Lerm Infos n° 31 : Retour sur le béton…

18 décembre 2015

Décembre 2015

Editorial

Chers Amis,

Notre actualité toute récente a été dominée par la 21e conférence des parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, plus brièvement appelée « COP 21 », dont l'objectif était de décider de mesures collectives et partagées à mettre en place, dans le but de limiter le réchauffement climatique. La mobilisation autour de cette conférence a bien montré que la lutte contre le réchauffement climatique n'était pas l'affaire des seuls états, mais de tous : acteurs économiques, consommateurs, société civile et citoyens. Pour ce qui concerne notre secteur d'activité, la construction, et plus particulièrement les liants minéraux, la fabrication de ciment représente quelques 5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. 60 % de ces émissions proviennent du processus de décarbonatation du calcaire et 40 % de la combustion de combustibles fossiles. Si le ciment et le béton restent de merveilleux et irremplaçables matériaux de construction, la diminution de leur contribution au réchauffement climatique est donc une nécessité.

Nous avons récemment mis en ligne nos anciennes lettres d'informations qui décrivent l'ensemble des activités de notre laboratoire. Lors de cet exercice, nous avons remarqué que le ciment et le béton y courraient toujours en filigrane… avec en permanence le souci de la durabilité du matériau, durabilité qui, à côté de l'amélioration des processus de production, est la clé de son optimisation environnementale.
Autrement dit, en référence à l'un de nos articles, le béton le moins cher et le moins polluant est celui que l'on ne coule plus. Nous vous livrons donc ici, pour cette fin d'année, un choix d'articles tirés de nos lettres d'information, articles qui rappellent des données de base sur le matériau béton, mais suivent aussi les pistes de son évolution dans la perspective d'un développement qui soit durable.
… et c'est naturellement dans cette perspective d'avenir que nous vous souhaitons de bonnes fêtes et vous envoyons nos meilleurs vœux pour cette nouvelle année 2016.

Bonne lecture ! Bernard Quénée, directeur général délégué
Philippe Souchu, rédacteur en chef

Dossiers techniques

Naissance et triomphe du cim[illegible]tland

Cet article rappelle comment à la suite des travaux de Vicat, le ciment artificiel fut pendant tout le 19e siècle un objet de recherche scientifique et technique intense. A la fin de ce siècle, doté d'un appareil industriel de production, d'un corpus de connaissances scientifiques et d'éléments consensuels de spécification et d'essais, le ciment Portland et ses usages allaient sortir de l'ère des pionniers…

La fabrication du ciment courant *Pour nous, c'est là que tout commence… Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau (Norme NF EN 197-1)…*

Ciments et granulats : un regard sur 25 ans d'évolution Entretien avec Jacques Burdin

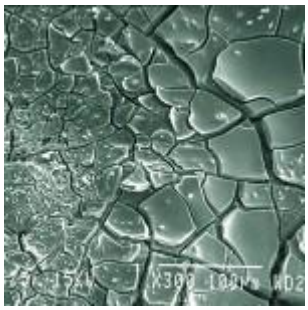
« La réglementation et l'économie ont écarté pour un temps l'imagination et l'innovation. La notion d'approche performantielle (…) permettra de combler cette lacune et prendra en compte tous les aspects aussi bien techniques qu'économiques, et de déboucher sur des solutions spécifiques adaptées… »

L'eau dans la pâte de ciment hydratée

L'eau, composant de la pâte de ciment, est aussi importante par sa présence, que par sa transformation et même par sa disparition, dont les vides, dans la matrice, sont la trace…

La durabilité des bétons et ses ennemis

Il se trouve que les ouvrages ne vieillissent pas seulement du fait de l'exercice de leur fonction, mais aussi du fait de l'action qu'exerce sur eux l'environnement dans lequel ils se trouvent. L'ouvrage et son matériau doivent donc être adaptés à leur milieu. Le climat, l'agressivité des eaux, des sols et de l'atmosphère sont donc des paramètres à prendre en compte dès la conception du béton afin que celui-ci présente au final les caractéristiques physico-chimiques adaptées à l'environnement dans lequel il s'insérera…



Durabilité des bétons 25 ans d'expérience

Entretien avec Hugues Hornain

« Le concept de durabilité, longtemps focalisé sur la résistance du béton, considéré comme paramètre principal, s'est considérablement élargi, englobant maintenant non seulement les critères de résistance, mais encore les aspects environnementaux et socio-économiques… »

La durabilité à très long terme des bétons : entre utopie et nécessité… Entretien avec Bernard Thuret

« Le problème du stockage des déchets nucléaires a depuis plus d'une vingtaine d'années mobilisé la recherche pour la connaissance du comportement jusqu'à très long terme du béton et le LERM a contribué, depuis sa création et même avant pour certains de ses membres, aux nombreuses réflexions que cela a suscité… »

L'approche performantielle des bétons

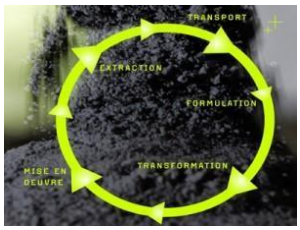
L'évaluation prospective de la durabilité du béton au cours du temps implique donc de coupler la connaissance de l'évolution de ses performances à long terme avec l'impact de son environnement sur le matériau et sur ses performances…

Les Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances

Entretien avec Jacques Resplendino

« Il revient maintenant aux concepteurs d'innover en exploitant les ressources qu'offrent ce matériau (résistances mécaniques, limitation

des volumes, liberté des formes, durabilité, faibles effets différés tels que le retrait ou le fluage) pour apporter des réponses novatrices à des problèmes de résistance environnementale, de rapidité d'exécution, d'esthétique architecturale, de gains de matières premières, de renforcement ou de réparation d'ouvrages… »



Béton et développement durable Entretien
avec Patrick Guiraud
« Le Développement Durable n'est pas un concept parmi d'autres, qu'on aurait le loisir de prendre ou de laisser (…) ces dernières années ont montré que le Développement Durable était une impérative nécessité… »

Recyclage du béton
Pour le béton, il doit donc y avoir une vie après la durabilité. Les évolutions conjointes des connaissances scientifiques, des moyens technologiques, des conceptions durables et de la réglementation ouvrent au béton la possibilité d'entrer, dans un avenir proche dans l'économie dite circulaire…

Actualités

Bonnes fêtes à tous…

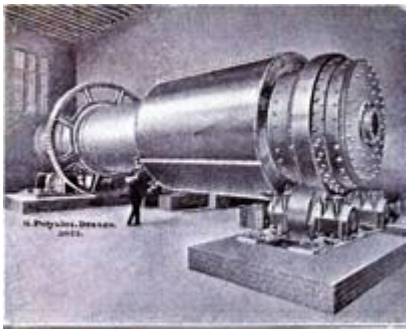
REMERCIEMENTS

LERM-Infos
Directeur de la publication : *Bernard Quénée*
Rédacteur en chef : *Philippe Souchu*

Naissance et triomphe du ciment Portland

28 juin 2009

Cet article fait suite à : « Entre chaux et ciment Portland, la naissance du ciment naturel ». Nous y avions suivi les tâtonnement des recherches sur l'hydraulicité de la chaux, jusq'aux travaux de Vicat, qui fort utiles aux ingénieurs, ne firent pourtant pas l'objet d'un brevet.



Broyeur à boulets tubulaire, Allemagne, 1910

En 1824, l'anglais Joseph Aspdin réussit à fabriquer une chaux éminement hydraulique en cuisant à haute température un mélange de calcaire et d'argiles, qu'il appela « *Ciment Portland* ». Le dépôt et l'exploitation de son brevet par Joseph Aspdin la même année, valut à ce maçon devenu un industriel, renommée, reconnaissance et, peut-être, une relative fortune. On peut lire, sur une plaque de l'hôtel de ville de Leeds les mots suivants :
« *En mémoire de Joseph Aspdin de Leeds, maçon tailleur de pierres, 1779-1855. Dont l'invention du ciment Portland breveté le 21 octobre 1824, suivie d'un siècle d'amélioration dans sa fabrication et son usage, a fait du monde entier son débiteur.* »

Le brevet d'Aspdin : date inaugurale de 100 ans de progrès du ciment Portland
Les termes de cette plaque sont sages et en accord avec l'essentiel de la littérature consacrée à l'histoire du ciment : cette date du brevet d'Aspdin n'est certainement pas celle de l'invention du Ciment Portland. Il s'agit d'un repère conventionnel à partir duquel un enchaînement de progrès technologiques et scientifiques va permettre l'avènement du ciment que nous connaissons aujourd'hui sous ce nom.

Les insuffisances du procédé d'Aspdin (qu'améliorera néanmoins son fils William) sont pointées par Redgrave puis par Butler :

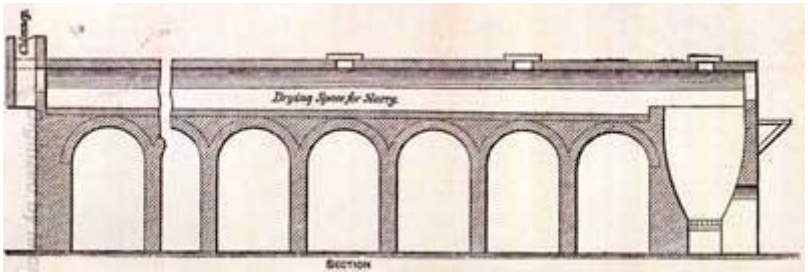
« *Aspdin n'a pas indiqué la quantité exacte d'argile à employer ce qui, pourtant, est une spécification fondamentale…* » (Redgrave, 1894)

« *Il est à peine nécessaire d'ajouter que ce ciment diffère considérablement du ciment Portland de nos jours, dans la mesure où la calcination n'était pas portée jusqu'à vitrification, laquelle est aujourd'hui reconnue comme étant caractéristique de la cuisson du ciment, de manière à transformer la matière première mécaniquement mélangée en composés chimiques appropriés…* » (Butler, 1899). Ce lecteur des travaux de Le Chatelier, dont la thèse date de 1883, aborde également la question du broyage :
« *Ce qui, alors, était considéré comme un ciment parfaitement broyé, serait aujourd'hui rejeté avec mépris par le constructeur même le moins sûr…* » (Butler, 1899)
Sont donc ici énoncés les trois éléments décisifs de progrès de la fabrication du ciment Portland :

Précision et régularité des proportions des mélanges argile-calcaire
Finesse du broyage du mélange
Cuisson du mélange à température convenable

Les insuffisances d'Aspdin, qui peuvent aussi bien être comprises comme de la rétention d'information dans un secteur déjà soumis à la concurrence industrielle entre producteurs de ciments naturels, éveillèrent évidemment la curiosité d'autres fabricants de ciment. Parmi eux, c'est Johnson (employé par White) qui étudia le plus à fond le produit d'Aspdin. Il ne perça pas exactement le secret de fabrication, mais les expériences qu'il fit autour de 1845 sur le produit d'Aspdin lui montrèrent l'importance de la calcination du mélange, calcination pour laquelle il fixa les températures convenables et mélange pour lequel il fixa les proportions. Johnson prétendait donc être le véritable inventeur du ciment Portland et, en 1911 (il avait alors 101 ans) il écrivait que « *le ciment d'Aspdin ne ressemblait pas plus à du ciment d'aujourd'hui que la chaux ne ressemble à du fromage…* ».

