de l'espace de la salle à manger, à l'inverse l'espace en creux de la chambre à coucher est prolongé par la terrasse aménagée au-dessus, qui semble prendre avec elle l'espace de la plage. D'un côté ce cube paraît peser de tout son poids sur l'espace de la maison et d'un autre point de vue il démontre exactement le contraire.

Cette maison se propose de modifier la typologie des maisons de plage, où généralement la maison regarde la plage. Dans ce projet, la maison met la plage à l'intérieur. La maison semble traversée par la mer. Le béton est peint en blanc ou verni dans ses parties laissées brutes. Verticaux ou horizontaux tous les voiles font 12,5 cm d'épaisseur. Tout ce qui n'est pas l'essentiel de la maison, c'est à dire tout ce qui n'est pas en béton est traduit dans une polychromie de jaune, noir, rose, rouge... ●

Bétons de fibres métalliques (Pierre Rossi, Directeur de recherche au L.C.P.C.)

Pour introduire de façon simple la notion de béton de fibre métalliques, on peut dire qu'il s'agit d'un béton armé à l'échelle locale. Il faut savoir que comme les armatures traditionnelles de béton armé, les fibres ont pour objectif de maîtriser la fissuration. Cette conférence a comme but de démontrer qu'il existe une relation intime entre les fibres et les fissures. A la différence du béton armé où les armatures sont placées dans le coffrage avant le bétonnage, les fibres métalliques sont mélangées avec les autres constituants du béton pour former un matériau spécifique appelé le béton de fibres. Du fait du mélange des fibres à l'intérieur de la matrice, ces dernières sont obligatoirement courtes et impliquent l'aspect local évoqué précédemment. La petite taille des fibres va avoir un effet sur l'échelle à laquelle elles interviennent à l'intérieur du matériau. Comme les fibres métalliques jouent le même rôle que les armatures traditionnelles en ce qui concerne la fissuration, on peut remplacer ces armatures soit en totalité soit partiellement par les fibres. Pour les architectes, cette perspective peut offrir une grande liberté, car il est possible de passer de formes contraintes liées aux armatures, à des formes beaucoup plus libres.

SPÉCIFICITÉ DU BÉTON DE FIBRES MÉTALLIQUES PAR RAPPORT À SA MISE EN ŒUVRE

Pour bien appréhender le béton de fibres métalliques. Il faut bien connaître les spécificités du béton de fibres par rapport à sa mise en œuvre. La plus importante particularité concerne l'orientation préférentielle des fibres qui dépend de deux paramètres, les techniques de mise en œuvre et le fait que le béton ait à s'écouler ou non dans les coffrages. Pour sa mise en œuvre, le béton est soit coulé, soit projeté. Dans le cas du béton coulé, on peut utiliser une pompe ou une benne munie d'un manchon. Dans ces deux situations, il est clair que les fibres vont être orientées de façon préférentielle avant d'arriver dans le coffrage. Le béton de fibres est alors structuré d'une certaine manière. Si l'on utilise une benne sans manchon, l'orientation préférentielle des fibres est moindre. Ainsi on constate que le choix de la technique de coulage utilisée n'est pas indifférent à la structuration du béton de fibres dans le coffrage. Même si l'on utilise au départ une formulation identique, in fine selon la technique de coulage on n'obtient pas le même béton de fibres. Il est donc très important de retenir que le béton de fibres est structuré au travers de la technique de mise en œuvre. Il faut aussi tenir compte de l'écoulement d'un béton de fibre à l'intérieur d'un coffrage. En effet les fibres s'orientent d'une manière préférentielle en fonction des directions d'écoulement. Ainsi on peut choisir d'avoir un principe de mis en œuvre avec peu d'écoulement ou au contraire avec beaucoup d'écoulement, ce qui va avoir une conséquence sur la structuration ultérieure du béton de fibre.

Dans des structures assez élancées, il existe un phénomène de ségrégation des fibres lié à la pesanteur, qui peut être fortement réduit en en tenant compte dès la formulation. Cette ségrégation dépend de la fluidité du béton, mais aussi de la dimension des fibres. Par exemple, des fibres légères par rapport à la fluidité du matériau induiront une moindre ségrégation par rapport à des fibres plus grandes et plus lourdes. Le choix d'une fibre n'est par conséquent pas du tout indé-

pendant du type de structure à réaliser et du type de mise en œuvre retenu.

Il existe aussi une relation entre les dimensions des fibres, le pourcentage de fibres introduit et la maniabilité du béton (c'est à dire l'aptitude d'un béton à se mettre en œuvre). En matière de maniabilité deux règles de l'art s'imposent. Premièrement, pour un dosage de fibre donné, plus le rapport longueur de la fibre sur diamètre est élevé plus la maniabilité est mauvaise. Deuxièmement, à même rapport longueur sur diamètre de la fibre et à même pourcentage de fibres, plus une fibre est courte plus le béton est maniable. Partant de ces deux données, il faut savoir qu'à maniabilité fixée, il est possible d'introduire soit un pourcentage élevé de fibres courtes soit un pourcentage plus faible de fibres longues. Ceci est très important pour le béton de fibres, car en fonction de ce choix on obtient in fine des caractéristiques mécaniques du béton de fibres totalement différentes. La nécessité de connaître l'ingénierie du matériau et tous ces aspects technologiques de mise en œuvre est évidente, compte tenu des conséquences qui en découlent.



FISSURES ET ÉTAPES DE FISSURATION

Au sujet des fissures, on distingue les microfissures et les macrofissures. Les microfissures sont des fissures très petites par rapport au volume de béton sollicité. Ces fissures ont des conséquences très localisées dans une structure. Une macrofissure ne peut pas être considérée comme petite par rapport au volume de béton sollicité, ce qui veut dire que sa présence a des conséquences nocives à l'échelle de la structure. La fissure devient préjudiciable lorsqu'elle met en péril la structure. Si l'on sollicite une pièce de béton en traction, on constate schématiquement trois phases de fissuration. Une phase de microfissuration diffuse, qui correspond au comportement de matériau de la pièce. Au fur et à mesure de l'augmentation de la sollicitation, les microfissures croissent, se rejoignent. On parle de localisation ou de coalescence des fissures. Enfin elles deviennent des macrofissures qui ont un impact sur le comportement de la pièce de béton dans la structure.

LES RÉPONSES DES FIBRES MÉTALLIQUES À LA FISSURATION

Face à ces trois étapes de fissuration les fibres métalliques apportent des solutions. Au niveau de la microfissuration, les fibres permettent de "coudre" les microfissures et d'éviter leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macrofissures. Dans le cas d'apparition de macrofissures, les fibres peuvent encore agir comme "coutures" des macrofissures. Elles interviennent à l'échelle de la structure en apportant de la capacité portante et de la ductilité. Il est évident que ce ne sont pas les mêmes fibres qui vont agir dans l'un ou l'autre cas. Pour agir sur les microfissures il faut utiliser un très grand nombre de fibres de petit diamètre (microfibres). Cela permet d'améliorer grandement les caractéristiques à l'échelle du matériau. Pour les macrofissures, il faut un certain ancrage des fibres pour cela elles doivent être plus longues (macrofibres) afin de pouvoir agir. Toute l'ingénierie du béton de fibres métalliques repose sur le fait de savoir à quelle échelle doit porter l'action et dans quel but, ce qui induit la solution micro ou macrofibres. Pour agir aux deux échelles il suffit de mélanger des



microfibres avec des macrofibres (fibres courtes et fibres longues). Cette tendance se développe dans le cadre des bétons ultraperformants.

L'APPLICATION DES BÉTONS DE FIBRES DANS LES STRUCTURES DE DIMENSION MODESTE

Si l'on souhaite que les fibres soient actives au niveau structurel, cela veut dire que le domaine d'application des bétons de fibres concerne les structures de dimensions modestes (poutrelles, coques minces...). Il est aussi très intéressant de penser au couplage du BHP et des fibres. Le BHP permet de diminuer les dimensions, mais il est fragile et nécessite l'apport de renforts pour la durabilité. Les fibres de leur côté ont besoin d'une matrice très adhérente pour fonctionner au mieux. La logique de ces deux matériaux conduit naturellement à les marier.

“Le béton de fibres améliore la pérennité des structures”

Une étude faite en laboratoire démontre l'efficacité du mélange fibres métalliques et BHP. Cette étude avait comme objet de voir de quelle façon il est possible de remplacer, par des fibres métalliques, tous les aciers passifs et tous les aciers de compression dans une poutre en béton de très

haute performance. Les seules armatures conservées sont les aciers de flexion dits "filants". Une comparaison de comportements mécaniques entre une poutre armée en BHP classique et une poutre en BHP contenant des fibres a été réalisée. Les résultats de la comparaison font apparaître que pour des structures de dimensions modestes, le béton de fibre fait largement jeu égal avec le béton armé. Cette observation concerne le comportement ultime, car si l'on regarde le comportement en service, là où les fissures sont de petites dimensions, le béton de fibres est largement supérieur au béton armé. On peut donc dire que le béton de fibres améliore la pérennité des structures ou des coques de petites dimensions. A cela s'ajoute une plus grande liberté de création formelle, due au fait qu'une grande partie des armatures est remplacée par des fibres.

