



RENCONTRE AVEC JACQUES LUKASIK, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE DUCTAL®, CONSTRUCTION DURABLE ET MATERIAUX DU FUTUR...

Quelles sont les recherches les plus actuelles concernant le béton, dans le monde et chez Lafarge ?

En préambule, je dirais qu'on observe depuis une vingtaine d'années une intensification des recherches sur les ciments et bétons, en adoptant une approche de compréhension scientifique. Auparavant, le béton était traité de manière très pragmatique, en mettant au point des formules, en les mettant en œuvre, en observant le résultat. C'était donc empirique.

Depuis une vingtaine d'années, l'approche est beaucoup plus scientifique. On s'attache à identifier les phénomènes physiques, chimiques, physico-chimiques qui sous-tendent le comportement du béton et à les comprendre. Vous savez, le béton est un mélange de ciment et de granulats, avec du sable, auquel on ajoute de l'eau. On observe que quand on ajoute de l'eau à ce mélange, il se produit une « prise », c'est-à-dire que le mélange durcit. Tous les phénomènes physico-chimiques qui sont derrière ce durcissement sont très complexes. Par le passé, sans doute faute d'outils adéquats, on n'a jamais approfondi la science très pointue derrière ce processus, au moins pas à l'échelle à laquelle on la traite aujourd'hui, en l'occurrence à l'échelle nanométrique. Cela est possible maintenant car les physiciens ont mis au point des outils d'observation à cette échelle. On peut citer plusieurs exemples de techniques ou d'instruments développés dans ce dernier quart de siècle, comme la résonance magnétique nucléaire, la microscopie électronique à balayage ou à transmission, la microscopie à force atomique, la nanoindentation, le rayonnement synchrotron... Tous ces outils permettent d'observer et de mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques des matériaux à l'échelle nanométrique. Les bétons en bénéficient grandement.

Mais qu'est-ce que représente un nanomètre ?

Pour le grand public, la dimension d'un nanomètre est difficile à concevoir. Pour mieux saisir cette notion, prenons l'exemple d'un cheveu, dont l'épaisseur correspond en moyenne à cinquante microns de diamètre. Et vous savez déjà qu'un micron représente un millième de millimètre. En divisant le diamètre d'un cheveu par mille, vous obtenez cinquante nanomètres. Ce cheveu, dont l'épaisseur est coupée en mille parties, donne une idée de l'échelle à laquelle on étudie désormais les phénomènes physico-chimiques dans un béton. Cela est possible grâce à l'instrumentation et au travail des équipes dans le monde qui ont décidé de s'intéresser aux bétons et aux phénomènes fondamentaux qui gèrent son durcissement et le développement de ses performances mécaniques. Les résultats de ces études permettent de produire un matériau mieux structuré, avec des propriétés considérablement améliorées par rapport à celles qu'on obtenait il y a vingt ans. Des propriétés qui permettent la construction d'ouvrages exemplaires comme le Viaduc de Millau, dont les piles en béton, particulièrement fines, assurent toute la portée, la stabilité et la résistance de l'ouvrage.

Plusieurs équipes académiques européennes excellent dans ces recherches, notamment quelques équipes françaises. Le Centre de Recherche de Lafarge, le premier centre au monde pour la recherche sur les matériaux de construction, contribue à ces travaux. Au-delà de ce que nous faisons, nous-mêmes, dans notre laboratoire central, nous travaillons en collaboration étroite avec le monde académique, en matière de recherche fondamentale. Par exemple, nous participons à des réseaux internationaux en Europe et en Amérique du Nord. Alors qu'avec les équipes universitaires, nous travaillons surtout pour comprendre, dans notre Centre de recherche situé près de Lyon, nous sommes davantage orientés vers l'application de toutes les connaissances, pour créer de nouveaux matériaux et solutions innovants, au service du monde de la construction et des architectes en particulier, pour ouvrir une infinité de nouvelles possibilités architecturales et structurelles.

Qu'en est-il du Ductal® ? Comment pouvez-vous décrire ses performances par rapport aux bétons courants ?