Fours et broyeurs : les deux moteurs de l'évolution du ciment
Les progrès des fours sont la clé d'une cuisson adéquate du clinker et d'un processus réellement économique de fabrication.
Le premier défaut majeur du four qu'utilisait Aspdin (le bottle kiln ou four rond) était qu'il devait être alimenté en matériau sec. Son séchage exigeait des installations et une manutention spéciales, forcément onéreuses. L'idée vint donc à Johnson, dont nous avons déjà fait la connaissance, de combiner la cuisson et le séchage préalable du mélange. Il breveta (1872), un four à chambre, dit de Johnson, qui récupérait la chaleur du four pour sécher le mélange humide issu du broyage. Ce four dont l'efficacité fut croissante à mesure des améliorations qui lui furent apportées fut utilisé en Grande Bretagne jusqu'en 1903, ce qui fit écrire à Davis que cette période de l'histoire du ciment fut l'ère du four à chambre.
Le four à chambre de Johnson allait de pair avec l'introduction du procédé de broyage semi humide que Goreham breveta lui aussi en 1872.



Chambre de séchage de Johnson, coupe (in Redgrave, 1895)

Le second défaut du four d'Aspdin était que sa température n'excédait pas celle du four à chaux et que, de plus, la cuisson y étant irrégulière, des fournées entières de matériau pouvaient être défectueuses par manque de cuisson. Comme, enfin, son fonctionnement était intermittent, sa mise en température consommait beaucoup de combustible.

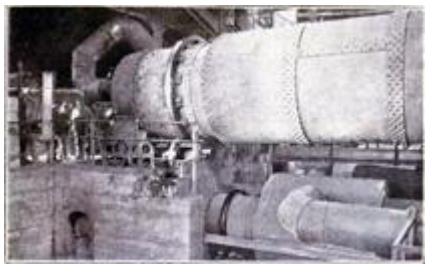
Le shaft kiln (four droit coulant) fut introduit dans les années 1880. Il s'agissait d'une modification des fours précédents : on alimentait le four en matériau et en combustible par le haut. Le clincker cuit s'écoulait par le bas. Le process dès lors, devenait continu, d'autant plus que ce four fut adopté sur le continent et qu'on en mécanisa l'alimentation et l'évacuation.

La grande révolution dans la continuité du process de production du ciment vint finalement de la mise en service du four rotatif. Th. Crampton en breveta un dès 1877. Ce fut un échec. En 1885, l'américain F. Ransome, déposa un brevet et installa plusieurs fours en Angleterre qui connurent tous des problèmes de fonctionnement.

C'est à ce moment que, en dépit des progrès enregistrés, Redgrave peut encore écrire (1894) :

« *Nous utilisons certainement nos fours d'une façon qui n'est pas scientifique, mais il est difficile d'indiquer comment ils peuvent être améliorés. Nous sommes toujours dans une grande ignorance en ce qui concerne le degré exact de chaleur nécessaire, la quantité d'air atmosphérique requise, l'effet de la flamme, l'influence de la vapeur et de nombreux autres sujets qui a défaut d'être soumis à l'énoncé de lois scientifiques exactes, sont à présent laissés à la main du conducteur de four…* »

Ce sont encore deux américains, Hurry et Seaman, qui, en 1898 améliorèrent les fours précédents. Ils installèrent en 1900 les premiers fours rotatifs opérationnels d'Angleterre pour l'approvisionnement en ciment des travaux du port de Douvres. La construction du premier four à tube rotatif allemand a eu lieu à la même époque, en 1896, à l'initiative de Carl von Forell.



Four rotatif de la cimenterie de Weisenau,

Allemagne, 1910

On adjoignit au four rotatif un refroidisseur qui facilitait le broyage et améliorait la qualité du clinker. Le développement du four rotatif permit donc, en consacrant le procès continu de fabrication, un accroissement du volume de la production, mais il contribua également à la réalisation d'un produit plus homogène où la finesse du broyage et la liaison des éléments minéraux exigèrent finalement un retardateur de prise. C'est pour contrôler l'hydratation de l'aluminate tricalcique qu'on ajouta alors du gypse à la phase de broyage.

Parallèlement à l'amélioration des fours, on améliora les procédés de broyage. Si le procédé semi-humide de Goreham fut un progrès, la mise au point du broyeur à boulets qu'on utilisa d'abord en Allemagne vers 1880 fut un élément décisif de l'obtention de la finesse de la mouture et donc de la réactivité du clinker.

Compréhension de la chimie du ciment

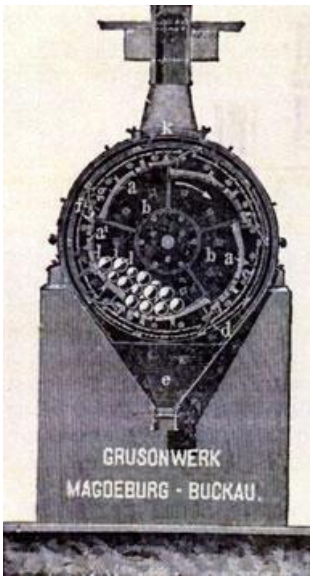
L'année 1887 est un tournant de l'histoire du ciment, c'est l'année où Ransome tente d'utiliser pour la première fois le four rotatif, c'est également l'année où Louis le Chatelier publie sa thèse : *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques.* Ces travaux sont aujourd'hui bien connus et sont à la base de la chimie des ciments. Pour prendre la mesure de leur importance, voici l'hommage que lui consacra R. H. Bogue, lors de la séance d'ouverture du second colloque de la chimie des ciments qui s'est tenu à Stockholm en 1938, deux ans après la mort du savant français :

« *Son travail sur la chimie des ciments est d'une importance fondamentale. Par des études chimiques et microscopiques il a démontré que le clinker contient un certain nombre de minéraux parmi lesquels le silicate tricalcique est le porteur des propriétés hydrauliques. Il a également démontré que le gypse, les aluminates de calcium et le ciment Portland effectuent leur prise au travers d'un processus de cristallisation en solutions sursaturées… Mise en évidence des composants minéraux du clinker et explication du mécanisme de la prise… » C'est un sujet d'émerveillement, qu'avec les moyens de mesure de précision très limités utilisés en 1887, Le Chatelier ait pu réussir à découvrir et à émettre sur tant de points des postulats, qui aujourd'hui, sont considérés comme des faits* », écrit encore R. H. Bogue en 1947.

Dix ans plus tard, en 1897, A. E. Tornebohm, qui ne connaissait pas les travaux du Français, confirmera la thèse de Le Chatelier sur les constituants du clinker et nommera les phases minérales du ciments : alite, bélite, célite…

Les recherches sur la chimie du ciment ne s'arrêteront plus et feront l'objet de confrontations internationales.

On date le premier colloque sur la chimie des ciments de 1918, parce qu'il a fait l'objet d'actes publiés, mais, une réunion de l'International Association for Testing Materials s'était tenue en 1897 à Stockholm. Une autre eut lieu en 1901 à Budapest, puis une autre encore en 1906 à Bruxelles, réunions au cours desquelles Le Châtelier, entre autres, fit des communications.



Broyeur à boulets, coupe transversale, Allemagne, (in Redgrave 1895)

Evolution de la matrice des ciments Portland historiques

R. G. Blezard a différencié les étapes du développement du ciment Portland par l'étude minéralogique des divers assemblages. En étudiant par microscopie à lumière réfléchie les assemblages minéraux non hydratés des mortiers, il a proposé une classification des ciments historiques :

Ciment proto-portland

Ciment meso-portland

Ciment Portland normal

Selon les travaux de R. G. Blezard, le ciment proto-Portland est essentiellement un mélange calciné de calcaire et d'argile au sein duquel la liaison $CaO\text{-}SiO_2$ est peu marquée, la température de cuisson ayant été trop faible pour produire un composé de synthèse.

Le ciment meso-Portland reste un matériau très hétérogène. La liaison $CaO\text{-}SiO_2$ y est avérée mais les phases sont pauvrement définies et le refroidissement a été lent.

Depuis le ciment meso-Portland d'Aspdin (le fils) et de Johnson, les recherches d'amélioration et la compétition industrielle ont principalement porté sur la capacité du produit hydraté à développer de la résistance. L'augmentation de la température dans les fours a permis la production de silicates à plus forte teneur en chaux, ce qui est déterminant pour la résistance du matériau. Le caractère hétérogène du ciment meso-Portland en faisait un liant à prise lente qui ne requérait donc pas l'ajout de gypse.

Apparition des spécifications et de la normalisation

Le développement de l'usage du ciment Portland surtout depuis la généralisation de l'usage du béton amena le besoin de spécification du produit et d'essais de performances sur lesquels s'accorder. Butler introduit ainsi la partie de son ouvrage destiné aux essais des ciments :

« *L'objet de l'essai du ciment est de s'assurer de sa valeur en tant que matériau de construction et, autant que possible, des caractéristiques qu'on peut attendre qu'il développe dans mise en oeuvre pratique.* » Des spécifications apparurent donc dans différents pays soit sous l'impulsion de la puissance publique pour garantir la qualité de l'approvisionnement (France), soit par la volonté des producteurs eux-mêmes. En Allemagne, dès 1877, une association des producteurs se constitua et publia aussitôt des règles de contrôle de qualité. La norme des producteurs allemands pour la fourniture et les essais uniformes de ciment Portland est citée in extenso par Butler (1899) et est suivie de la déclaration suivante :

« *Les membres de l'Union des producteurs allemands de ciment Portland s'engagent à mettre sur le marché sous la dénomination de ciment Portland un matériau exclusivement formé d'un mélange dont des substances calcaires et argileuses forment les principaux ingrédients, calciné jusqu'au point de vitrification et réduit en une fine poudre.* »(1888). Tout contrevenant à cette définition était considéré comme contrefacteur et s'exposait à être exclu publiquement de l'Union.