Comme cela a été dit précédemment, on peut mélanger des fibres courtes et des fibres longues. Dans un matériau de laboratoire où l'on effectue ce type de mélange, il est possible d'envisager la suppression de toutes les armatures classiques. Le béton obtenu est très ductile et permet d'atteindre les 70 MPa en traction par flexion. Au LCPC un projet va débiter prochainement. Il a pour objectif l'industrialisation de ce type de matériaux de demain ou d'après-demain. Pour cela il faut établir un partenariat avec les architectes. Car cela nécessite de travailler sur

Béton : masse et légèreté, lumière et contraste

(Jacques Ripault, Architecte)

Plusieurs raisons sont à l'origine de l'intérêt de l'architecte Jacques Ripault pour le béton. En premier lieu le béton est le matériau qui intègre le mieux deux aspects fondamentaux d'un bâtiment qui sont la masse et la lumière. Les architectures de la Grèce antique font bien apparaître que les architectes de l'époque travaillaient sur des questions de masse, de profondeur, d'épaisseur, de répétition, sur le rapport de l'architecture avec le paysage... A partir de références de cette époque qui peuvent être vues comme fondatrices de l'idée d'architecture, il est intéressant de voir comment dans l'histoire, d'autres architectes ont intériorisé les idées de masse et de lumière et les ont travaillées.

Ainsi, par exemple dans l'architecture de Le Corbusier un volume massif en béton devient lumière diaphane. Masse et légèreté établissent un dialogue, la lumière jouant sur le matériau dur et massif donne une impression de légèreté. Le béton est un matériau qui associe l'idée de volume à l'idée de masse et l'idée de volume associée à la lumière constitue ce qui va faire chanter les espaces en donnant une vie et une autre dimension au matériau.

Autre aspect très important, le béton est un matériau qui définit des espaces et les fabrique. En regardant le Salk Institute de L. I. Kahn, on comprend comment ce bâtiment en béton "fabrique la terre et s'oppose au ciel". Le béton est aussi un matériau de modénature comme l'a démontré C. Scarpa au cimetière Brion. Il est solidaire avec la terre, tout en étant présent, il sait s'estomper dans le rocher, ce que l'on constate parfaitement dans le cas de la maison de C. Malaparte à Capri signée par A. Libera. A l'opposé, avec la rampe du bassin des pingouins du zoo de Londres, B. Lubetkin fait flotter une lame de béton dans l'espace. Le lourd devient ici image de légèreté, le matériau se transforme en expression de l'apesanteur. Le théâtre populaire de la ville de Sciacca dessiné par G. Samona est resté inachevé. Cette architecture inoccupée est aujourd'hui encore présente car elle a été édifiée en béton, témoignage de la pérennité et de l'étonnante consistance du matériau.

■ Présentation de projets

LOGEMENTS RUE BISSON À PARIS

Dans l'immeuble de logements de la rue Bisson, premier bâtiment réalisé à Paris par l'agence J. Ripault et D. Duhart, le béton est utilisé sous forme d'éléments préfabriqués, d'une manière pratiquement systématique. Le projet est conçu avec l'idée que les espaces sont délimités par des parois en béton qui sont la vérité constructive du bâtiment. L'utilisation d'éléments préfabriqués correspond à la volonté de fabriquer les espaces par un assemblage régulier de composants. A cela s'ajoute l'idée d'un "bâtiment soulevé" qui confère une autonomie à l'immeuble dans un lieu "serré" caractéristique du tissu urbain parisien. En harmonie avec l'écriture architecturale, le béton permet d'obtenir les portées nécessaires et l'élancement qui concrétisent les intentions.

LOGEMENTS ZAC SEINE RIVE GAUCHE À PARIS

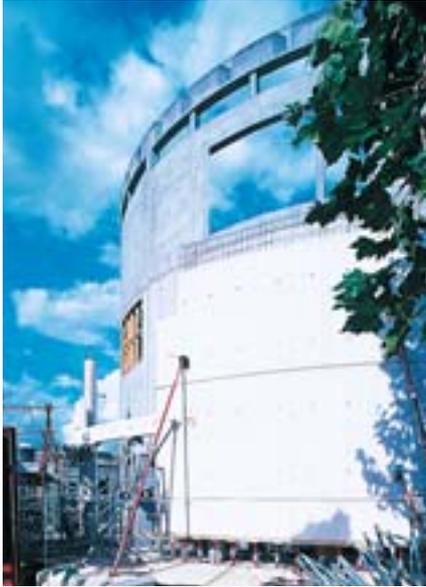
L'écriture des volumes, des plans, des surfaces s'accompagne aussi d'un travail sur la modénature du béton, sur son aspect de surface, sa couleur... Pour l'immeuble

de logements de la ZAC Seine-Rive-Gauche la totalité des parois vues sont en béton poli blanc contenant des granulats de marbre blanc de Carrare. Ce béton change de couleur avec la lumière. La façade est dessinée pour être opaque et ouverte. A la fois claustras, garde-corps, brise-soleil, les lignes horizontales en béton qui composent cette façade permettent de voir la Seine depuis chaque logement tout en préservant son intimité.

CENTRE UNIVERSITAIRE PORT ROYAL - RENÉ CASSIN À PARIS

Le centre universitaire Port Royal - René Cassin est encore aujourd'hui le projet que J. Ripault considère comme le plus enrichissant. Il s'agit sur une petite parcelle, d'un édifice de taille modeste qui comprend deux grands amphithéâtres et peut accueillir plus de 1500 étudiants. C'est en fait un travail en coupe qui a permis de trouver la bonne solution pour superposer les amphithéâtres. Et le béton a permis de la réaliser et d'exprimer le jeu des transparences, de l'espace, des masses soulevées et des volumes. Dès le gros-œuvre terminé, la vérité de l'édifice est révélée par le béton. L'espace de la bibliothèque enserré entre les deux amphithéâtres se dilue par les systèmes de circulation, donnant la lisibilité des corps du bâtiment, soulevés ou suspendus.





*“Le béton
est un matériau
qui définit les espaces
et les fabrique ”*

CENTRE CULTUREL À MEUDON

Le centre culturel de Meudon se dresse sur un site spacieux en face du conservatoire de musique. La salle de spectacle a une capacité de 500 places. Ce projet en béton blanc pousse assez loin le travail sur l'idée de masses soulevées et sur les voiles courbes. L'entreprise Quillery a coulé pour ce projet des voiles de 7,50 m de hauteur avec du béton auto-plaçant produit par BRC. La salle est un fût cylindrique décollé du sol. Elle est enveloppée par une sorte d'enchaînement de foyers dont les volumes orthogonaux révèlent de l'intérieur comme de l'extérieur l'émergence du volume de la salle. C'est en fait la lumière naturelle qui glisse le long du cylindre au droit de la jonction entre la salle et les foyers et marque la césure entre les volumes. Du fait des hauteurs de coulage obtenues avec le béton auto plaçant le cylindre haut de 15 m a été coulé en deux passes. Un travail important sur le calepinage a eu lieu entre architectes et entreprises, pour trouver un équilibre entre la logique du béton auto plaçant et le calepin voulu par l'architecte. Sur l'ensemble du projet le béton apparent présente une très bonne qualité de parement. Son unité convient tout à fait au travail sur la volumétrie développée ici.

CENTRE CULTUREL À MEAUX

Le centre Culturel de Meaux met en œuvre du béton préfabriqué et du béton coulé en place. Le béton préfabriqué se lit comme un élément d'enveloppe tandis que le béton coulé exprime l'idée de masse et de compression. Le volume de la salle de spectacle est entièrement

coulé en place, la sous-face laissée brute est seulement peinte pour obtenir une plus grande luminosité dans le hall-foyer, qui vient en partie se loger dessous. Des poutres en encorbellement portent les panneaux préfabriqués, dont la disposition permet d'orienter les arrivées de lumière ou de mettre en scène des vues cadrées sur la ville de Meaux.

La présence dans cette architecture de masses ou de parois soulevées contribue à délimiter des espaces ouverts qui sont en même temps tenus. La lumière vient y jouer des contrastes assez forts. La perception est confrontée en permanence à une opposition entre le plein et le vide, où d'une façon paradoxale le plein semble être en haut et le vide en bas. Pour J. Ripault cela fabrique des lieux qui ont une incontestable intensité.

Dans la salle le béton reste brut pour donner un aspect urbain, soulignant qu'il s'agit d'un lieu public de la cité, où les habitants se retrouvent pour voir tel ou tel spectacle. La présence du béton renvoie à l'idée de façade alors que le bois et le tissu ont une image plus intime. Dans la partie médiathèque, la sous-face de la couverture est en béton brut qui garde l'empreinte des planches de coffrage.

SIÈGE D'EDF-GDF À BREST

Le siège d'EDF-GDF à Brest (en béton préfabriqué) est une autre illustration du travail sur des masses pleines opaques en opposition avec des éléments ouverts, transparents, en jouant sur une opposition assez brutale entre le plein et le vide. ●



Plasticité, finesse, élancement (Jean-Pierre Lott, Architecte)



Présentation de l'ESPEMEN de Poitiers

Le propos de l'architecte J.-P. Lott s'appuie, en premier lieu, sur la présentation du bâtiment de l'ESPEMEN à Poitiers qu'il a conçu et qui est terminé depuis deux ans. Il s'agit d'une École de formation des personnels administratifs de l'Éducation Nationale. Située à Paris, elle a été délocalisée en périphérie du site du Futuroscope de Poitiers. Cette école reçoit des stagiaires pour une durée d'une semaine à quinze jours. Le bâtiment d'une superficie de 15 000 m², doit contenir l'ensemble des activités permettant le bon déroulement de ces stages. L'édifice, de taille importante, est constitué de différents éléments abritant une partie de programmes spécifiques (hébergement de 120 chambres, restaurant de 1000 rationnaires, un auditorium, une bibliothèque, des salles de cours, etc.), le tout composant un ensemble unique et cohérent. Le jeu des formes et la plasticité autorisés par le béton permettent de figurer l'ensemble des éléments de programme. Dans le cadre de cette architecture, le béton est idéal pour figurer les idées apparues dès les premières études, pour donner image aux concepts et vraiment construire les dessins. L'abstraction qu'il autorise est fondamentale pour J.-P. Lott dans son travail d'architecte.