Le Ductal® est né d'une collaboration industrielle entre trois grands groupes français qui sont Bouygues, Rhône Poulenc, aujourd'hui devenu Rhodia, et Lafarge. J'ai eu l'honneur de lancer cette collaboration pour Lafarge en 1994. Il y a 12 ans, les trois groupes et leurs chercheurs ont imaginé ce matériau aux performances spectaculaires. Ensuite, nous avons proposé une collaboration avec une dizaine d'équipes universitaires en France, grâce à une subvention du gouvernement français destinée aux recherches fondamentales sur des matériaux novateurs. A l'époque, notre projet ne s'appelait pas Ductal®, mais le BPR, « Béton de Poudre Réactive ». Il a fallu comprendre la physique de ce matériau granulaire, son comportement lors de sa mise en place, lors de son coulage. Après 5 ou 6 années de recherches, nous l'avons mis sur le marché et lui avons donné un nom, le Ductal®. Pourquoi ? Parce que c'est le premier matériau de type béton qui exhibe des caractéristiques de ductilité. Ses performances sont tout à fait exceptionnelles. Ses résistances de compression dépassent d'un facteur de 5 à 6 les bétons courants. Elles dépassent d'un facteur dix les bétons courants en termes de résistance à la flexion. Les performances en flexion d'un Ductal® sont autour de 50 Mégapascals et, en compression, autour de 200 Mégapascals. Cette propriété de ductilité signifie que le matériau, sous une forte contrainte, ne casse pas abruptement mais se comporte un petit peu comme un fil, par exemple un fil de cuivre, que vous pouvez tendre et tirer progressivement, sans qu'il ne rompe.

Pour vous donner un exemple de comportement ductile de ce matériau, nous avons fait des essais aux Etats-Unis, avec la FHWA (Federal Highway Agency), qui souhaitait l'utiliser pour construire des ponts. Nous avons réalisé une poutre de 30 mètres de longueur, 1 mètre de hauteur, et en l'exposant à une forte pression, nous avons réussi à la faire fléchir, en son milieu, de 50 cm sans qu'elle ne casse.

Il faut savoir que cette poutre en Ductal® ne comporte pas d'armatures métalliques. Sa composition contient simplement des fibres d'acier extrêmement fines, qui ont trois fois l'épaisseur d'un cheveu, c'est-à-dire environ 150 microns, et sont d'une longueur de 12 mm. Ces fibres absorbent toutes les sollicitations mécaniques et permettent ce comportement ductile, mais beaucoup d'autres éléments contribuent à ces performances exceptionnelles, notamment l'adéquate composition granulaire de tous les composants minéraux et organiques. Quand on met ce béton en place, il coule comme du miel assez liquide, et on n'a pas besoin de le vibrer.

Croyez-moi, la mise au point de ce matériau a exigé beaucoup de effort de recherches très fondamentales qui ont été notamment rendues possibles grâce au développement d'outils novateurs d'analyse.

Trouve-t-il déjà son application dans les bâtiments d'aujourd'hui ?

Il y a beaucoup d'applications Ductal® dans les bâtiments, mais aussi dans d'autres structures de génie civil d'aujourd'hui. Dans le monde, la première application a eu lieu en 1997. Au Canada, à Sherbrooke, une passerelle a été réalisée en Ductal®, à l'époque où son appellation était encore « Béton de Poudre Réactive ». Elle faisait 60 mètres de longueur et comportait 5 éléments de 12 mètres.

En 2004, la très belle passerelle réalisée à Séoul, en Corée, mesure 120 mètres de long, 4 mètres de large et son plateau seulement 3 cm d'épaisseur.

Aujourd'hui, de vrais ponts routiers, en Ductal®, ont été construits, 2 aux Etats-Unis, 1 en Nouvelle Zélande et 1 en France. Des applications existent aussi pour les façades de bâtiments car ce matériau donne un aspect de surface très esthétique, très lisse. J'ajoute que les qualités esthétiques de ce matériau font que l'on réalise aujourd'hui aussi, en Ductal®, des objets de toutes sortes, comme des meubles, des bureaux, des tables ou des baignoires...

Dans sa conception, la tour Hypergreen utilise une structure en résille en Ductal®. Pourrait-on imaginer de grandes structures de bâtiments en Ductal® ? Quels en seraient les avantages ?

Le grand avantage des matériaux comme Ductal® est tout d'abord le gain en volume. Les éléments en Ductal® ont des performances mécaniques équivalentes pour des volumes, des épaisseurs, des largeurs, des longueurs beaucoup plus réduits.