En Angleterre, c'est Earle, fameux fabricant de ciment qui publia en 1898 ses « Standard Methods of Testing Cement » à des fins de qualité interne. Cette publication fut suivie de retirages augmentés en 1901 et en 1904 qui préfigurent la British Standard 12 qui parut en décembre 1904.

Laboratoire de chimie de l'Association des producteurs allemands de ciment Portland à Carlhorst

Conclusion

C'est après la première guerre mondiale que se réalise réellement l'affirmation de Davis formulé en 1924, selon laquelle » l*a fabrication du ciment a été menée comme une affaire empirique, aujourd'hui elle s'est constituée comme l'une des plus grandes industries chimiques et est dirigée par le chimiste et l'ingénieur* « .

Doté d'un appareil industriel de production, d'un corpus de connaissances scientifiques et d'éléments consensuels de spécification et d'essais, le ciment Portland et ses usages allaient maintenant sortir de l'ère des pionniers.

Sources

Blezard R. G.

Reflexions on the history of chemistry of cement

Paper presented at a meeting of the Construction Materials Group of the Society of Chemical Industry (SCI) at Belgrave Square, London (UK) on 21 May 1998.

Blezard R. G.

The history of calcareous cements

In Lea's Chemistry of cement and concrete, Arnold, 1998 (4e edition) Bogue R. H.

La chimie du ciment Portland

Eyrolles, 1952 (pour la traduction française)

Callebaut K., Elsen J., Van Balen K., Viaene W.

Historical and scientific study of hydraulic mortars from the 19th. Century In RILEM TC-167COM International Workshop, University of Paisley, May 1999

Butler D. B.

Portland Cement : its manufacture, testing and use

London, New-York, Spon and Chamberlain, 1899

Cook, P. L. Effects of Mergers, 1 The Cement Industry

Routledge Library Editions, 2003 Gooding P., Halstead P. E.

The early history of cement in England

In Proceedings of the Third International Symposium of the Chemistry of Cement, London, 1952. Cement and Concrete Association, 1954.

Hall C.

On the history of Portland cement after 150 years Journal of Chemical Education, vol. 53, n° 4, 1976 Redgrave , G. R.

Calcareous cement : their nature and uses, with some observations upon cement testing

London, Charles Griffin and Co., 1895 Rengade, E.

Henry LE CHATELIER et l'Industrie des Ciments

Revue de Métallurgie, janvier 1937 Schott, O.

German methods in Cement Portland manufacture

Association of American Cement Portland Manufacturers, 1910 Young J. F.

Looking ahead from the past : The heritage of ciment chemistry

Cement and Concrete Research, 2008, vol., 38, pp. 11-14

Calcareous hydraulic binders from a historical perspective

Document de l'Université Catholique de Louvain

La fabrication du ciment courant

27 juin 2009

Le ciment, la norme NF EN 197-1 en donne une définition :

« Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. »

La fabrication du ciment courant

Le constituant principal du ciment est le clinker. Il est obtenu par la cuisson d'un mélange composé généralement aux environs de 80% de calcaire (majoritairement composé de carbonate de calcium $CaCO_3$) et de 20% d'argile mélange complexe et souvent hydraté de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer ($Fe_2 O_3$)).

Extraction, concassage et broyage

Les matières premières sont extraites des carrières. Les blocs extraits sont ensuite concassés sur le site même de la carrière à une dimension d'environ 50 mm.

Intérieur d'un broyeur à boulets

Préparation du cru

Les morceaux de calcaires et d'argile sont broyés très finement et sont intimement mélangés pour donner le cru.

Deux techniques de fabrication sont utilisées : le mélange est préparé sous forme de poudre (c'est la voie sèche ou semi-sèche) ou sous forme de pâte (c'est la vois semi-humide ou humide).

La voie sèche est aujourd'hui la plus utilisée. La pratique de la préhomogénéisation affine considérablement le dosage du calcaire et de l'argile, par l'empilement de nombreuses couches des deux matières premières.
Au sortir de la préhomogénéisation, le mélange est broyé très finement pour donner ce cru dont nous venons de parler. Le cru est ensuite réhomogénéisé par fluidisation. La composition du cru respecte généralement les proportions suivantes :

Composant du cru	**Proportion**
Carbonate de calcium ($CaCO_3$)	77 à 83 %
Silice (SiO_2)	13 à 14%
Alumine ($Al2O_3$)	2 à 4%
Alumine ($Al2O_3$)	1,5 à 3 %.

Cuisson du cru

Four rotatif de cimenterie

Les installations de cuisson comprennent deux parties :

-1 La poudre est déversée dans un échangeur de chaleur dans lequel circulent en sens inverse les gaz très chauds qui s'échappent du four. Le cru y progresse jusqu'à l'entrée du four proprement et est donc préchauffé à une température d'environ 800°C quand il atteint l'entrée du four. Sa décarbonatation commence.

-2 Le cru pénètre dans un four rotatif légèrement incliné qui tourne à un rythme de 1 à 3 tour/mn. Ce four mesure de 60 à 90 mètres. Le cru, en entrant dans le four achève sa décarbonatation et chemine vers la zone de clinkérisation (1450°C).

A partir de 650°C , le carbonate de calcium du calcaire subit une décarbonatation ($CaCO_3$ - -> $CaO + CO_2$).

On obtient alors de la chaux vive (CaO) accompagnée d'un important dégagement gazeux (CO_2).

La chaleur sépare l'argile en silice (SiO_2), en alumine (Al_2O_3) et en oxyde de fer (Fe_2O_3).

A partir de 1300°C les réactions de clinkérisation se produisent :

Oxyde de fer ($Fe2O_3$) + alumine (Al_2O_3) + oxyde de calcium (CaO) –> aluminoferrite tétracalcique ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$).

Alumine ($Al_2O_{3)}$ + chaux vive (CaO) –> aluminate tricalcique ($Ca_3Al_2O_6$).
Ces deux composés nouvellement formés constituent la phase liquide du mélange . Celui-ci progresse vers la partie la plus chaude du four. La silice (SiO_2) et la chaux vive (CaO) réagissent entre-elles :
Silice (SiO_2) + chaux vive (CaO) –>silicate bicalcique (Ca_2SiO_4)
S'il reste de l'oxyde de calcium (CaO) qui n'a pas encore réagi, la réaction peut se poursuivre :
Silicate bicalcique (Ca_2SiO_4) + chaux vive (CaO) –>silicate tricalcique (Ca_3SiO_5)

Broyage du clinker

Granulés de clinker prêt à être broyé

A la fin de la cuisson, la matière est brusquement refroidie. Elle se présente alors sous forme de granules. Il s'agit du clinker dont la composition est la suivante :

Nom cimentier	**Formule**	**Min.**	**Max.**
Alite (silicate tricalcique)	Ca_3SiO_5	45.0 %	79.7 %
Bélite (silicate bicalcique)	Ca_3SiO_4	5.7 %	29.8 %
Aluminate tricalcique	$Ca_3Al_2O_6$	1.1 %	14.9 %
Aluminoferrite tétracalcique	$Ca4Al_2Fe_2O_{10}$	2.0 %	16.5 %
Chaux libre	CaO	0.6 %	2.8 %

Finement broyé avec du gypse (destiné à réguler la prise), le clinker donne le ciment Portland.
D'autres ciments sont obtenus en ajoutant à cette phase de broyage divers constituants : laitier granulé de haut fourneau, cendres volantes, fillers, schistes calcinés, qui sont des matériaux pouzzolaniques. La

composition chimique du ciment garantit ses qualités ; des analyses sont donc effectuées sur des échantillons prélevés régulièrement tout au long du procédé de la fabrication. On analyse également les matières premières et les combustibles afin de connaître leur teneur en différents composés et de pouvoir ainsi les doser.

On analyse également les matières premières et les combustibles afin de connaître leur teneur en différents composés et de pouvoir ainsi les doser. Ces analyses sont d'autant plus importantes que la fabrication du ciment emploie aujourd'hui des produits de recyclage, pour les matières premières et pour les combustibles

Lecture complémentaire :

Les voies de réductions des émissions de CO2 de l'industrie cimentière…
Entretien avec Paul Acker, Directeur scientifique du Centre de recherche de la Société Lafarge (Lettre d'information du LERM n° 10)

Ciments et granulats

27 juin 2013

Entretien avec Jacques Burdin, Ingénieur Conseil, Spécialiste Matériaux pour les Grands Ouvrages

Pouvez-nous parler un peu de l'évolution des ciments sur ces 25 dernières années ?

L'évolution majeure des ciments concerne, selon moi, leur réponse à l'exigence environnementale de réduction d'émission de CO2 dans l'atmosphère. La nécessité de cette réduction est d'autant plus prise en compte qu'elle participe à l'économie générale de la construction en réduisant la part du clinker et en y substituant des additions qui sont pour la plupart aujourd'hui normalisées.

L'usage de ces constituants répond à une définition normative et il est légitime, d'autant que la qualité de ces constituants n'a cessé de progresser ; parmi eux, le laitier, les cendres volantes les fumées de silice, les pouzzolanes naturelles et les schistes calcinés, qui améliorent incontestablement certaines propriétés du ciment.

L'usage de ces constituants est donc bénéfique… lorsqu'il reste dans des proportions acceptables. J'émets cependant un doute sur l'usage qui est fait aujourd'hui des fillers calcaires et sur les garanties que cet usage présente pour la durabilité des bétons. Gardons à l'esprit que l'usage des constituants secondaires du ciment vise aussi la réduction de la teneur en chaux libre, élément pouvant être à l'origine de nombreuses pathologies du béton.

Pour ce qui concerne le ciment, il ne faut pas oublier que nous sommes passés de l'époque pas si lointaine du « ciment naturel » à celle du « ciment artificiel » qui nécessite quelques fois un exercice chimique un peu acrobatique compliqué par l'utilisation de combustibles alternatifs qui pourraient compromettre la stabilité à long terme des bétons.

« L'évolution majeure des ciments concerne, selon moi, leur réponse à l'exigence environnementale de réduction d'émission de CO2 dans l'atmosphère. La nécessité de cette réduction est d'autant plus prise en compte qu'elle participe à l'économie générale de la construction en réduisant la part du clinker et en y substituant des additions qui sont pour la plupart aujourd'hui normalisées. »

L'évolution de la normalisation des ciments vous semble-t-elle avoir accompagné ce mouvement ? La normalisation des ciments et des bétons est globalement conduite par l'industrie cimentière, ce qui est en fait assez normal puisque le ciment est le composant actif des bétons. En se soumettant au cadre normatif,

elle l'adapte aussi à ses propres contraintes. Ainsi, par exemple, il me semble que le laitier a été un peu mal traité dans l'approche normative… C'est sans doute qu'il est un liant hydraulique à lui seul.