UN BÂTIMENT QUI CRÉE SON PROPRE PAYSAGE

Du fait de la petite dimension du terrain d'assiette, le bâtiment s'inscrit dans un décaissé d'un niveau. Ceci permet de créer des espaces de recul et de développer la

volumétrie souhaitée, afin de donner de la respiration et de l'élancement au bâtiment. Il en résulte que le sol général est à un niveau en dessous du terrain naturel. Ainsi les plans inclinés, les voûtes, les coques qui caractérisent cette architecture font en sorte que l'édifice semble très lié à son site et qu'il donne le sentiment d'en émerger. Le lien du bâtiment avec le terrain lui-même est plus fort qu'avec l'environnement construit. Ce bâtiment assez introverti crée lui-même son propre paysage et son rapport à ce site peu urbain. La façade principale est marquée par la présence d'une grande coque en béton qui abrite le hall principal et l'amphithéâtre. Le béton démontre qu'il est parfaitement adapté à cette architecture de volumes et de courbes, ainsi qu'au travail sur la liberté des formes.

LA COQUE EN BÉTON ABRITE LE HALL



Sous la coque, le hall principal qui se développe sur plusieurs niveaux est à l'échelle du bâtiment. Il révèle tout un jeu de courbes et donne accès aux différentes zones d'activités de l'école. Dans sa plus grande dimension, cette coque a une portée de 80 m. La perception spatiale est liée à cette expression du franchissement. Partout la lumière naturelle agrément les lieux de sa présence et accompagne les mouvements des formes et la mise en scène des circulations.

LE BÉTON SCULPTE CETTE ARCHITECTURE

Dans ce projet comme dans d'autres, le travail sur les formes arrondies se développe aussi bien en plan qu'en coupe. Le béton préfabriqué ou coulé en place permet de résoudre les problèmes de portées, les décalages de plans, les mouvements de courbes, etc... Il permet de résoudre parfaitement toutes les formes grâce à des coffrages spécifiques. Ce bâtiment s'est construit dans des délais courts puisque le chantier n'a duré que 10 mois et son coût de l'ordre de 6 000 F le m² SHON est peu élevé. Tout l'édifice est construit en béton gris, l'ensemble étant ragréé et peint. Pour recouvrir les coques, des résines étanches sont utilisées.

Présentation de l'ESIEE d'Amiens et d'autres projets

D'autres opérations ont été réalisées précédemment dans le même esprit, comme l'ESIEE à Amiens. Cette école a 5 ans. De la même façon que dans le projet de Poitiers, un grand hall donne depuis le rez-de-chaussée accès à tous les éléments du programme.

La partie la plus spécifique est ici la coque qui accueille les trois amphithéâtres de l'école. Reposant sur un socle circulaire de 18 m, son diamètre en partie haute est de 50 m. Elle est entièrement réalisée en béton avec une précontrainte circulaire. Le béton a été coulé dans un vaste coffrage définissant la forme de la coque.

Cet ouvrage est calculé à la fissuration préjudiciable. Pour le Palais de Justice d'Evreux, un vaste mur incliné avec un dévers de 14 m donne à l'édifice son caractère institutionnel. Dans le bâtiment de l'université d'Evreux, on retrouve une architecture faite de courbes et de coques. La coque qui abrite la bibliothèque franchit 70 m sans points intermédiaires. Enfin le collège Kennedy qui vient de se terminer au Mans se situe dans un quartier très déstructuré. Son architecture de volumes plastiques cherche à donner une identité au lieu et à créer un événement.

Les bétons à ultra-hautes performances

(Paul Acker, Directeur des projets des recherches nouveaux bétons/Lafarge)

Les bétons fibrés ultraperformants (BFUP) déclinent toute une série de propriétés importantes (physiques, mécaniques, esthétiques, durabilité...). Ce sont en premier des matériaux de structure qui présentent des très hautes résistances mécaniques. C'est cette résistance qui permet de les classer, car d'elle découlent les autres propriétés. Ainsi dans toute la gamme des bétons, on peut établir une certaine classification avec une raison géométrique d'ordre 1,5. De 20 à 30 MPa on parle de bétons ordinaires, de 30 à 50 MPa de béton de structure, de 50 à 80 MPa de béton de haute performance, de 80 à 130 MPa de béton de très haute performance et de 130 à 200 MPa de béton de ultra-haute performance. Lorsque ces derniers, fibrés, présentent en plus un comportement ductile en traction, on les appelle bétons fibrés ultra-performants (BFUP).

L'OFFRE EN BFUP

Dans le domaine des BFUP, il existe aujourd'hui deux produits industriels sur le marché. L'un, appelé *Ductal*®, est développé par trois partenaires BOUYGUES, LAFARGE, RHODIA; l'autre dénommé BSI est produit par une filiale du groupe EIFFAGE. A cela s'ajoute les travaux du LCPC qui continue à travailler sur cette famille de matériaux. Le matériau de marque *Ductal*® recouvre une gamme assez large de BFUP allant de 150 MPa à 240 MPa en compression, avec des comportements en tractions ductiles. Dans le domaine de la rhéologie ces bétons peuvent être totalement auto-plaçants, être à "zéro slump", ce qui permet des fabrications d'éléments par extrusion. Au niveau des propriétés de surface, les capacités sont extraordinaires. Il est possible de reproduire avec une très grande qualité d'état de surface toutes les textures possibles de peaux coffrantes. La palette des couleurs, qui s'étend du blanc au noir profond en passant par toutes les nuances colorées, est très riche.

LES PROPRIÉTÉS DES BFUP

Lorsqu'on effectue des essais de flexion sur des éprouvettes non armées, les bétons ordinaires, les bétons de structure et les bétons de haute performance présentent ce que l'on appelle une rupture

"fragile". Cela signifie que lorsque la limite élastique du matériau est atteinte, il se produit une rupture brutale et instantanée. De plus un matériau qui présente un comportement fragile est très sensible aux premiers défauts, et les valeurs de sa résistance en traction sont très dispersées. Il en résulte que pour tous ces bétons les armatures passives sont indispensables pour reprendre les efforts de traction, les contraintes transversales, et éviter le comportement fragile.

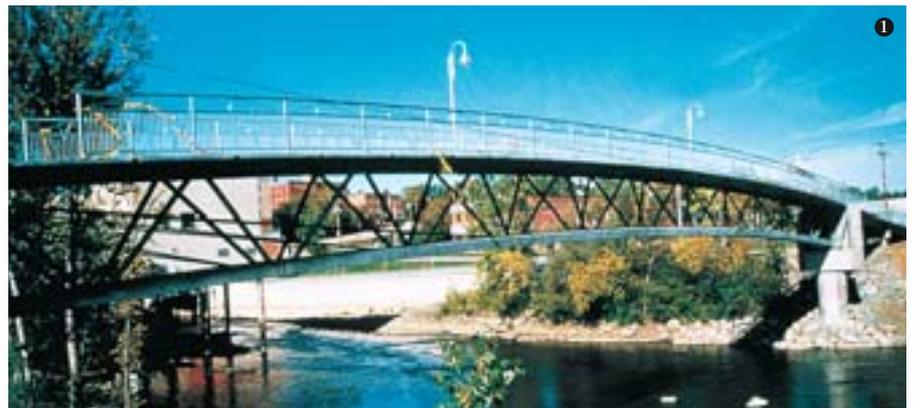
La ductilité est la propriété majeure de tous les BFUP. Par exemple, les BFUP de la marque *Ductal*® offrent une résistance en traction de l'ordre de 45 MPa. Cela représente un véritable saut technologique, car avec ce matériau il n'est plus nécessaire d'avoir des armatures passives. Le *Ductal*® peut contenir des fibres métalliques lorsque les résistances mécaniques sont privilégiées ou des fibres polymères lorsque l'aspect de surface est prépondérant. Si des résistances au jeune âge importantes sont recherchées, il est possible d'utiliser un traitement thermique classique. Dans ce cas l'hydratation du matériau est totalement terminée et à la sortie du traitement le matériau est inerte, il a épuisé son retrait, le module d'YOUNG ne change plus, les résistances mécaniques n'évoluent plus. Pour tous les essais conventionnels de durabilité les résultats montrent des performances qui peuvent être qualifiées d'extraordinaires. Par exemple, pour le gel-dégel aucune variation n'est décelée, pour la profondeur de carbonatation, les mesures sont inférieures au millimètre (ce qui n'est pratiquement pas mesurable)...

QUELQUES RÉALISATIONS EN BFUP

Parmi les réalisations faisant appel à ce type de matériau, il faut citer la passerelle pour piétons de Sherbrooke ① au Canada, réalisée en éléments préfabriqués par une petite entreprise. La poutre inférieure présente une section de 18 x 40 cm, le hourdis supérieur est une dalle nervurée dont l'épaisseur en partie courante est de 30 mm, les diagonales courantes sont des tubes métalliques fins remplis de béton (le métal ne joue pas de rôle direct dans la résistance, il sert de coffrage perdu et améliore le comportement du matériau à la rupture par un effet de confinement), la précontrainte est assurée par des câbles extérieurs. De façon générale, le BFUP est en forte synergie avec les techniques de précontrainte et plus particulièrement la précontrainte extérieure ou par fils adhérents.