Si vous imaginez un poteau en béton classique, ou même un béton de haute performance, le même poteau en Ductal® aura un volume global beaucoup plus réduit. Le deuxième point très avantageux est la très belle surface d'un tel béton car Ductal® est en surface (en volume, d'ailleurs, aussi) d'une porosité extrêmement faible. Il n'y a donc pratiquement pas

d'agressions atmosphériques et environnementales, par conséquent, Ductal® a une durabilité étendue et son aspect esthétique est remarquable.

Je pense que c'est un matériau qui doit stimuler l'imagination des architectes car ils peuvent lui conférer toutes les formes les plus recherchées, étant donné sa capacité à résister aux sollicitations mécaniques.

Pensez-vous que le béton est un matériau idéal pour faire des tours ?

Je pense que les bétons du type Ductal® sont de formidables matériaux pour toutes sortes de structures, aussi bien pour des tours, que pour d'autres applications de génie civil, du point de vue de leurs performances économiques, mécaniques, écologiques, en particulier de durabilité. Je pense aussi que toutes ces performances ne sont pas encore reconnues aujourd'hui à leur juste valeur.

Justement, j'allais vous poser la question par rapport à l'acier parce que le Ductal® s'approche des performances de l'acier.

Bien sûr, mais, au-delà des performances mécaniques de Ductal®, qui approchent effectivement celles de l'acier, le Ductal® a des performances encore bien supérieures. Nous connaissons tous la capacité de l'acier à résister au feu, mais à partir d'un moment crucial, une structure en acier subit un flambage, une rupture très rapide, et la structure en acier s'écroule.

Nous avons développé une gamme de Ductal® qui contient des fibres organiques adéquates et dont les performances de résistance au feu sont remarquables. En cas d'importante élévation de température, ces fibres fondent et les vides ainsi créés à leur emplacement récupèrent la pression des vapeurs d'eau qui se dégagent par la déshydratation de certains composants. L'intégrité structurale d'un bâtiment construit avec un tel matériau est ainsi considérablement prolongée, en cas de feu.

Pour Hypergreen, le principe structurel était l'association des capacités du Ductal® pour absorber les efforts et la protection au feu. On avait imaginé l'intérieur de la tour comme entièrement constituée d'éléments préfabriqués en béton. Dans ce contexte, pensez-vous que c'est un procédé viable actuellement, qui deviendrait un vrai système de tour préfabriquée avec des éléments qu'on pourrait assembler ?

J'ai du mal à me prononcer sur les aspects structurels de la construction, parce que je ne suis pas ingénieur mais physicien de formation. Ce dont je suis sûr c'est que Ductal® se prête formidablement bien à la préfabrication.

C'est un matériau dont les performances mécaniques sont fortement améliorées grâce à un traitement thermique approprié, et la préfabrication est particulièrement bien adaptée pour réaliser de nombreuses séries d'éléments de toutes sortes, et donc évidemment pour des résilles structurelles et des tours...

Dans ce domaine, il s'agit d'une vraie recherche à entreprendre.

Il existe déjà beaucoup de réalisations et d'applications de Ductal® en préfabrication. Au niveau des structures, les ponts en Ductal® aux Etats-Unis sont préfabriqués en usine : les tabliers ou les poteaux sont des éléments légers puisque le matériau a des performances telles que ce n'est pas la même masse ni le même volume que pour un béton courant. On transporte ces éléments en Ductal® par camion et, sur place, des grues légères manipulent et posent facilement les éléments les uns à côté des autres. En très peu de temps, le pont est en place et opérationnel. Je pense que ce genre de processus pourrait être imaginé pour certains éléments des tours.

Dans une économie durable, croyez-vous que le béton a sa place ? Y-a-t-il des actions pour réduire l'impact écologique de la production des matériaux et de leur utilisation ?

Nous sommes convaincus, et cela est démontré, que le béton est un matériau clé de la construction durable.

En toute connaissance de cause, Lafarge s'est engagé dans la recherche pour développer des matériaux qui pourraient être qualifiés de plus durables possibles. Nos préoccupations vont dans deux sens : d'une part, évidemment, la réduction de l'énergie que l'on utilise pour créer ou pour développer les bétons, d'autre part, la réduction de l'impact écologique de ces matériaux et la recherche de solutions permettant de réduire la consommation énergétique des bâtiments tout au long de leur utilisation. Souvent, les deux vont de pair.