Mais, d'un autre côté, son sous emploi est peut-être une sagesse au regard du repli de l'industrie sidérurgique en Europe.

Pour ce qui est de la production normative, je crois que nous sommes en train d'atteindre les limites de son acceptabilité : plus aucune responsabilité n'est laissée aux acteurs de la construction. Les ingénieurs ont maintenant tendance à se réfugier derrière la panoplie des normes et de recommandations en empilant dans les contrats de travaux sans plus réfléchir toutes les exigences et en débouchant ainsi sur des situations ingérables.

« La réglementation et l'économie ont écarté pour un temps l'imagination et l'innovation. La notion d'approche performantielle (…) permettra de combler cette lacune et prendra en compte tous les aspects aussi bien techniques qu'économiques, et de déboucher sur des solutions spécifiques adaptées. »

Vous êtes sévère !

Réaliste, plutôt… la réglementation et l'économie ont écarté pour un temps l'imagination et l'innovation.

La notion d'approche performantielle s'appuyant sur les « bétons d'ingénierie » que les documents normatifs sont en train de développer, permettra de combler cette lacune et prendra en compte tous les aspects aussi bien techniques qu'économiques, et de déboucher sur des solutions spécifiques adaptées.

Mais si l'on sort de la prescription de base encadrée par la norme, il faut savoir s'appuyer sur une ingénierie et des laboratoires matériaux de qualité.

Et votre point de vue rétrospectif pour ce qui concerne les granulats ?

Dans ce domaine, l'appareil normatif a plutôt bien évolué et a été un moteur d'amélioration de la qualité des produits… et des mentalités des producteurs de granulats !

La norme NF EN 12620 a permis de classifier de façon fine les granulats et de discipliner les producteurs. On est sorti du folklore local : la régularité et la conformité des granulats sont maintenant assurées… même si la notion d'autocontrôle laisse encore quelques opportunités à l'improvisation.

Pour ce qui concerne les granulats, la norme me semble très précise sur toutes les questions de granulométrie, mais lâche sur les questions de minéralogie. La question de la minéralogie a beaucoup avancé au cours des 25 dernières années, grâce à un laboratoire comme le LERM soit dit en passant, mais je crois que c'est par là que viendront encore les sources de progrès.

La minéralogie est fondamentale et c'est une problématique transversale à tous les matériaux minéraux. C'est elle qui commande à la durabilité des bétons : l'alcali-réaction a été un tournant dans la prise en compte de la minéralogie dans l'explication des phénomènes pathologiques, mais elle concerne bien sûr aussi la réaction sulfatique interne, la thaumasite… et des pathologies qui n'ont pas encore de nom !… Car de nouvelles pathologies me semblent inévitables.

Ces phénomènes ont été compris par l'analyse minéralogie et l'analyse microstructurale qui ont été conduites dans les années 80 par des chercheurs renommés dont Micheline Regourd-Moranville et Hugues Hornain.

Donnez-nous votre point de vue sur la question des granulats et des bétons recyclés ?

La volonté de les employer existe… avec de grandes nuances ! Je crois que nous allons y aller tout doucement.

Les deux questions sont un peu différentes : bien séparés et bien nettoyés, le réemploi des granulats ne pose pas de problème. Le béton recyclé est plus problématique, mais on peut imaginer approcher quelque chose comme un seuil de 20% autorisé pour les bétons classiques. Pour les bétons structurels d'ouvrages avec des durabilités longues prescrites, l'usage de ce béton recyclé me semble cependant exclu.

Valorisation de cendres dans les bétons. Lerm 2013

La science des déchets a beaucoup évolué ces dernières années et va encore évoluer, qu'il s'agisse du traitement et de l'inertage des déchets industriels ou de la valorisation des matériaux d'excavation des ouvrages souterrains qui sont encore considérés comme déchets par la législation en vigueur.

Les additions hydrauliques ont permis le dépôt de plusieurs brevets pour l'enrobage des déchets industriels, le LERM y a largement contribué.

Le laitier et le ciment à très faible teneur en C3A permettront probablement l'utilisation de granulats sulfatés pour la fabrication de bétons durables grâce aux recherches conduites par l'IFSTTAR le LERM et quelques industriels motivés. Dans ces deux domaines les enjeux environnementaux sont très importants.

« La minéralogie est fondamentale et c'est une problématique transversale… »

Propos recueillis par Philippe Souchu, documentaliste au Centre de documentation du Lerm. Juin 2013.

L’eau dans la pâte de ciment hydraté

27 septembre 2014

La pâte de ciment durcie est constitué de C-S-H considérés collectivement comme un gel, de cristaux de Portlandite $Ca(OH)_2$, de quelques composants mineurs et enfin, de grains de ciment non hydratés. Le reste est constitué de vides qui, dans la pâte fraîche, sont remplis d’eau. Ces vides sont appelés pores capillaires. Mais à l’intérieur même du gel, il existe aussi des vides interstitiels appelés pores de gel.
L’eau, composant de la pâte de ciment, est aussi importante par sa présence, que par sa transformation et même par sa disparition, dont les vides, dans la matrice, sont la trace…

Le rapport eau/ciment : hydratation

Pendant l’hydratation, qui commence dans une suspension colloïdale, la surface de la phase solide croît et une partie de l’eau libre est adsorbée à sa surface. Dans un milieu confiné, à l’abri d’apports ou de départs d’eau, les réactions d’hydratation consomment une grande part de la quantité d’eau, ce qui implique une diminution de l’humidité relative de la pâte. Ce phénomène est reconnu sous le nom **d’autodessication**.
Cette autodessication ralentit progressivement l’hydratation dans la mesure où le gel de C-S-H ne se forme précisément qu’en présence d’eau.
La masse d’eau chimiquement liée dans les hydrates lors de l’hydratation étant difficile à déterminer, il est plus sûr de prendre en compte l’eau non évaporable, qui correspond en général à 23% de la masse de ciment anhydre.

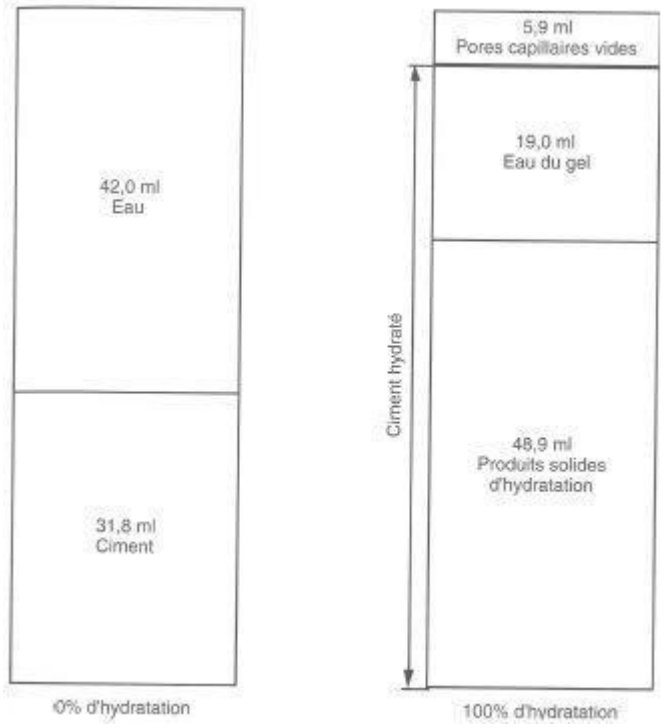
> Précision : « la quantité d’eau non évaporable augmente avec l’hydratation, mais, dans une pâte saturée, l’eau non évaporable ne peut jamais représenté plus de la moitié de l’eau totale. Dans le cas d’un ciment bien hydraté, l’eau non évaporable représente environ 18% de la masse des matériaux anhydres ; cette proportion s’élève à 23% pour un ciment complètement hydraté. » A. M. Neville citant Lea, The Chemistry of Cement, 1970 (1)

Les produits d’hydratation occupent un volume supérieur au volume absolu du ciment anhydre, et inférieur à la somme des volumes du ciment et de l’eau non évaporable d’environ 0,254 fois le volume de cette eau. Muni de ces données, A. M. Neville (1) calcule les volumes mis en jeu pour 100 g de ciment anhydre, calcul qu’il récapitule ainsi :

Masse de ciment anhydre	100 g
Masse de l’eau combinée (ou non évaporable)	23 g
Volume de l’eau du gel	19 g

Eau total du mélange	42 ml
Rapport eau/ciment massique	0,42
Rapport eau/ciment volume	1,32
Volume ciment hydraté	67,9
Volume initial ciment+eau	73,8
Diminution volume liée à l'hydratation	5,9 ml

Il tire de ce tableau la représentation graphique suivante :



Représentation schématique de la variation du volume d'une pâte de ciment de rapport eau/ciment de 0,42

Cette représentation montre que la diminution de volume due à l'hydratation notée dans le tableau correspond aux pores capillaires vides répartis dans la pâte de ciment hydraté. Comme le gel ne peut se former que s'il y a suffisamment d'eau à la fois pour les réactions d'hydratation et pour le remplissage des pores, si la quantité d'eau initialement ajoutée avait été inférieure à 42 ml, l'hydratation n'aurait pu être complète.

Il convient de noter ici que l'eau des pores de gel, chimiquement ou physiquement adsorbée, ne peut migrer vers les pores de capillarité.

Sans apport d'eau extérieure, l'hydratation s'arrête lorsque l'eau combinée atteint environ la moitié de l'apport d'eau initial.
Les calculs sur les volumes indiquent aussi que si le rapport eau/ciment massique est inférieur à 38%, l'hydratation complète est impossible, du fait que le volume disponible est insuffisant pour contenir la totalité des produits d'hydratation.

C'est Le Chatelier (1) qui, en 1900, met en évidence la contraction de la matrice cimentaire lors du processus d'hydratation. Ce phénomène porte donc le nom de ***contraction Le Chatelier*** : cette contraction découle du fait que le volume des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes des constituants réactifs (l'eau et le ciment). Dans la pâte de ciment au très jeune âge, cette contraction peut s'effectuer librement. Après la prise, le durcissement de la pâte empêche ce phénomène : la contraction met en jeu des tensions capillaires au sein du ciment durci, qui aboutissent localement à une vaporisation de la solution interstitielle.
Ce retrait, appelé **endogène** en raison de son lien avec les réactions chimiques inhérentes au matériau, est négligeable pour des mortiers dont le rapport eau/ciment est élevé. Il n'en est pas de même pour les matrices des bétons à hautes et très hautes performances, à faible rapport eau/ciment : la réduction de la porosité initiale réactive ce risque de retrait endogène, qui peut se manifester alors par une fissuration précoce.(1) Henri Le Chatelier : Sur le changement de volume qui accompagne le durcissement des ciments. Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 5e série, tome 5, pp. 54-57.