L'utilisation de BFUP dans les auto réfrigérants de la centrale nucléaire de Cattenom démontre l'intérêt de ce matériau qui peut résister à des atmosphères extrêmement agressives.

Autres exemples, à la Réunion, des plaques d'ancrage en *Ductal*® remplacent ici la fonte en étant moins cher et plus durable. Pour la nouvelle gare TGV de Monaco la réalisation de panneaux acoustiques en *Ductal*® permet de répondre aux exigences de finesse de la résille souhaitée par l'architecte. Au-delà de ces quelques exemples, huit secteurs d'applications importants des *Ductal*® sont identifiés au stade actuel, les structures de bâtiment, le béton architectonique de bâtiment, les ouvrages d'art, le nucléaire (génie civil et confinement), etc. ●



Bétons ultra-hautes performances -BUHP-

(Animé par Christian Vernet, Senior scientist/Lafarge)



Au cours de cet atelier, les participants ont montré le plus vif intérêt pour les propriétés des nouveaux bétons à ultra-hautes performances (BUHP) qui ont été présentés. Une large place a été laissée au dialogue, en privilégiant la démarche d'un atelier plutôt que celle d'une conférence ex cathedra. Les propriétés exceptionnelles de ces matériaux, dont l'origine réside dans leur microstructure multi-échelle, ont été illustrées en partant de l'échelle millimétrique, qui est celle des plus grosses particules constitutives, puis en allant jusqu'à l'échelle moléculaire.

Les propriétés mécaniques, dont les plus novatrices sont la *ténacité* (résistance à la micro-fissuration) et la *ductilité* (déformabilité sous charge sans rupture fragile, capacité à dissiper l'énergie de rupture, par exemple en cas de séisme), sont liées à l'interaction fibre-matrice. La dimension des fibres est ajustée en harmonie avec la dimension des plus grosses particules de la matrice. Leur adhérence est contrôlée par la chimie de surface, et par le remplis-

sage de la couche de contact fibre-matrice (auréole de transition) par des particules ultra-fines et par les hydrates du ciment. La résistance en compression, typiquement supérieure à 200 MPa, est liée à l'absence de porosité capillaire, et à l'exploitation maximale de la réaction pouzzolanique des fumées de silice, pour créer des hydrates plus résistants.

Les aspects de surface, proches des céramiques, ont été illustrés par divers échantillons de *Ductal®* qui ont circulé dans la salle. La capacité des *Ductal®* à épouser dans les plus fins détails les surfaces coffrantes est liée à la distribution des fines dans la gamme du micromètre, et à la maîtrise de l'affinité physicochimique entre la pâte et la peau coffrante. Divers aspects de surface, lisse, satiné, mat, brillant, structuré, peuvent être obtenus, en évitant la présence de bulles à l'interface, quelle que soit la teneur en air occlus du béton.

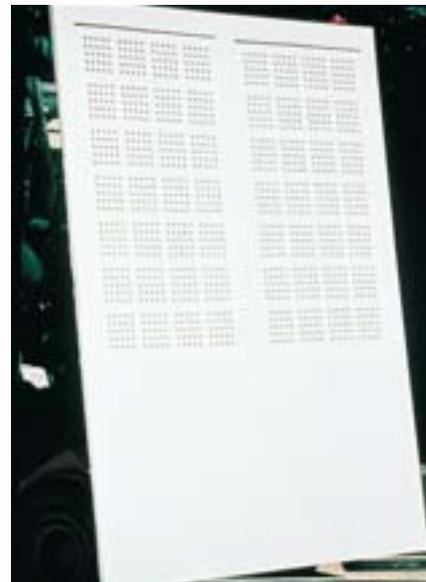
La durabilité exceptionnelle de ces matériaux est liée à plusieurs aspects :

- *L'absence de porosité capillaire* (pores de taille supérieure au micron)
- *La porosité à très petite échelle*, celle du nanomètre (nanopores) n'est pas connectée. Ainsi, une espèce étrangère (CO₂ atmosphérique, ions chlorure, molécules diverses...) qui diffuse à travers le matériau doit parcourir un trajet extrêmement tortueux à travers les hydrates eux-mêmes pour progresser. Les coefficients de perméabilité et de diffusivité des *Ductal®* sont par exemple 10 à 100 fois inférieurs à ceux des roches naturelles les plus compactes, comme le granit.
- *Le contenu en clinker résiduel*, qui permet au matériau de lutter efficacement contre divers agresseurs chimiques en reformant de nouveaux hydrates, même dans le cas extrême d'une microfissuration d'origine mécanique. Ainsi, il a été démontré que, non seulement ce clinker résiduel ne constitue pas une source de gonflement potentiel, mais qu'au contraire il contribue à la résistance chimique du matériau.

- *La grande stabilité chimique des hydrates*, qui présente un état de polymérisation que l'on ne rencontre pas dans les bétons courants. Ceci a pu être étudié grâce aux techniques les plus modernes de microscopie électronique à transmission, et de résonance magnétique nucléaire (RMN).

De nombreuses questions ont été posées par l'assistance, notamment :

- *Résistance au feu* : une formule "*Ductal®* feu" a été développée. A ce titre, il faut rappeler que, même s'il n'est pas parfait, le béton est le matériau le plus sécurisant sous cet aspect, loin devant l'acier.
- *Possibilités de mise en œuvre sur site* : la gamme des *Ductal®* est compatible avec les installations classiques de malaxage. Le matériau peut être livré sous forme de prémix et ne nécessite donc pas d'installation particulière de dosage ni de silotage.
- *Prix au m³* : du point de vue de ses performances et des solutions constructives qui sont associées, *Ductal®* est plus proche de l'acier que du béton ordinaire, cela n'a donc guère de sens de comparer les prix au m³ de ces matériaux, c'est le prix de l'ouvrage, ici, avec la suppression des armatures passives, des fondations plus légères, un temps de chantier diminué, et des sections de pièces plus minces, c'est tout l'ensemble qui doit être pris en considération. ●



Spécifications, prescriptions architecturales parements, esthétique

(Animé par Jean-Pierre Aury, Plasticien)

L'atelier animé par J.-P. Aury porte essentiellement sur la prescription architecturale du matériau béton. L'animateur rappelle un certain nombre de règles de base dans la démarche à suivre et ensuite les participants posent des questions propres à leur pratique pour les professionnels ou à leurs attentes pour les étudiants. Le développement qui suit témoigne des différents thèmes abordés. J.-P. Aury rappelle que l'ensemble des prescriptions à effectuer n'est pas uniquement technique. En effet les documents strictement techniques ne gèrent pas par exemple les qualités de béton que l'on peut attendre.

Il faut préciser la couleur souhaitée (blanc, gris clair, gris, etc.), par exemple le fait de prescrire du béton de ciment blanc n'implique pas nécessairement que le béton sera parfaitement blanc si sa couleur n'est pas précisée dans les pièces écrites. Pour les bétons gris la carrière de provenance du ciment joue un rôle sur la couleur, ainsi que le type de ciment



employé. Il faut aussi veiller à la propreté des granulats. Dans le cas du calepinage de joints verticaux et horizontaux et de trous d'écarteurs de banche, des dessins très précis doivent être présents dans l'appel d'offre pour éviter toute tentative de modification.

La description détaillée de la composition d'un béton ne suffit pas, les pièces écrites doivent prévoir de façon très précise la réalisation d'échantillons en amont. Ainsi tout le monde peut ensuite parler le même langage sur le chantier. Une bonne solution consiste à demander dans les pièces écrites la réalisation d'un prototype

(voire plusieurs) avant le chantier. Le prototype permet aux interlocuteurs du projet de réagir (maîtres d'ouvrages, architectes, entreprises, ouvriers...) et de se motiver pour réussir une œuvre commune. Un prototype est souvent l'occasion de mettre en place les relations entre les différents intervenants.

Pour les bétons colorés, l'utilisation d'éléments minéraux naturels ayant déjà des caractéristiques de teinte est préférable. Pour certaines couleurs il est nécessaire d'utiliser des colorants. Il ne faut pas les employer de façon homéopathique, le taux de 3 % est la bonne cible (cela peut aller jusqu'à 5 %). En ce qui concerne les bétons colorés aux oxydes, il est plus prudent de les réserver à la préfabrication qu'au béton coulé in situ.

En règle générale pour colorer le béton il faut prendre des terres naturelles ou des oxydes métalliques et là aussi faire fabriquer des échantillons et procéder à des essais préalables. La qualité des bétons n'est pas liée à la taille de l'entreprise qui les réalise. ●

Traitements des surfaces et des matières

(Animé par Bernard Delabèche, Responsable prescription Pieri et François Gindre, Responsable marketing EPI)



Dans cet atelier, architectes et étudiants en architecture ont été sensibilisés sur les gammes de textures et de couleurs que peuvent présenter les surfaces de béton. Les participants ont ainsi pu appréhender l'étendue des choix possibles en la matière et toutes les possibilités offertes en ce qui concerne le traitement du béton apparent coulé en place ou sous forme d'éléments préfabriqués en usine.

Les deux animateurs étaient accompagnés par J.-M. Thery, responsable du laboratoire EPI, qui a présenté des variétés de bétons et des granulats de différentes origines. Des plaques de béton confectionnées à l'avance ont pu être manipulées par les participants.