En ce qui concerne la production des matériaux, nous réduisons les dépenses énergétiques dans nos usines pour produire le ciment. Dans notre Centre de Recherche, nous

développons actuellement des ciments dont la fabrication demande moins d'énergie, moins de température. Un ciment Portland « classique » est fabriqué autour de 1450°C. Les ciments « à consommation énergétique réduite », dont je parle, sont des ciments du type belitique, fabriqués à des températures autour de 1200/1250°C. Nous nous efforçons de hausser leurs performances au même niveau que celles du ciment Portland.

D'autre part, nous travaillons pour que nos matériaux soient recyclables et éventuellement réutilisables. Il est évident que les bétons d'avenir seront fabriqués avec moins d'énergie, auront un contenu de CO₂ moindre, seront réutilisables, recyclables. Il y a aussi certains déchets que nous utilisons non seulement pour produire nos ciments, pour alimenter nos fours, c'est-à-dire comme sources d'énergie, mais aussi pour recréer la matière première qui ensuite va dans nos ciments.

Par exemple, les cendres volantes, sous-produits de l'industrie thermique, les laitiers d'aciéries ou les laitiers de hauts fourneaux, sont des matériaux que nous utilisons pour formuler et produire nos bétons. Depuis 15 ans, nous avons réussi à diminuer de 15% nos émissions de CO₂ par tonne de ciment produit et globalement, Lafarge s'est engagé à diminuer au niveau mondial les émissions de CO₂ par tonne de ciment produit de 20% d'ici 2010, par rapport à 1990.

D'après des études réalisées par des bureaux indépendants, notre Ductal® a un contenu énergétique et de CO₂ moindre que beaucoup d'autres matériaux de construction. Nous avons procédé à l'évaluation des paramètres pour un pont entre une solution mixte béton/acier, d'une part, et une solution en Ductal® d'autre part. La comparaison est très favorable au Ductal®. Ainsi, le pont en Ductal® économise 35% de matières premières naturelles, 46% d'énergie et 53% d'émissions de CO₂ par rapport à une solution mixte acier/béton courant.

Quant à l'usage du béton dans le bâtiment, nous savons que son potentiel est immense et encore largement inexploité. A titre d'exemple, si l'on optimisait l'utilisation des propriétés d'inertie thermique du béton, on contribuerait à réduire les dépenses d'énergie dans l'habitat, et par le même effet on réduirait les émissions de gaz à effets de serre dues à l'exploitation du bâtiment au long de sa vie.

Il me semble que l'avenir est celui des structures mixtes : béton-bois-métal. Allez-vous mener des recherches dans ce sens ?

L'avenir est sans doute dans certaines solutions mixtes. Ainsi, le Ductal® comprend de l'acier, sous forme de fibres. Personnellement, je suis convaincu que dans le mariage du béton et de l'acier il y a encore beaucoup à optimiser, ou même à inventer...

Pour Phare, on avait imaginé de réaliser cette résille en mélange d'acier et de Ductal®. Dans notre projet pour La Défense, on a pensé aussi à faire une structure en métal avec un capotage en Ductal® pour la résistance au feu. On avait même envisagé dans un premier temps de couler du Ductal® autour d'éléments en métal pour profiter des deux caractéristiques. Cette démarche vous paraît-elle possible ?

C'est sans doute possible, nous n'avons pas procédé à ce type d'essais. Nous considérons que notre matériau est suffisamment résistant en soi et n'a pas besoin d'être juxtaposé à de l'acier.

Pensez-vous qu'un matériau de construction entièrement nouveau puisse apparaître dans un avenir proche, et quelles sont vos recherches dans le futur ?

Le champ d'exploration est encore très vaste, au niveau des matériaux d'aujourd'hui. Dans 10 ou 15 ans, le béton ne sera certainement pas le même, et ceci pour trois grandes raisons.

Si je devais résumer ma vision du béton dans un avenir pas si lointain, je dirais d'abord que ce nouveau matériau aura des caractéristiques mécaniques supérieures. Par exemple, il n'aura pas besoin de renforcement par le ferrailage. Il aura des propriétés d'autoplacement, il sera fluide, comme notre béton Agilia® aujourd'hui. Il aura aussi des performances esthétiques remarquables, au minimum sans fissures visibles à l'œil. Si jusqu'alors, les surfaces en béton standard faisaient cinq mètres par cinq, justement pour minimiser l'effet visible de la fissuration naturelle, les équipes de Lafarge viennent de lancer un béton permettant de réaliser des surfaces de vingt mètres sur vingt sans fissures. Je suis également convaincu que le béton du futur sera capable de maintenir son intégrité structurale, en cas d'incendie, beaucoup plus longtemps que le béton aujourd'hui. Il sera plus léger tout en préservant ses caractéristiques mécaniques, ce qui permettra de diminuer les volumes qui sont utilisés.