Rapport eau/ciment : résistance à la compression

Le pourcentage de vide dans le béton influe directement et défavorablement sur sa résistance à la compression. Compte tenu du fait que la compacité du béton est déterminée à la fois par son serrage et, nous venons de le voir, par le rapport eau/ciment, ce rapport important pour l'hydratation ne l'est pas moins pour la résistance mécanique du béton. Cette résistance est inversement proportionnelle au rapport eau/ciment. C'est ce qu'indique la règle formulée empiriquement par René Féret dès 1896 (!) :

$$Rc = K\left(\frac{c}{(c+e+a)}\right)^2$$

ou Rc est la résistance du béton
c = ciment e = eau v = air et k
est une constante.

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et d'air, pour réduire la porosité, réduction dont la conséquence est l'élévation de la résistance.

L’introduction des superplastifiants a permis, une réduction significative de l’eau de gâchage… Ce sera l’objet de l’un des prochains épisodes de notre feuilleton sur l’eau.

Rappel de la typologie de l’eau présente dans la pâte de ciment hydraté

L’eau libre

Cette eau n’est pas soumise aux effets de surface des solides. Elle se trouve dans les pores capillaires.

L’eau adsorbée

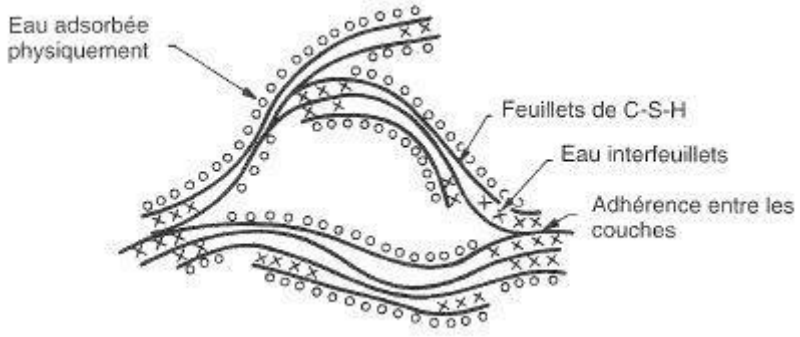
Cette eau est soumise aux effets de surface des solides.

Elle peut être adsorbée physiquement *:* elle est alors soumise aux forces d’attraction de type Van der Waals.
Elle peut être adsorbée chimiquement : des électrons sont mis en commun entre l’eau et la surface solide. La structure de la molécule d’eau est donc modifiée par rupture de la liaison covalente O-H

L’eau combinée

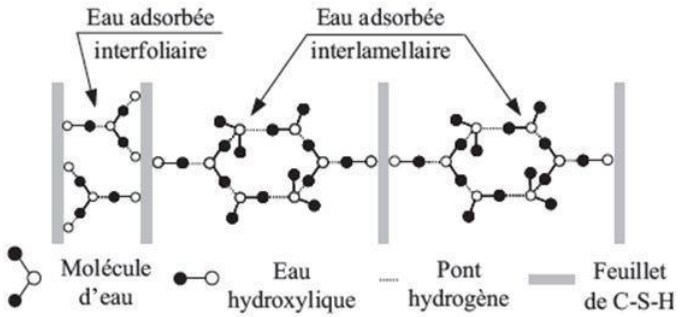
L’eau peut être chimiquement combinée : elle entre dans les réactions chimiques d’hydratation pour former des C-S-H, la Portlandite ou de l’ettringite.

L’eau des pores de gel



Modèles des silicates hydratés proposé par Feldman et Sereda (2)

Au sein même des C-S-H, l’eau est présente sous trois occurrences différentes :
L’eau hydroxyle (groupement OH) : liée aux atomes Si et Ca à la surface des feuillets.
L’eau interfoliaire (ou interfeuillet) : liée aux feuillets par des groupements hydroxyles. Elle intervient alors dans la cohésion de la lamelle. *L’eau interlamellaire :* fixée la surface des lamelles par un hydroxyle, soit liée à d’autres molécules d’eau.



Etat de l'eau dans les C-S-H par Sierra, 1974, cité par Regourd. Schéma explicité par De Sa, 2007 (3)

Notes et… en savoir plus

Notre article : L'hydratation du ciment Portland

(1) Adam M. Neville, Propriétés des bétons, Eyrolles, 2000.

(2) R. F. Feldman, P. J. Sereda, A model of hydrated Portland Cement paste as deduced from sorptionlength change and mechanical properties. Revue des Matériaux de Construction, 1968,n n° 6.

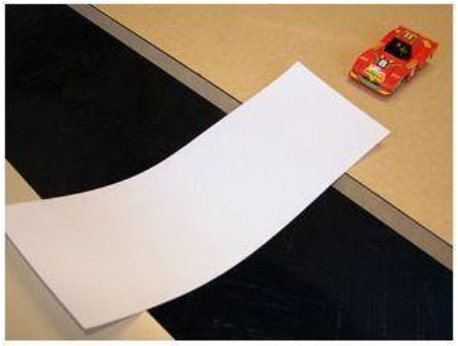
(3) Caroline De Sa, Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton. Influence des gradients et des incompatibilités. Thèse de l'ENS de Cachan, 2007.

Micheline Regourd, Le béton hydraulique connaissance et pratique, Presse de l'ENPC, 1982, chapitre sur l'eau et chapitre sur l'hydratation.

Husam Mitani, Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux. Thèse de l'ENPC, 2003.

La durabilité du béton… et ses ennemis

27 mai 2014



Un ouvrage répond à un besoin par l'exercice d'une fonction. La durabilité de l'ouvrage consiste à conserver dans le temps cette fonction. Plus la fonction de l'ouvrage est importante mieux sa durabilité devra être garantie, pour maintenir d'une part la permanence de sa fonction et pour optimiser d'autre part le retour sur l'investissement consenti. La durabilité, c'est donc, selon la norme NF X60-500, (Terminologie relative à la fiabilité – Maintenabilité – Disponibilité. Octobre 1988) « *l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint* ». La question est donc de définir cette limite.

Les critères de durabilité du béton, ont longtemps été **liés aux performances mécaniques requises à 28 jours.**

Pour ce qui concerne une structure, les exigences de résistance et de comportement en service étaient souvent seules prises en compte.

Il se trouve que les ouvrages ne vieillissent pas seulement du fait de l'exercice de leur fonction, mais aussi du fait de l'action qu'exerce sur eux l'environnement dans lequel ils se trouvent. L'ouvrage et son matériau doivent donc être adaptés à leur milieu. Le climat, l'agressivité des eaux, des sols et de l'atmosphère sont donc des paramètres à prendre en compte dès la conception du béton afin que celui-ci présente au final les caractéristiques physico-chimiques adaptées à l'environnement dans lequel il s'insérera.

Les progrès considérables de la connaissance de la minéralogie et de la microstructure des bétons, celle des adjuvants et des additions minérales ont ouvert des perspectives de plus en plus fines aux réponses en termes de durabilité.

La démarche performantielle, par le choix d'indicateurs de durabilité et de critères de performance des bétons, permet de définir des objectifs de durabilité compatibles avec le milieu environnant et avec la durée de service envisagée. Avant d'explorer cette démarche proprement dite, nous rappelons ci-dessous les phénomènes qui nuisent à la durabilité du béton :

La carbonatation
La carbonatation
La corrosion des armatures
La corrosion des armatures
La corrosion des armatures danger majeur pour la durabilité des ouvrages en béton armé
L'action des chlorures
Les chlorures dans le béton
L'action de l'eau de mer
Attaque de la matrice cimentaire par les chlorures
La lixiviation
La lixiviation
L'alcali-réaction
L'alcali-réaction
La réaction sulfatique interne
Sulfates et béton : la réaction sulfatique interne, entretien avec Loïc Divet
Le gel / dégel
Effet du gel dégel dans les bétons

La durabilité des bétons, 25 ans d'expérience…

29 juin 2013

Entretien avec Hugues Hornain, fondateur du LERM et consultant indépendant

« Avant toute chose je vous remercie de m'avoir convié à cet entretien qui concerne un sujet extrêmement vaste et qui ne pourra être exhaustif. Je ferai part de ma modeste expérience personnelle très vraisemblablement imparfaite et incomplète. Je tiens aussi à préciser que ce modeste savoir je le dois pour beaucoup à tous ceux avec lesquels j'ai eu à travailler. Je tacherai donc de répondre autant que possible aux questions que vous voudrez bien me poser ». Hugues Hornain.

Pour vous, Hugues, de quand date le concept de durabilité des bétons ?

Pont Rion-Antirion, un exemple de durabilité des ouvrages. Crédits Guillaume Piolle.

La durabilité du béton est, pour les utilisateurs et les laboratoires, une préoccupation de longue date. De nombreux travaux de recherche avaient déjà effectués au moment de la création du LERM en 1988 et je crois qu'avant toute chose il faut rendre hommage aux pionniers de la chimie des ciments qui ont permis les avancées considérables que l'on peut observer aujourd'hui dans la connaissance du système chimique si complexe qu'est le béton : avec John Smeaton à la fin du 18ème siècle, Louis Vicat au 19ème , Henri Le Chatelier et son élève Henri Lafuma (mon directeur de thèse), on pourrait dresser une liste extrêmement longue de ceux qui ont apporté leur contribution aux savoirs indispensables à la compréhension des phénomènes relatifs à la durabilité du béton.

Depuis, le concept de durabilité, auparavant focalisé sur la résistance du béton, considéré comme paramètre principal, s'est considérablement élargi, englobant maintenant non seulement les critères de résistance, mais encore les aspects environnementaux et socio-économiques. Cela s'est traduit en particulier par une nouvelle approche dite « approche performantielle » de la durabilité dont nous reparlerons. Mais, pour revenir à ce dont j'ai pu être moi-même témoin, le tournant se situerait à la fin des années 70 et début des années 1980, époque à laquelle je travaillais encore au CERILH sous la direction de Madame MoranvilleRegourd qui a été l'initiatrice de très nombreux travaux sur la durabilité du matériau béton.