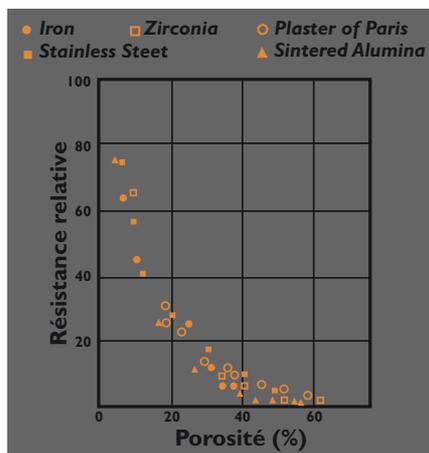
Les animateurs ont présenté les différents traitements de surface (poli, acide, désactivé, sablé et brut) et expliqué l'incidence de la nature des granulats sur les coloris et l'aspect final. Pour la couleur, ils ont souligné qu'elle peut provenir du choix d'un granulat de base, de l'incorporation d'un colorant dans la masse du béton au moment de sa conception, ou de l'application d'une lasure à la surface d'un béton durci. La technique innovante du béton photogravé qui reproduit en relief les détails d'une photographie a été présentée.

Toutes ces présentations ont donné lieu à de nombreuses questions, les architectes ont aussi profité de ce temps de l'atelier pour poser des questions particulières, parfois complexes, concernant leurs propres projets. ●



Bétons hautes performances : béton frais, compositions, rhéologie (Animé par R. Le Roy, Docteur ENPC/Labo. des Ponts et Chaussées)

Animé par R. Le Roy, cet atelier vise à montrer à l'échelle des poudres, que les approches d'empilements granulaires permettent de minimiser la porosité de mélanges, en particulier des bétons.



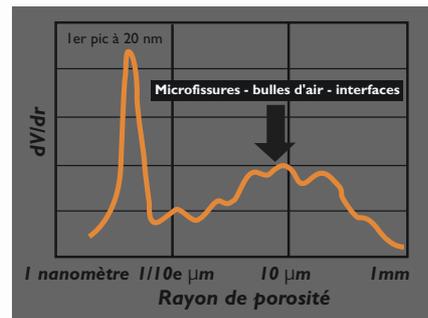
Différents types d'additions minérales sont physiquement présentés (métakasolin, pouzzolanes, cendres volantes, fillers calcaires, fillers siliceux, fumées de silice) ; les nombreuses questions posées illustrent l'intérêt des participants. On s'est appuyé sur des essais d'étalement, représentatifs du seuil d'écoulement du matériau, et des mesures du temps de passage au cône de Marsh, permettant la mesure de la **viscosité**.

Ainsi ont été confectionnées différentes matrices fluides de seuil d'écoulement identique mais de dosages en eau variables : matrice ne contenant que du ciment puis une autre dans laquelle on a substitué une partie du ciment dans des proportions optimales prédéterminées, de telle sorte que l'on observe une diminution significative du dosage en eau. On montre ainsi que l'optimisation granulaire, permettant de diminuer la teneur en eau, entraîne une augmentation de la fraction solide. **La viscosité**, toutes choses égales par ailleurs, augmente, conduisant à des bétons peu fluides.

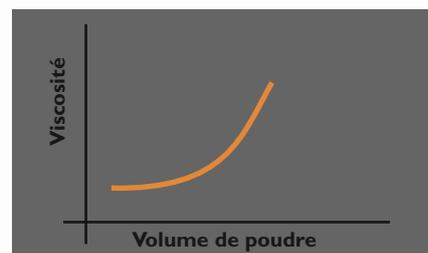
On montre que l'on peut jouer dans la composition parallèlement sur deux propriétés rhéologiques : augmentation de la durée de remplissage tout en maintenant la valeur du seuil d'écoulement.

Enfin, on a illustré le rôle de la **déflouclation** en montrant par mesures de l'étalement, la diminution du seuil d'écoulement et la viscosité d'une pâte déflouclée par rapport à ceux d'une pâte de référence.

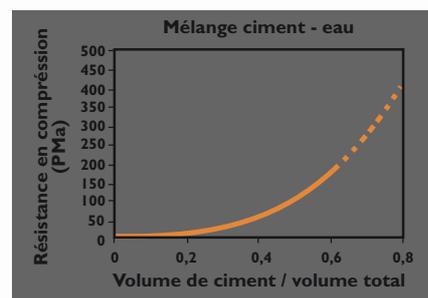
Schémas repris de la conférence de R. Le Roy.



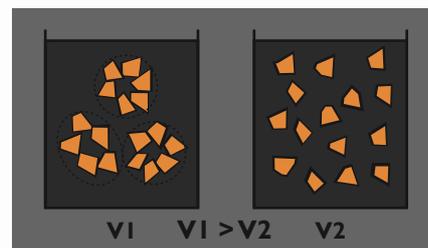
Distribution classique de la porosité du béton ordinaire



Viscosité en fonction du volume de poudre



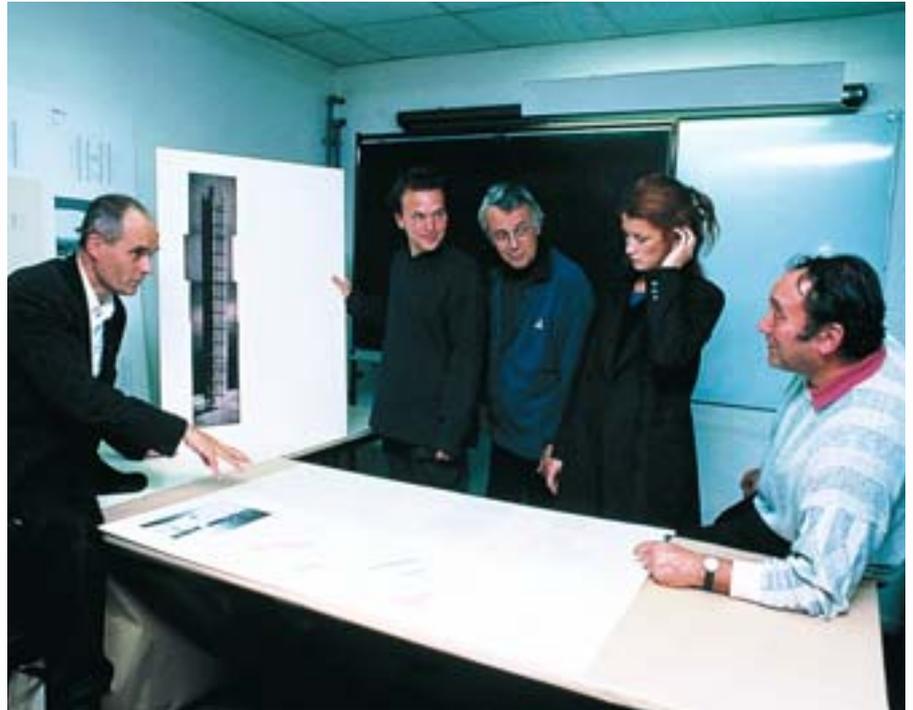
La loi de Féret (1892)



La flocculation augmente le volume des particules fines. Déflouclation obtenue par les superplastifiants.

Champs d'applications architecturales. Travaux d'étudiants de 4^{ème} année (Animé par B. Fournier, J.-P. Laute, J. Mas, Enseignants à l'E.A.P.V.)

Cet atelier constitue une fenêtre ouverte sur le fruit de la réflexion d'étudiants, qu'ils encadrent à l'EAPV, menée au cours des deux années universitaires précédentes au sein d'un module d'enseignement "BHP & CONCEPTION ARCHITECTURALE".



Présentés par leurs auteurs, les projets illustrent l'état d'avancement des explorations en cours sur des thèmes volontairement variés.

Par le truchement fréquent de la réinterprétation de projets emblématiques, tels :

la Bibliothèque Sainte Geneviève de Labrouste, les Case Study Houses de Eames et Saarinen, l'Hôtel Industriel de Perrault, la Johnson Company de Wright, la Maison du Peuple de Beaudoin, Bodiansky, Lods et Prouvé, la Tour sans fin de Nouvel, l'Unité d'Habitation de Le Corbusier,

les champs actuellement abordés concernent :

la continuité de la matière, l'élanement, l'expression plastique, la liberté formelle, la sincérité structurelle, la façade, la maison individuelle, la typologie des logements collectifs, les coques, les grandes portées, les parements, les pièces de liaison, la préfabrication légère, la texture.

Les résultats immédiatement tangibles de ces rencontres sont l'effet d'entraînements suscités auprès d'enseignants

intervenant dans d'autres écoles d'architecture et l'apport aux étudiants constitué par la pertinence des questions soulevées par différents participants. ●



Bétons : révolution-architecture ? (Animée par François Chaslin, Écrivain)

Participants à la table ronde :

- François CHASLIN, écrivain (animateur du débat)
- Marcel CHEYREZY, directeur scientifique/Bouygues
- Dominique COULON, architecte
- Jean MAS, architecte
- Francis SOLER, architecte
- Michel PLATZER, maître d'ouvrage, PDG Générale de Projets

FRANCIS SOLER

En présentant l'immeuble de logements situé dans le voisinage immédiat de la Bibliothèque de France, F. Soler souligne qu'il a pu pour la première fois travailler une structure dans l'esprit de la "maison Domino de Le Corbusier", permettant de développer le principe du plan libre pour l'organisation des appartements. Dans ce projet, maîtres d'ouvrage et entreprises ont accepté de sortir du carcan habituel des voiles en béton banché tramés à 2,70 ou 5,40 m pour entrer dans un système de plan totalement libre. Ce dernier permet d'aménager des appartements, mais pourrait tout aussi bien accueillir des bureaux, une résidence pour étudiants, etc.