Ensuite, au niveau du développement durable, il y aura également une évolution notable. Par exemple, Lafarge a lancé récemment un ciment qui, lorsqu'on le manipule, n'engendre pas de poussière, il s'appelle Sensium®. C'est encore la science qui a permis de faire en sorte que toutes ces fines particules de ciment soient tellement consolidées et agglomérées qu'il n'y ait aucune poussière lorsque l'on déverse un sac. Ce ciment conserve toutes ses performances mécaniques et rhéologiques, c'est-à-dire une mise en place facilitée et des résistances même supérieures aux ciments classiques, tout en consommant moins d'eau. Un tel ciment est un élément très important pour protéger l'environnement, pour améliorer le confort des artisans du bâtiment et pour le développement durable. Je suis également convaincu que le béton du futur aura un contenu énergétique moindre. Il y aura moins d'émanation de CO₂ liée à sa production. Il aura probablement une meilleure résistance aux agressions environnementales et climatiques, aux pluies acides. Produit avec des matériaux recyclables, il utilisera lui-même, pour ses composants et formules, des matériaux en provenance de déchets industriels. Un tel béton du futur sera autonettoyant. Le béton du futur aura la capacité de se réparer, s'auto-cicatriser en quelque sorte, lui-même. Déjà aujourd'hui, si le Ductal® manifestait une fissure relativement fine, jusqu'à environ 100 à 150 microns, et si des gouttes d'eau étaient introduites dans la fissure, une telle fente se refermerait toute seule. En anglais on parle de sa capacité de *self-healing* ou de *self-repairing*.

Enfin, les bétons du futur intégreront de nouvelles caractéristiques fonctionnelles. Ces bétons seront capables de réagir à un signal ou à une commande extérieure, pour déclencher la prise. Imaginez que vous mettez du béton frais dans vos formes et qu'avec un signal extérieur vous déclenchez la prise qui sera extrêmement rapide. Dans un temps très réduit, le matériau aura acquis ses performances mécaniques définitives. Quelques minutes ou quelques dizaines de minutes au maximum, au lieu de quelques heures aujourd'hui... Ce béton du futur pourra aussi avoir des particularités esthétiques, comme par exemple changer de couleur selon l'éclairage, d'après l'orientation du soleil ou même de la lune... Je suis sûr que cela pourrait faire rêver les architectes...

C'est un peu comme l'aluminium. Il y a maintenant des aluminiums qui changent avec la lumière, avec le soleil. Et d'autres caractéristiques nouvelles ?

Un tel béton pourra aussi être translucide, au moins partiellement...

Il pourra également avoir des performances remarquables d'isolation thermique. Il pourra, par exemple, exploiter les performances de « matériaux à changement de phase ».

Mais n'oublions pas l'acoustique. Chez Lafarge, nous nous intéressons aux performances acoustiques des matériaux, notamment du béton. La science entre de nouveau en jeu. Une société française, qui construit des routes, a travaillé avec des laboratoires académiques pour développer des murs antibruits afin que des riverains d'autoroutes ou de routes de circulation importantes soient davantage protégés de nuisances sonores routières. En cela, ils ont appliqué une théorie mathématique de fractals pour calculer l'aspérité et la forme de surface de ces parois, afin de l'optimiser pour absorber les ondes sonores le plus efficacement possible. Je pense que dans l'avenir, grâce à cette démarche scientifique très particulière, le béton aura des capacités d'absorption du bruit supérieures et donc représentera une meilleure isolation acoustique. Voilà ce qui nous attend.

Un mot de conclusion ?

L'avenir du béton est immense. Grâce à une démarche résolument scientifique, le béton va devenir un matériau high-tech du XXI^{ème} siècle dont les performances ne pourront que stimuler l'imagination des architectes, à l'origine de toute la créativité dans la construction. Lafarge a l'ambition d'y contribuer.