« …le concept de durabilité, auparavant focalisé sur la résistance du béton, considéré comme paramètre principal, s'est considérablement élargi, englobant maintenant non seulement les critères de résistance, mais encore les aspects environnementaux et socio-économiques. »

Comment s'organise à cette époque la recherche sur cette question ?

En France, la recherche sur les ciments était, à cette époque, assurée par le Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie des Liants Hydrauliques qui avait été fondé après la seconde guerre mondiale en 1947. Il s'agissait du laboratoire de recherche mutualisé des sociétés cimentières alors très nombreuses. Ce laboratoire était alors tourné vers les problématiques de production du clinker et du ciment. Après le

regroupement de l'industrie cimentière qui disposa alors de ses propres moyens de recherche, les activités du CERILH furent orientées vers les problématiques liées aux bétons et en particulier vers les problématiques de durabilité.

Dans ce contexte, l'apparition en France de phénomènes d'alcali-réaction sur certains ouvrages (barrages, ponts…) a été un tournant.

Cette pathologie avait déjà identifiée dans plusieurs pays (Nouvelle Zélande, Canada, Royaume Uni, Afrique du Sud), mais sa révélation en France a été un vrai choc. Compte tenu de son temps d'incubation assez long, cette réaction s'est manifestée sur des ouvrages qui avaient été réalisés 10 à 15 ans auparavant.

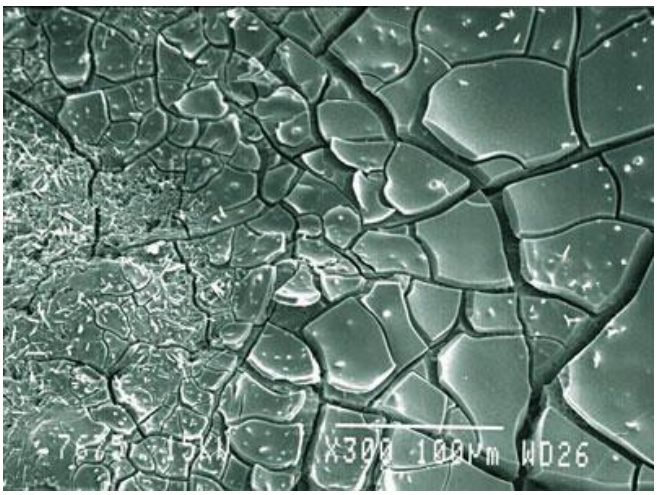
D'abord inconnue en France, cette pathologie a été, dans un premier temps, plus ou moins niée, en raison des enjeux de politique économique…

Les hésitations sémantiques, qu'on a alors connues sur la dénomination de la pathologie, ont visé a protéger les producteurs de ciments et de granulats : l'expression « alcali-réaction » a finalement semblé moins compromettante que celles de «alcali-ciment» ou de « alcali-granulats» qui avaient été primitivement utilisées.

Avec l'apparition de l'alcali-réaction, le CERILH, sous l'impulsion de Micheline Regourd-Moranville, va se tourner vers le diagnostic de cette pathologie, mais va également s'intéresser à d'autres agressions chimiques comme l'attaque par les sulfates et l'eau de mer, la corrosion des armatures… L'activité du CERILH dans ce domaine, en collaboration avec les groupes de travail nationaux et internationaux débouchera sur la publication de documents réglementaires et de recommandations.

En 1987, lors de la fermeture du CERILH, le LERM naît de la conviction de cinq ingénieurs et techniciens de l'utilité, aujourd'hui largement confirmée, du maintien de l'existence d'un laboratoire indépendant reprenant certaines des activités du défunt Centre Technique qui correspondaient à un besoin manifeste.

Héritant des hommes, le LERM hérite naturellement des connaissances déjà acquises par le CERILH sur la durabilité.



Gel d'alcali-réaction observé au Microscope Electronique à Balayage (LERM)

Par ses compétences reconnues à l'échelle nationale et internationale en matière de physico-chimie des ciments, et avec le soutien bienveillant de personnalités de l'industrie et de la recherche telles que Micheline Regourd-Moranville, en tant que professeure à l'ENS de Cachan, Jean-Pierre Ollivier professeur à l'INSA de Toulouse, André Leroux ingénieur au LCPC, François Miersman de la société Surschiste et Paul Poitevin de SPIE Batignolles auxquelles on peut ajouter des chercheurs du CEA et beaucoup d'autres encore, le LERM été rapidement intégré à la communauté scientifique et technique et aux groupes de travail concernés par les problématiques de durabilité.

A partir de là, le LERM, déjà bien équipé avec du matériel issu du CERILH, et surtout du matériel acquis à grand frais grâce aux indemnités de licenciements et à la garantie du patrimoine personnel des créateurs, a pu commencer à travailler rapidement notamment sur les problèmes d'alcali-réaction très sensibles à cette époque : diagnostic sur ouvrages, identifications des pathologies, analyses chimiques et minéralogiques, tests physico-chimiques, évaluation des potentiels de dégradation …

Quels étaient alors vos outils de diagnostic ?

Comme je vous le disais, nous disposions déjà de bons outils de diagnostic parmi lesquels je citerai d'abord l'expertise des créateurs acquise au CERILH, la microscopie optique et surtout la microscopie électronique à balayage (MEB) associée à la microanalyse élémentaire, outil incontournable pour la reconnaissance des pathologies, un laboratoire de chimie analytique, un laboratoire d'essais physiques comprenant non seulement des outils de mesure des caractéristiques mécaniques des bétons mais aussi des enceintes climatiques destinées aux différents tests de durabilité.

Les méthodes de diagnostic et d'essais n'étaient pas alors clairement définies et variaient en fonction de l'expérience de chaque laboratoire. Les premiers travaux collectifs au sein des groupes de travail AFREM, AFGC, RILEM ont donc porté sur l'élaboration d'une classification des milieux agressifs et des agressions physico-chimiques, la mise au point de méthodes d'essais et de méthodes de diagnostic harmonisés qui permettaient de confronter les résultats entre laboratoires.

Après ce bref mais nécessaire historique revenons si, vous le voulez-bien, au concept de durabilité et à son évolution au cours des 25 ans écoulés.

Volontiers et commençons par faire un très bref état des lieux relatif à la période 70 et 90 :

- Les travaux de recherches sur le comportement du béton au contact des milieux agressifs courants (sulfates, eau de mer, alcali-réaction) sont déjà très abondants ;
- En France on « découvre » l'alcali-réaction ; Les besoins des constructeurs et gestionnaires d'ouvrages en matière de diagnostic, de pronostic ainsi que les exigences de durées de vie de plus en plus longues (? 100 ans) se sont accrus ;
- La réglementation (normes, fascicules de documentation, directives…) évolue ;
- La notion de durabilité évolue : bien que toujours intimement lié à la pérennité du béton, le critère de résistance mécanique qui était autrefois le premier des critères pris en compte, est remplacé par le concept beaucoup plus large de durabilité ;

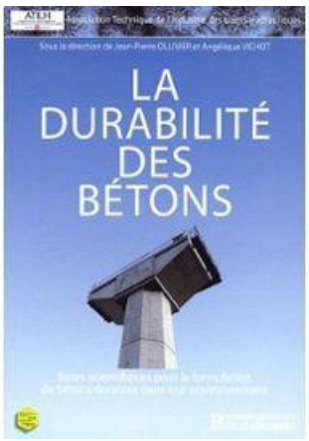
- Soit dit en passant, ce concept n'est d'ailleurs pas à séparer du concept très actuel de « développement durable », le matériau béton ayant une « vie » avant (exploitation des matériaux, fabrication du ciment), pendant (entretien, réparations) et après la construction (devenir des produits de démolition).

Si l'on considère cet état des lieux, même succinct, on voit que l'activité a été très intense pendant cette période de transition. Pouvez-vous nous en dire un peu plus sur les progrès qu'elle a amenés, notamment dans le domaine qui nous intéresse ?

Tout d'abord progrès des connaissances **:** durant les deux dernières décennies un important travail, toujours en cours aujourd'hui, a été effectué dans le domaine des connaissances indispensables à une meilleure compréhension des mécanismes physico-chimiques de base dont dépend la résistance du béton aux différentes agressions qu'il peut subir : mécanismes d'hydratation, microstructuration progressive de la pâte de ciment, propriétés de transfert (perméabilité, diffusivité) et leur modélisation.

En effet, le béton est un matériau poreux multiphases, composé d'un squelette granulaire, d'un liant hydraté (silicates, aluminates) et d'une phase liquide interstitielle basique. Du fait de sa microporosité, il est le siège permanent d'échanges internes entre phases solides hydratées et phase liquide, ainsi que d'échanges avec le milieu extérieur. Ces échanges, par perméation et diffusion font du béton, système chimique très complexe en évolution permanente et sensible à son environnement.

Les travaux récents, entre autres, de J.P. Ollivier de l'INSA de Toulouse sur la structure poreuse des bétons, d'A. Nonat sur l'hydratation des ciments, de D. Damidot de l'Ecole des mines de Douai de P. Le Bescop du CEA sur le transport réactif dans les bétons, travaux que l'on peut retrouver dans l'excellent livre « La Durabilité des Bétons » paru en 2008, sont éloquents de ce point de vue.



Cette recherche fondamentale trouve une application directe aux phénomènes qui gouvernent le comportement du béton vis-à-vis des agressions physico-chimiques. Par exemple, le transport réactif, qui fait intervenir les couplages chimie (composition des hydrates)porosité (pores capillaires, pores d'hydrate)-propriétés de transfert (diffusion) permet de décrire les évolutions physico-chimiques du béton en interaction avec son environnement : lixiviation des hydrates par les solutions agressives (eaux douces, pluies acides…) et modifications de la structure poreuse, précipitations de phases nouvelles (attaques sulfatiques, eau de mer …).

Un autre progrès important se situe dans l'émergence de nombreux modèles permettant de décrire l'évolution des phénomènes dont le béton est le siège : modèles relatifs aux réactions d'hydratation, aux

phénomènes de transfert (diffusion, percolation…), modèles prédictifs décrivant l'évolution du béton au contact d'environnements agressifs. On peut citer comme exemple les modèle de diffusion des chlorures qui permettent de déterminer le gradient de concentration des ions Cl- en fonction du temps et de prévoir leur concentration et leur profondeur de pénétration dans le béton d'enrobage des armatures. Ces paramètres déterminent si, pour une durée de vie donnée, les armatures seront protégées et l'on sait l'importance des problèmes de corrosion des armatures, qui représentent en gros 80% des désordres constatés sur les ouvrages. L'un de ces modèles a été mis au point au LERM par Olivier Houdusse, en collaboration avec l'Université Laval de Québec.