Cela correspond à un souci de pouvoir faire évoluer les bâtiments et leur destination dans la ville. Sur le plan constructif, l'idée dans ce projet est de réaliser une structure qui utilise un minimum de matière. Les éléments structurels sont calculés avec une recherche de performance maximale, pour permettre de réaliser un bâtiment linéaire de 80 m de long sur 14 m de large, dont l'ossature en béton est constituée de dalles de plancher de 19 cm d'épaisseur, portées uniquement par un voile central et une série de petits poteaux périphériques carrés de 22x22 cm (tramés sur un pas de 3,60 m).

L'ensemble est réalisé avec du béton à haute performance. La façade double peau en verre sérigraphié vient masquer les poteaux carrés de telle sorte que l'ossature n'est plus lisible dans le bâtiment fini. Sans rentrer dans tous les aspects techniques et de mise en œuvre, il faut noter que les BHP ont permis d'obtenir la section de 22x22 cm souhaitée, alors que dans un schéma traditionnel elle aurait été

de l'ordre de 40x40 cm. De la même façon, grâce à ce type de béton il est possible d'éviter toute retombée de poutres.

Ce travail propose une économie de matière pour obtenir une structure précisément affinée qui répond à la volonté de l'architecte de réaliser des appartements baignés de lumière naturelle sans nuire au confort domestique. De plus on obtient avec cette structure un bâtiment qui possède un excellent potentiel d'adaptation à l'avenir et aux inévitables modifications de l'utilisation de l'ouvrage. Il faut aussi noter qu'il ne s'agit pas là d'une expérience isolée, car F. Soler réalise un autre immeuble de logements sur le même principe à Clichy-sous-Bois, avec un financement de type PLA-TS.

A la suite de cette présentation, un débat s'engage dans la salle sur l'architecture de ce bâtiment, le rôle des entreprises dans la conception de façon générale, la possibilité de faire d'autres choix techniques sur ce projet, le rôle urbain des bâtiments...

“une structure dans l'esprit de la "maison Domino de Le Corbusier", permettant de développer le principe du plan libre pour l'organisation des appartements”

Les différents interlocuteurs développent parfois des arguments opposés correspondant à leur intime conviction. F. Soler affirme avec force qu'il est convaincu de la nécessité d'offrir à l'usager un maximum de liberté, ce qui se tra-

duit entre autres choses par la réalisation de façades totalement transparentes. Ces façades sont en fait constituées de plusieurs "couches" (stores extérieurs, vitrages, sérigraphie, stores opaques...) qui offrent à l'habitant la possibilité de choisir lui-même le mode d'occultation des parois de façade en fonction de l'orientation, de la course du soleil, de ses goûts personnels, etc.

F. Chaslin propose que par rapport aux questions de transparence, d'opacité, etc. d'autres sensibilités architecturales s'expriment.

DOMINIQUE COULON

Pour D. Coulon le travail sur la transparence et l'opacité permet de doser la présence de la lumière naturelle dans un bâtiment. Il ne partage pas le point de vue d'une transparence maximale et intégrale de la façade. Il est attaché à la prise en compte de l'environnement et du paysage et au traitement des façades en fonction du contexte. Ainsi au collège Pasteur de Strasbourg ❶ une façade transparente ouvre les classes sur le paysage du canal bordé de platanes, tandis qu'une autre (proche d'une route et d'une voie ferrée) est plus opaque. Elle est traitée pour permettre l'arrivée de lumière de façon zénithale sans ouvrir l'espace sur les nuisances et un paysage peu attrayant.

Par rapport au béton D. Coulon souligne qu'il a utilisé le béton brut pour faire ressortir la volumétrie. Pour lui, il existe un maniérisme qui consiste à aligner des trous de banches de façon régulière et sa sensibilité le pousse vers un béton moins sophistiqué, plus simple qui exprime la vérité du matériau.

MARCEL CHEYREZY

Pour la Bibliothèque de France l'architecte D. Perrault a refusé la présence visible des trous de banches ou des joints. Les 57 portiques concernés ont été réalisés avec des coffrages métalliques spécifiques qui reprenaient les poussées du béton dans des coffrages de 15 m de hauteur. Compte tenu de la particularité du projet et des importantes charges à

repandre, des bétons de 75 MPa ont été utilisés en certaines parties de l'ouvrage. A tous les points de vue le cahier des charges était extrêmement exigeant.

En citant cet exemple, M. Cheyrezy veut souligner que les entreprises attendent aussi des architectes des exigences et qu'ils soient ambitieux pour poser des problèmes à résoudre. Car il existe depuis quelques années un éventail élargi de solutions techniques qui permet de relever de nouveaux défis. Ainsi les découvertes effectuées en laboratoire pourront se développer sur les terrains au niveau des ouvrages.

F Chaslin demande à J. Mas de présenter les objectifs du travail effectué avec les étudiants de Paris-Villemin sur les nouveaux bétons.

JEAN MAS

Au sein de l'École Paris-villemin, les étudiants explorent les progrès technologiques que les bétons pourraient faire émerger en terme de conception architecturale. Ainsi à travers différents champs de recherche nous essayons de voir comment, grâce à ces progrès, on peut imaginer des logements d'un nouveau type. Nous explorons aussi dans un autre champ tout ce que les innovations peuvent apporter au niveau des textures, de la continuité de la matière.

Pour J. Mas, toutes ces avancées technologiques ne sont pas encore suffisamment explorées. On peut légitimement se demander s'il est juste d'en appeler bétons les BUHP ? Ne permettront-ils pas de fabriquer des pièces moulées qui autoriseront la

conception de nouvelles structures et qui auront une expression plastique tout à fait nouvelle ?

MARCEL CHEYREZY

Les partenaires qui ont développé des BUHP se sont posés la question soulevée par J. Mas. Ils ont d'ailleurs choisi de les appeler *Ductal*® pour illustrer le fait qu'il y a dans ce matériau une capacité de déformation qui est en fait de la ductilité et pour éviter de les confondre avec les autres bétons qui ont des applications différentes. La capacité des BUHP à réaliser des pièces à simple ou à double courbure dans des épaisseurs de 2 cm a aussi très justement été soulignée. Ce matériau offre un grand potentiel en matière de réalisation de grandes couvertures tant du point de vue esthétique, formel et économique.

JEAN MAS

En tant qu'architecte praticien, il souligne qu'il éprouve des difficultés considérables pour essayer de mettre en œuvre dans sa pratique quotidienne ce que depuis trois ans il essaie de faire avec les étudiants. Chaque fois qu'une solution innovante est proposée, elle est étudiée avec réticence par les entreprises, pour être finalement refusée. De plus il constate une sorte de chantage au niveau de l'appel d'offre qui consiste à dire que parce que c'est innovant cela doit se payer beaucoup plus cher. L'architecte rencontre de grandes difficultés pour mettre en œuvre quoique ce soit avec des bétons innovants. A cela s'ajoute la difficulté de convaincre les maîtres d'ouvrage pour qu'ils acceptent de rentrer dans une dynamique de l'expérimentation sur certains projets. ●



La matière de tous les possibles ? (Animée par Bernard Marrey, Historien)

Participants à la table ronde :

- Paul ACKER, directeur des projets de recherche nouveaux bétons / Lafarge
- Jean-Michel LAGORCE, responsable produits BRC
- Jean-Pierre LOTT, architecte
- Jean-André MACCHINI, architecte
- Bernard MARREY, historien (animateur du débat)
- Jacques RIPAUT, architecte
- Aymeric ZUBLENA, architecte

BERNARD MARREY

Pour initier le débat, B. Marrey, historien et animateur de la seconde table ronde du colloque évoque, deux bâtiments anciens. L'un et l'autre témoignent de la hardiesse de leurs maîtres d'œuvre qui n'ont pas attendu l'existence de règles et de textes réglementaires pour utiliser le béton comme matériau de construction et matière d'architecture. En effet, Anatole de Beaudot a commencé la construction de Saint Jean de Montmartre en 1894 alors que le premier règlement du béton armé date de 1906. Le béton armé était alors un matériau quasiment inconnu. Sur le sol très en pente et de mauvaise qualité de la butte Montmartre, l'architecte a construit une crypte dont le plafond situé à 9 m de hauteur est porté par des piliers de 50 cm de section avec des arêtes de 10 cm. Ce plafond d'une épaisseur de 10 cm constitue aussi le plancher de l'église. Le chantier a été arrêté pendant 4 ans par les autorités, car personne ne croyait à l'époque que cette structure tiendrait. L'église a aujourd'hui plus de cent ans et le béton n'a pas bougé. Anatole de Beaudot et l'ingénieur Paul Cottancin ont pris un risque important pour l'époque.



Construit à la fin des années 50, le CNIT est un exemple du même type, qui détient toujours un record du monde de portée avec 220 m en façade et 238 m sous l'arête. Il a été construit par Nicolas Esquillan sur un croquis de Jean de Mailly et réalisé par trois entreprises : Boussiron, Coignet, Balency et Schuhl, qui étaient ce qu'on appelle actuellement des entreprises de taille moyenne. Le béton est mis en œuvre en 2 voiles minces de 65 mm armés de barres d'acier de 5,4 mm de diamètre. En certains endroits le béton a été coulé sur des pentes proches de 30%. Ici aussi architectes, ingénieurs et entreprises ont pris des risques, car aucun bureau d'études extérieurs aux entreprises n'a voulu s'engager. Le CNIT a une cinquantaine d'années et reste en la matière encore inégalé.



Ces deux exemples, comme bien d'autres d'ailleurs, font ressortir que le béton est à la fois une technique et un matériau. Il existe aujourd'hui nombre de bâtiments ou d'ouvrages d'art centenaires, dont le béton est dans un excellent état. Le fait que le béton mal entretenu, non entretenu, voire mal réalisé, résiste dans le temps, pose certainement un problème. A travers toutes les références qui sont aujourd'hui à notre disposition, force est de constater qu'un bon béton est toujours un beau béton.

AYMERIC ZUBLENA

Dans les années cinquante, il existait une sorte de recherche sur la question des voiles minces. Le CNIT déjà cité ou l'église de Guillaume Gillet à Royan s'inscrivent dans ce mouvement d'une architecture de courbes, de mouvements... En témoignent aussi toutes ces stations-services de la même époque qui mettent en œuvre paraboloides-hyperboliques, ellipses, etc. L'enthousiasme de ces recherches et ce genre de dynamique se sont éteints au fil des années, peut-être contraints par la domination d'une sorte de rigueur et de minimalisme ambiants. Il existe là très certainement de

vastes domaines à explorer. Sur le plan technique, A. Zublena pose 2 questions. Est-il possible de percer sans dommage des trous importants dans les bétons de hautes ou très hautes performances après coulage ? Quel est le comportement du BUHP en matière de résistance au feu ?

JACQUES RIPAUT

Dans un monde complexe, il n'est pas nécessaire de rajouter de la confusion générale. La question qui se pose est celle de la maîtrise des espaces. En cela il ne s'agit pas pour l'architecte de battre des records... Il a existé en effet par le passé une "époque flamboyante de la technique du béton" dont le CNIT est un exemple. Pourtant, la société n'a pas su préserver la pureté de cet édifice en le laissant envahir par un programme qui en a détruit à jamais l'espace. Les recherches en architecture ne sont pas centrées sur les mêmes questions que la recherche au niveau des matériaux. Il est incontestablement important de faire connaître l'avancée des recherches de pointe dans le domaine des matériaux. Mais il faut aussi garder à l'esprit que dans leur quotidien un grand nombre d'architectes se heurte par exemple à des bureaux de contrôle qui veulent les empêcher d'innover. Aujourd'hui, il faut souvent développer des efforts disproportionnés pour réaliser des choses somme toutes assez peu complexes. Par contre, lorsque sur un projet tous les acteurs sont portés par une même passion, tout se passe sans problème. Que la tendance soit minimaliste ou flamboyante n'est pas fondamental du moment que la qualité architecturale est présente.

PAUL ACKER

Les BHP et les BUHP présentent tout un ensemble de caractéristiques qui permettent aux architectes d'agir sur les formes et de les alléger. Dans ce domaine il est nécessaire de travailler et de créer de façon cohérente par rapport aux propriétés du matériau. Pour répondre à la question posée par A. Zublena, il est possible de percer des trous dans des bétons de ce type. Par contre cela écartera probablement la version béton de fibres métalliques, la version béton de fibres polymères est plus appropriée. La technologie de formulation permet d'ajuster le matériau à cela dès le départ. Par rapport à la question de la sécurité au

feu, les bétons courants sont des matériaux parmi les plus performants vis à vis de la sécurité au feu. On entend parler de contre-performance des bétons de hautes performances par rapport au feu. En faisant l'expertise des BHP (B50, B60) des voussoirs du tunnel sous la Manche, on a constaté la présence d'un effet d'écaillage. Le sol était jonché d'écaillures de 2 à 3 mm d'épaisseur. Connaissant la température du feu et sa durée, des calculs ont pu être faits. Ils ont démontré une proportionnalité parfaite entre la durée du feu et la profondeur de béton attaquée, qui est de l'ordre de 2 centimètres par heure. Il faut par ailleurs considérer que les écaillures qui tombent au sol n'ont aucune conséquence sur le feu lui-même et sur la sécurité des personnes. De plus, la lenteur de la dégradation constatée ne remet pas en cause l'intervention des sauveteurs. Il existe en effet une dégradation des performances mécaniques, qui a des conséquences sur la portance de la structure. S'il existe en la matière une limitation, elle est moins importante que pour les structures métalliques. En effet, par rapport à ces dernières, des structures comparables en BHP présentent une résistance au feu largement plus performante. Pour les BUHP, les essais au feu sont à leur début. Les ingénieurs disposent de toute une série d'outils, qui permettent d'ajuster la formulation en fonction d'un cahier des charges précis.

JEAN-MICHEL LAGORCE

J.-M. Lagorce présente le béton auto-plaçant (BAP) proposé par sa société. Ce béton est développé depuis 1996, année où il a fait l'objet d'essais en laboratoire. En 1997, il a été expérimenté sur chantier en lieu et place d'un béton traditionnel. En 1998, il est mis en œuvre sur le chantier de Notre Dame de la Sagesse à Paris 13^{ème}, en béton brut de décoffrage. Sur le plan technique ce béton est très résistant. Un apport important de fines est indispensable à la réalisation d'un BAP de telle sorte qu'il présente au minimum une résistance de 35 MPa. Dans le chantier du projet de I.M. Pei à la Défense, un BAP en B60 est actuellement mis en œuvre. De part sa composition le BAP est aussi un béton durable. Le E/C a une valeur de 0,35 à 0,40 ; il s'agit donc d'une présence d'eau réduite calculée pour uniquement hydrater le ciment. Une présence d'eau minimale permet

d'avoir un retrait très faible. De ce fait le béton obtenu est étanche. Des BAP réalisés dans les travaux publiés ont fait l'objet de mesures qui font apparaître des taux d'imperméabilité de 10 -11 à 10 -12. Sur le plan de la mise en œuvre, le béton auto-plaçant ne nécessite ni vibration interne ni vibration externe et il s'adapte à toutes les formes. Le BAP présente des qualités esthétiques. Comme il n'est pas vibré, les imperfections de surface dues à une mauvaise vibration n'existent plus. La forte présence de fines (500 kg/m³) permet d'avoir une très bonne cohésion au coulage. Ce béton parfaitement malléable garantit aussi une résistance optimale (minimum B40). Il s'agit d'un béton véritablement au service des architectes et de l'esthétique de leurs bâtiments. En réponse à une question portant sur la faible utilisation du BHP, J.-M. Lagorce précise que ce matériau a commencé à être mis en œuvre en 1998. Il est donc encore très récent et peu connu, mais représente à son avis le béton du XXI^{ème} siècle.

JACQUES RIPAULT

Face aux performances et aux possibilités des nouveaux bétons présentées lors du colloque, J. Ripault souligne le fait que certaines entreprises ne semblent plus intéressées par le beau béton au quotidien. Les maîtres d'œuvre n'arrêtent pas de demander des prestations de qualité dans des coûts qui restent normaux. Comment est-il possible de sensibiliser les entreprises à cette demande ?

PAUL ACKER

L'observation précédente témoigne d'un problème réel. Par exemple, LAFARGE Bétons a lancé des bétons auto-plaçants pour les voiles de bâtiment. Cela se met en place sous forme de partenariat avec les entreprises du bâtiment qui contribuent à la formation du personnel de ces entreprises aux nouveaux matériaux.

AYMERIC ZUBLENA

Par rapport à la question le béton "matière de tous les possibles ?", A. Zublena pense que les bétons présentés au cours du colloque sont porteurs d'un renouveau de la réflexion formelle. Il est possible et même certain que dans les années

futures des architectes vont se saisir de ces bétons pour explorer des voies nouvelles, avec des échecs, des exercices formels sans lendemain et des réussites unanimement saluées.

JEAN-ANDRÉ MACCHINI

Par rapport aux incontestables avancées technologiques du béton, force est de constater que sur le terrain, les choses sont moins nettes. Les entreprises ne sont pas seules en cause, l'ingénierie du béton est aussi assez souvent frileuse face aux innovations même modestes. J.-A. Machini souligne que dans son expérience personnelle, il n'a pas rencontré la même attitude dans le domaine de la charpente métallique, qui a bénéficié de l'action de bureaux d'études innovants.

J. MAS

J. Mas souhaite que les architectes présents expriment en conclusion leurs attentes face au matériau béton et à ses innovations.

JACQUES RIPAULT

L'attente prioritaire de J. Ripault est d'avoir la possibilité de minimiser les appuis. Il souligne aussi qu'il est primordial que le béton reste du béton, qu'il garde son identité et certaines de ses petites imperfections.

JEAN-PIERRE LOTT

La conception d'un bâtiment se fait dans un environnement qui va du maître d'ouvrage aux entreprises. L'architecte n'a pas la prétention d'être omniscient, mais tant qu'il sera le seul porteur d'innovations, il sera isolé. Quand toutes ces nouvelles technologies et ces nouveaux bétons seront acceptés et reconnus par tous, les architectes pourront travailler beaucoup mieux. Pour ses projets J.-P. Lott précise qu'il travaille avec un seul et unique bureau d'études et à chaque fois il faut faire un travail pédagogique avec les bureaux d'études locaux ou ceux des entreprises.