Différents modèles prédictifs relatifs à la carbonatation du béton, également phénomène crucial responsable de la dépassivation des aciers, ont été proposés. En relation avec les problèmes de carbonatation je ne peux m'empêcher de citer l'important travail de N. Rafaï, ingénieur au LERM, sur le dosage isotopique du carbone dans les bétons.

Pouvez-vous maintenant nous dire quelques mots sur les bétons de nouvelle génération ? Ils croisent, en quelque sorte, notre concept de durabilité…

Oui, parmi les progrès réalisées, on peut également faire référence à ce que l'on pourrait appeler les nouveaux bétons qui, vis-à-vis de la durabilité, ont un comportement intéressant du fait de leur grande compacité, la compacité étant, rappelons-le, l'un des paramètres décisifs vis à vis de la résistance chimique du béton. Parmi ces bétons on peut citer les BHP (Béton à Haute Performance) de résistance à la compression ? 60 MPa, les BTHP (Béton à Très Haute Performance), BFUP (Béton de Fibres à Ultra Haute Performance) ou encore les BPR (Bétons de Poudre Réactives) dont les propriétés mécaniques approchent celles de certains métaux. Les résistances à la compression de ces bétons sont comprises entre 200 et 600 MPa avec des résistances en traction supérieures à 100 MPa. Ces propriétés mécaniques exceptionnelles s'accompagnent d'une résistance aux agressions chimiques fortement accrue (par exemple leur coefficient de diffusion effectif est 50 fois plus faible que celui d'un BHP).

Ces bétons, à l'avenir prometteur, doivent permettre la construction d'ouvrages plus légers sans armatures passives et ayant un bilan CO2 inférieur à celui des bétons traditionnels et ont un intérêt écologique certain.

La conception de tels bétons a été rendue possible par l'optimisation de la courbe granulométrique du mélange sec conduisant à la compacité maximale. Leur composition comprend des fumées de silice, un fort dosage en ciment et un sable. Ce type de béton a été rendue possible également grâce à l'apparition sur le marché de superplastifiants de plus en plus efficaces permettant de réduire très fortement les rapports Eau/Liant tout en garantissant une mise en place adéquate. On pourrait ajouter dans la liste des nouveaux bétons les BAP (Bétons Auto-Plaçants) qui résultent également des progrès réalisés dans le domaine des superplastifiants ainsi que dans l'optimisation des systèmes granulaires.

Vous évoquez ici les réactions qui sont dues essentiellement à une action du milieu extérieur, mais qu'en est-il des réactions dites « endogènes ».

Les réactions endogènes sont des réactions d'origine interne au béton sans apport d'agent agressif externe, hormis l'eau (eau liquide ou humidité ambiante).

On distingue deux catégories de réactions endogènes : l'alcali-réaction dont nous avons déjà parlé, d'une part, et la formation différée d'ettringite, d'autre part.

Contrôle de la température d'un béton frais.

Lerm 2013.

L'alcali-réaction est en relation avec la présence dans le béton de granulats contenant des minéraux potentiellement réactifs, principalement des formes de silice amorphes ou cryptocristallins susceptibles de réagir au contact de la solution interstitielle alcaline plus ou moins riche en ions sodium et potassium. La réaction conduit, en présence d'une humidité relative élevée, essentiellement à la formation de « gels » silico-alcalins ou silico-calco-alcalins expansifs provoquant la fissuration du béton. Les mécanismes de gonflement, résultant vraisemblablement de la conjonction de plusieurs phénomènes, ne sont pas encore complètement élucidés. Mais, pratiquement, les connaissances acquises permettent aujourd'hui de construire en minimisant au maximum les risques. Le problème principal reste la réparation des ouvrages atteints dont certains ont dû être détruits.

La seconde est en relation avec la chaleur d'hydratation du ciment qui engendre une élévation de température au cœur des pièces massives de béton (? 60°C), ou avec un traitement thermique (étuvage) du béton. Cette réaction, découverte relativement récemment, résulte de phénomènes complexes de dissolution de l'ettringite primaire formée aux premiers stades de l'hydratation et de recristallisation dans le béton au

contact d'eau et après une période de latence de quelques mois à quelques années, d'une nouvelle ettringite de caractère expansif. Ici encore l'expérience et les connaissances acquises permettent maintenant de maîtriser ce type de réaction.
Entre autres, le document « Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne » publié par le LCPC fournit les éléments nécessaires au diagnostic et au traitement de l'alcali-réaction et de la réaction sulfatique interne.

SI je vous comprends bien, on sait maintenant s'affranchir du risque de ces réactions ?
Même si l'on ne peut jamais s'affranchir totalement des risques, et ceci dans aucun domaine, on dispose

maintenant de connaissances, même si elles sont encore perfectibles, et d'une panoplie d'outils, de recommandations et de normes qui permettent de construire avec plus de sécurité et de faire des diagnostics plus sûrs. C'est ainsi, par exemple, qu'avec l'ouvrage GranDuBé (Grandeurs associés à la Durabilité du Béton), publié en 2007, établi sous l'égide de l'AFGC (Association Française de Génie Civil) et du RGCU (Réseau Génie Civil et Urbain) on dispose maintenant d'un arsenal de modes opératoires recommandés qui permettent de mesurer les principales caractéristiques physico-chimiques des bétons (perméabilité, diffusivité, porosité, microfissuration, taux d'hydratation, dosage en ciment, carbonatation, corrosion des aciers, etc…) et de réaliser des diagnostics de plus en plus pertinents. La mise au point de ces essais harmonisés à laquelle le LERM a largement participé, constitue un réel progrès. On pourrait y ajouter la méthode d'auscultation par radar géophysique, une technique dont le LERM s'est fait une spécialité dès 1997.

Bien entendu, les progrès amenés par l'approfondissement des connaissances de base et par l'observation pratique des phénomènes ont conduit dans le même temps à une évolution importante des documents réglementaires : en relation avec les normes Eurocodes qui ont pour objet d'harmoniser à l'échelle européenne les règles de calcul et de conception des ouvrages de génie civil, il faut citer avant tout la norme NF EN 206-1 de 2004 qui fournit les exigences en matière de spécification, performances, production et conformité du béton.

Cette norme, résultat d'un très long travail commencé en 1981, fait une place privilégiée à la durabilité : elle donne des classes d'exposition en fonction des environnements agressifs (corrosion induite par la carbonatation et par les chlorures d'origine marine ou non, action du gel/dégel, et attaques chimiques) ainsi que les exigences en matière de rapport Eau / Liant, de classe de résistance, de dosage en liant compte tenu des additions minérales, en fonction de la classe d'exposition. Cette norme ouvre également la voie à la nouvelle approche de la durabilité qu'est l'approche performantielle dont nous reparlerons.

La norme NF EN 206-1 règlemente également la substitution partielle du ciment proprement dit par les additions minérales. Ces additions normalisées (essentiellement laitier, cendres volantes, fumées de silice) sont largement utilisées, notamment le laitier granulé de haut fourneau, en cas de risque d'attaque chimique. Par ailleurs elles ont un impact économique et écologique notable dans la mesure où elles permettent de réduire la consommation de clinker et le bilan CO2 du béton.

« …Même si l'on ne peut jamais s'affranchir totalement des risques, et ceci dans aucun domaine, on dispose maintenant de connaissances, même si elles sont encore perfectibles, et d'une panoplie d'outils, de recommandations et de normes qui permettent de construire avec plus de sécurité et de faire des diagnostics plus sûrs. »

Bel ensemble de textes !

Oui… Bel ensemble prescriptif qui traduit des progrès considérables sur la période considérée en termes de connaissances du matériau et des causes de ses pathologies. Cet ensemble permet aujourd'hui de réduire au maximum, dans la plupart des cas et pour les durées de vie courantes des ouvrages, les risques de dégradations. Mais il se trouve que maintenant la durabilité peut être approchée par une autre voie que celle de la prescription que privilégient les normes. Cette voie est celle de l'approche performantielle.

Parlez-nous un peu de cette approche…

A mon sens, l'approche performantielle représente l'un des progrès les plus importants de la dernière décennie**.** Elle est le résultat du travail d'un groupe AFGC rassemblant des laboratoires (dont le Lerm) et des industriels, sous la direction de Véronique Baroghel-Bouny, publié en juillet 2004.

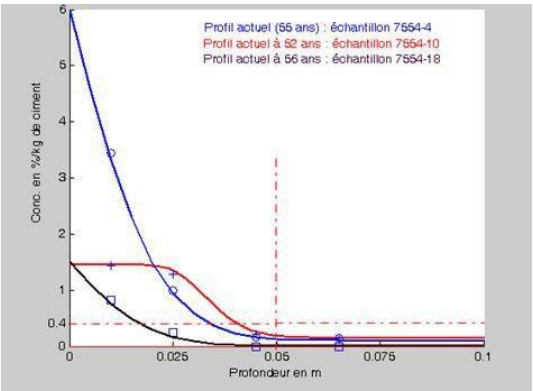
La démarche performantielle est issue de l'ensemble de ces travaux. Il s'agit une démarche globale qui prend en compte l'ensemble des données techniques et économiques propres à chaque ouvrage. A l'obligation de moyens prescrits par les normes, se substitue une obligation de résultat en laissant une latitude plus grande au constructeur dans le choix des matériaux et des formulations de béton.

« Notons que l'originalité des approches performantielles, qui sont, je le souligne, plurielles, est sous tendue et légitimée par les travaux menés, au cours de ces

années, par les laboratoires pour proposer des méthodologies et des critères fiables.

»

Cette démarche émerge parallèlement au cadre prescriptif qui satisfait à la majorité des ouvrages courants prévus pour une durée de vie de 50 ans, mais bride plus ou moins les constructeurs. Du fait des durées de vie contractuelles requises de plus en plus longues, de la nécessité économique d'adaptation aux contraintes locales (choix des ciments, des granulats par exemple), du fait également de la possibilité d'intégration de démarches et matériaux innovants et parce que les réponses économiques et techniques à apporter aux exigences du développement durable ne sont pas univoques, il est peut être techniquement et économiquement avantageux de déroger à la norme à la condition de garantir le résultat visé en terme de durabilité et de durée de vie.



Courbes de vieillissement d'un béton – Lerm

Notons que l'originalité des approches performantielles, qui sont, je le souligne, plurielles, est sous tendue et légitimée par les travaux menés, au cours de ces années, par les laboratoires pour proposer des méthodologies et des critères fiables. Nous avons déjà évoqué dans cet entretien, le formidable travail collectif qui a débouché sur la publication de nombreux documents (normes, recommandations …) qui sont autant d'étapes dans la venue à maturité de l'approche performantielle.