BERNARD MARREY

En conclusion, il apparaît que l'architecte est, à travers son projet, le porteur de l'innovation qu'elle soit technique ou formelle. La maîtrise d'ouvrage doit jouer aussi un rôle primordial en acceptant le développement d'une architecture innovante. ●

Conclusion du colloque (Sylvie Clavel, Directrice de l'École d'Architecture Paris-Villemin*)

Par cette conclusion, il ne s'agit pas de mettre un point final à cette réflexion puisque ce colloque marque le point de départ d'une démarche qui ne fait que commencer. Il faut en premier lieu saluer la haute performance des ingénieurs participant à ce colloque, car ils ont, par leur clarté, permis aux auditeurs de tout comprendre sur les bétons. A cela s'est ajouté le plaisir de voir toutes les architectures présentées qui donnent beaucoup d'espoir pour l'avenir. Les deux journées écoulées ont permis l'expression de points de vue très riches, qui amorcent le dialogue sur les BHP entre architectes et ingénieurs.

L'ensemble de la réflexion menée est stimulante et avec des paroles et des formes très différentes, les divers intervenants n'ont-ils pas soulevés des questions récurrentes de notre fin de siècle? Exposées par Y. Malier, R. Le Roy, P. Rossi, P. Acker, les performances des nouveaux bétons et leurs propriétés constructives innovantes ne renvoient-elles pas à nos problèmes de société? H. Ciriani, s'il a plaisanté sur la durée de vie des bâtiments aujourd'hui inférieure à celle de leurs concepteurs, s'est enthousiasmé sur le béton qui est toujours présent, comme l'indélébile marque de l'homme, quand tout le reste est parti.

Au contraire, F. Soler a parlé d'architecture jetable, et a développé un point de vue critique sur le béton, mais a reconnu de fait la durabilité du matériau. Si Paul Chemetov avait été présent il aurait sans doute parlé de l'échec de l'architecture contemporaine en terme d'utopie civique. Ne se trouve-t-on pas là au cœur des interrogations sur l'obsolescence et la permanence de l'architecture, sur la destruction et le patrimoine, que relance la durabilité des BHP?

Un autre point essentiel débattu a porté sur la question de l'approche macroéconomique et la recherche de la plus juste prescription comme cela a été dit par Y. Malier. L'idée a été émise plusieurs fois que la nouvelle légèreté du béton signifie aussi une nouvelle économie de moyens et donc des coûts réduits. Dans la configuration actuelle de l'économie tout

porte à croire que demain les maîtres d'ouvrage réclameront des rationalités économiques imposant quasiment le recours obligatoire à la haute performance. Il est donc indispensable que l'architecte prenne les devants et ne laisse pas la parole ou le pouvoir à l'entreprise seule. Pour cela il doit se saisir de toutes les performances des nouveaux bétons dès la phase de conception.

A travers les explications, les exemples, les débats, l'essentiel du colloque a porté sur l'approche technique et l'interaction permanente entre béton et conception architecturale, pour donner une image à des concepts comme l'a dit J.-P. Lott.

Qu'il s'agisse de précontrainte extérieure du béton permettant une conception différente d'ouvrages d'aspect plus léger, plus résistant, qu'il s'agisse de la fabrication et de la composition du béton à haute performance comme cela a été expliqué par B. Le Roy ou P. Rossi, qu'il s'agisse de la pluralité des bétons permettant des choix entre gravité, minceur, finesse, élancement, transparence ou dosage d'opacité, qu'il s'agisse ou non de jouer des propriétés de surface des bétons, tout cela témoigne de la pluralité des forces exprimées à l'opposé de la notion de culture unique.

Au cours de ces deux journées, l'approche des bétons renvoie de façon récurrente à l'idée de vérité constructive, de sincérité de la construction comme l'a souligné J. Ripault. Dans ce débat les questions d'usage et d'éthique ont toujours été présentes. Aux moments où les échanges devenaient plus techniques, le rapport entre toutes les possibilités offertes par les nouvelles performances et la liberté de l'architecte apparaissait comme un sujet important et par certains aspects préoccupant. Evoquant la liberté de l'architecte, F. Hammoutène a affirmé que l'architecture donne du sens aux techniques comme aux matériaux et donne sa forme au monde.

Ainsi, tout ce qui a été dit se trouve sur l'étroite ligne de partage entre la rationalité technique et économique de l'entreprise et la liberté totale du concepteur.

A noter la contribution de J. Ripault qui a donné un exemple de conciliation entre des modalités architecturales, et une modestie de l'architecte. Il faut affirmer ici, quelles que soient les inquiétudes formulées par les architectes, le formidable espoir que susciterait la renaissance d'un dialogue fécond entre architectes et ingénieurs structures, entre maîtres d'œuvre et chercheurs, pour exploiter et maîtriser ensemble ces BHP, BUHP, etc, tant dans l'esprit de l'expérimentation que pour la conception architecturale. Cela suppose que l'on prenne en compte ces notions dès la formation initiale et également dans le domaine de la formation continue; c'est exactement le propos de ce colloque qui va être suivi d'autres actions de formation du même ordre.

Je voudrais finir sur une interrogation qui nous tenaille et nous taraude tous: entre maîtres d'ouvrages - peu évoqués -, architectes, maîtres d'œuvre et entreprises, qui se trouvent devant un champ de performances permettant d'espérer une autre maîtrise économique du projet. Qu'allons-nous faire en ce début de XXI^{ème} siècle pour l'habitat des sans-abris et populations non solvables? De quels imaginaires conjugués - bétons légers, économiques et architecture - allons-nous jouer pour que le monde habité s'améliore? ●

* A compter du 01/12/99, Directrice de l'École d'Architecture de Versailles

Composition du comité d'orientation de l'École Française du Béton

YVES MALIER PRÉSIDENT - ENS DE CACHAN
HÉLÈNE ABEL-MICHEL ET BERNARD HALPHEN - METL-DRAST
JACQUES BARON - ATILH
CHRISTIAN BERNARDINI - IREX
PHILIPPE BOCH - ESPCI
JEAN-PIERRE BOUTIN - SOCOTEC
DIDIER BRAZILLIER DDE DE L'YONNE - BHP 2000
FRANÇOIS BUYLE-BODIN - EUDIL LILLE
JEAN-MARIE CAHEN - EGF BTP
JEAN-ARMAND CALGARO - SETRA
MYRIAM CARCASSES INSA - TOULOUSE
JEAN-FRANÇOIS DE CHAMPS - EXPERT
PATRICK CHASSAGNETTE - SPIE BATIGNOLLES
DANIELLE CHAUVEL - EDF SEPTEN
SYLVIE CLAVEL - ÉCOLE D'ARCHITECTURE VERSAILLES
JACQUES CORTADE - P.DT. COM. BAEL, BPEL & EUROCODE 2
JEAN-FRANÇOIS COSTE - AIPCR / CGPC
JEAN-CLAUDE CUBAUD - IGEN
JEAN-MARIE DÉCHERY - CHEC
ABBAS DEKKICHE - GROUPE ORIGNY OBOURG
BERNARD DELABRÈCHE - PIERI
JACQUES DELACOUR - PRÉSIDENT CALIBÉ
JEAN-FRANÇOIS DESTREBECQ - UNIVERSITÉ CLERMONT FERRAND
JEAN-PIERRE ELGUEDJ - CERIB
DOMINIQUE ERRARD - LE MONITEUR
EMMANUEL ESTOURNET - SAM

JEAN-MARIE GEOFFRAY LRPC - PROJET CALIBÉ
MICHEL GUERINET ET ÉVELYNE OSMANI - EIFFAGE CONSTRUCTION
CHRISTIAN HERRERIA - SARET
ANDRÉ JOIE - ISA DU BTP ANGLET
BRUNO JURKIEWIEZ - IUT STRASBOURG
DANIEL KAHANE - ARCHITECTE
PIERRE LAPLANTE - RMC
FRANÇOIS DE LARRARD - LCPC NANTES
BERNARD LE TALLEC - ISBA GROUPE ESIM MARSEILLE
JUDITH LEGO - FFB
PIERRRE MONACHON - CAMPENON BERNARD SGE
ANDRÉ MONTÈS - IPR/IA ORLÉANS
JEAN MOULY - ARCHITECTE
PATRICK NATAF - LYCÉE ST. LAMBERT
EMMANUELLE N'HAUX - LE MONITEUR CAMPUS
JEAN OLIVIER-MARTIN - INGÉNIEUR CONSEIL
MICHEL PECH - VICAT
JEAN PERA - INSA DE LYON
PIERRE POSSÉMÉ - UMGO
BERNARD RASPAUD - BOUYGUES TP
NOËL RICHEL - IPR / IA CRÉTEIL
PIERRE ROSSI - LCPC PARIS
MICHEL SABARD - GEPA
MICHAEL TÉMÉNIDÈS - CIMBÉTON
HENRI THONIER - FNTP
JACQUES TRINH - CETEN APAVE

Pour adhérer à l'École Française du Béton

L'École Française de Béton est ouverte à la fois aux organismes publics et privés et aux personnes physiques désirant adhérer individuellement.

• **L'adhésion individuelle** donne droit au bulletin d'information (montant pour 2000 : 100 F).

• **L'adhésion d'un organisme** donne droit à 5 bulletins d'information (entreprise : 1000 F établissements d'enseignement : 500 F).

• En outre, **l'adhésion en tant que membre fondateur** donne un siège au Conseil d'orientation de l'École Française du Béton (adhésion minimum : 5 000 F).

Bulletin d'adhésion 2000



Société ou organisme où s'exerce l'activité professionnelle :

M., Mme, Melle : Prénom :

Profession :

Adresse : personnelle professionnelle

n° : rue :

Code postal : Ville :

Tél. : Fax : email :

déclare adhérer à l'École Française du Béton

Signature :

Bulletin à retourner à : ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON - c/o CIMBÉTON - 7, Place de la Défense - 92974 Paris-la-Défense Cedex