A côté des données liées à la formulation des bétons que prescrivent les normes, l'approche performantielle privilégie certaines caractéristiques du matériau qui permettent de prévoir son évolution en fonction de l'environnement dans lequel il sera placé. La démarche repose sur l'utilisation d'indicateurs de durabilité en association avec des essais de performance qui vérifient la pertinence des indicateurs choisis. Ces indicateurs sont des paramètres fondamentaux dans l'évaluation de la durée de vie du béton : il y a d'une part des indicateurs généraux valables dans tous les cas (porosité, coefficient de diffusion, perméabilité, teneur en hydroxyde de calcium) et d'autre part indicateurs spécifiques d'une réaction donnée (alcaliréaction ou corrosion des armatures par exemple). Des valeurs limites issues de l'expérience et dépendant de la durée de vie prescrite, leur sont attribuées.

Essai de perméabilité à l'oxygène d'un béton, Lerm 2013

De leur côté les essais de performance permettent de simuler en les amplifiant ou en les accélérant les agressions physico-chimiques auxquelles le béton de l'ouvrage sera soumis et vérifient la conformité des indicateurs de durabilité mesurés sur le béton avec les valeurs fixées pour une durée de vie et une catégorie d'ouvrage données.

L'approche performantielle revient dans les clous de la norme, si j'ose dire, par l'approche comparative dans laquelle on teste deux formulations de bétons dont l'une respecte les prescriptions normatives. La seconde, issue de l'approche performantielle, doit avoir des performances au moins équivalente à celles d'un béton de référence formulé suivant les prescriptions de la norme NF EN 206-1.

C'est le concept de *performance équivalente* du béton qu'on trouve dans cette même norme qui fait donc une part aux méthodes de conception performantielles.

Pour finir sur cette question de l'approche performantielle, je doit préciser qu'elle doit être associée à la mise en œuvre de modèles prédictifs de durée de vie déjà évoqués : pour chaque classe d'exposition, on associe des valeurs seuils aux critères de durabilité. Ce qui est aussi intéressant c'est que, a posteriori, le suivi in situ des ouvrages permet de recalibrer et donc d'affiner et de fiabiliser les modèles.

« L'approche performantielle revient dans les clous de la norme, si j'ose dire, par l'approche comparative dans laquelle on teste deux formulations de bétons dont l'une respecte les prescriptions normatives. La seconde, issue de l'approche performantielle, doit avoir des performances au moins équivalente à celles d'un béton de référence formulé suivant les prescriptions de la norme NF EN 206-1. »

Quelles sont aujourd'hui, selon-vous, les voies de progrès de la durabilité des bétons ?

Si, comme nous l'avons déjà dit, les conditions sont réunies aujourd'hui pour obtenir des ouvrages généralement durables pour des durées de vie et des usages courants, les progrès, cependant, restent toujours nécessaires, car plus les ouvrages sont durables et moins ils sont couteux économiquement et du point de vue environnemental.

Les voies du progrès passent, selon moi, par une connaissance toujours plus fine des mécanismes de base, je pense notamment à l'hydratation. Des recherches fondamentales sont en cours par exemple sur l'origine

des forces de cohésion à l'origine des propriétés mécaniques du béton. On s'aperçoit que ce matériau utilisable par tout un chacun, souvent mal employé et décrié est en fait un matériau noble : une pierre que l'on peut mouler, qui durcit spontanément et permet toutes les fantaisies architecturales ! Qui dit mieux ? Avec les nouveaux bétons dont nous avons dit un mot, on voit que ce matériau n'a pas dit son dernier mot et qu'il possède encore une grosse marge de progression.

En attendant on continue de construire et il est important de poursuivre les recherches et de compléter les énormes progrès réalisés depuis les 25 années écoulées :

- Poursuivre la recherche fondamentale
- Préciser encore les mécanismes d'agression afin de mieux les maîtriser
- En relation avec les nouvelles connaissances acquises, affiner les modèles qui permettent de prédire l'évolution des bétons et d'améliorer leur gestion. Dans ce domaine, le passage de l'échelle microscopique à laquelle les réactions chimiques se produisent, à l'échelle du matériau puis de la structure, est une tache assez difficile, bien qu'il existe déjà dans ce domaine des propositions intéressantes. Je pense pour ma part que ce type de modélisation « holistique » peut constituer un thème d'avenir pour le LERM.
- Le suivi temporel des grands ouvrages, à l'instar de ce que fait le LERM à propos du pont sur le Tage à Lisbonne, conduira à la constitution de bases de données qui permettront de valider et d'affiner les seuils retenus et pour les indicateurs de durabilité et pour les essais de performance.
- Le domaine des réparations des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne (alcali-réaction, formation différée d'ettringite) reste également à explorer
- Enfin, certains domaines de l'activité humaine, et je pense ici, au stockage des déchets radioactifs, réclament, quant à elles, des durabilités à très long terme qui nécessitent sans doute encore bien du travail tant sur le matériau lui-même que sur la maîtrise de son environnement.
- La durabilité des bétons reste donc une question ouverte qui mérite que de jeunes chercheurs s'y engagent… durablement.

La durabilité des bétons reste donc une question ouverte qui mérite que de jeunes chercheurs s'y engagent… durablement.

Propos recueillis par Philippe Souchu, documentaliste au Centre de documentation du Lerm. Juin 2013.

La durabilité à très long terme des bétons : entre utopie et nécessité…

27 avril 2009

Carte blanche à Bernard Thuret

Bernard Thuret, physico-chimiste, est l'un des fondateurs du LERM.

LERM

Dans notre précédente lettre d'information, nous avons souligné que, dans le cadre d'une problématique de développement durable, l'atout majeur du béton était sa durabilité en tant que matériau… On construit aujourd'hui des ouvrages dont la durée de service spécifiée est de 120, voire 150 ans. Indépendamment de la fonctionnalité de la structure dans laquelle il est mis en œuvre, quelle peut-être la durée de vie du matériau béton ? Et quelles sont les étapes majeures de sa dégradation ?

Bernard Thuret

Votre question distingue implicitement la durabilité du matériau de celle de la structure dans laquelle il est engagé. Les caractéristiques de structure ont été déterminées par une fonctionnalité attendue et c'est la satisfaction de cette attente qui prévaut dans la majeure partie des cas comme critère d'appréciation de la durabilité d'un « ouvrage béton ».

Cependant vous avez raison : le matériau survit à l'ouvrage mais désormais son observation devient problématique et il faut bien reconnaître qu'elle perd de son intérêt. Il n'est donc pas surprenant que les caractéristiques de cette période de survie du béton soient moins bien connues que celles de sa période »d'activité » mais cette connaissance reste essentielle si l'on s'intéresse aux interactions physicochimiques du matériau avec l'environnement et aux échanges qui les accompagnent.

Le problème du stockage des déchets nucléaires a depuis plus d'une vingtaine d'années mobilisé la recherche pour la connaissance du comportement jusqu'à très long terme du béton et le LERM a contribué, depuis sa création et même avant pour certains de ses membres, aux nombreuses réflexions que cela a suscité.

C'est ce domaine que je vous propose de privilégier maintenant, domaine où l'on dispose délibérément la structure en béton autant que faire se peut à l'abri des contraintes mécaniques et des agressions chimiques de l'environnement… mais sans oublier, néanmoins, les accidents géologiques, ou d'origine humaine exceptionnels.

Le champ des applications de ces recherches qui, du point de vue temporel, se chiffre en centaines de milliers d'années n'est d'ailleurs pas forcément limité au stockage des déchets nucléaires.

crédit CEA

LERM

On emploie le terme de durée de vie d'un béton. Quelles sont les dynamiques observées de son vieillissement au cours de sa vie ?

Bernard Thuret

Vaste question dont la deuxième partie m'invite à revenir sur le cours complet de la « vie du matériau » et d'en distinguer des étapes.

Tout d'abord la notion de vie (»propriété essentielle des êtres organisés qui évoluent de la naissance à la mort en remplissant des fonctions qui leur sont communes » dixit Robert) nécessite d'être précisée par qui l'emploie s'agissant d'un matériau.

L'instant de l'issue de la bétonnière servira de date de naissance du béton et je dirais que sa vie est l'histoire de toutes ses transformations ultérieures ou, si vous voulez, les dynamiques observées de son vieillissement.

Ces transformations sont induites par deux types d'agressions bien distinctes : les contraintes mécaniques et les altérations chimiques d'origine endogène ou exogène essentiellement les fluides, gaz et eaux pour ces dernières. Tous les types d'agression sont simultanés et agissent en synergie : les fissures et microfissures, écaillages, induits par les contraintes mécaniques, directes ou indirectes (variations climatiques) accroissent considérablement la perméabilité et les phénomènes de transport et de dissolution précipitations qui facilitent à leur tour les processus de dégradation d'origine mécanique. Permettez moi de ne pas insister sur les facteurs de vieillissements qui se produisent durant la période »adulte » des ouvrages où ils remplissent des fonctions classiques généralement prévues pour une durée de l'ordre d'une centaine d'années. Cette question a été fréquemment traitée dans le cadre de cette lettre d'information.

Pour distinguer des étapes dans le cursus de »la vie du matériau », j'aurais la double audace de recourir à la comparaison convenue, mais difficilement contournable des périodes de certains êtres vivants…que nous devrions bien connaître, et à Monsieur Jourdain… et la réponse est :

Premier âge : la tendre enfance douée de maniabilité

Deuxième âge : celui de l'acquisition des forces

Troisième âge : l'âge adulte de l'accomplissement correcte des fonctions

Quatrième âge : la suite : une activité spécifique avec des moyens spécifiques tenant compte d'aptitudes modifiées par l'usage et l'usure du temps. Période qui précède un grand saut dans l'inconnu. Inconnu sur lequel un individu privilégié (ou protégé) aura le loisir de méditer quelques temps…. avant d'entrevoir l'éternité…qui nous ramène presque à nos moutons de la durabilité à très long terme.

Toutes ces plaisanteries ne sont peut-être pas dignes du bon goût légendaire du LERM !

L'instant de l'issue de la bétonnière servira de date de naissance du béton

LERM

Pour poursuivre dans la plaisanterie, qu'est ce que, *in fine*, définirait la mort d'un béton ?

Bernard Thuret

Ah bien joué ! Vous avez bien observé que je me suis bien gardé d'essayer de parler de mort d'un béton. Je persiste et signe, pourquoi ?

Vais-je publier un acte de décès parce que je ne suis plus capable d'observer le supposé défunt? Pourtant cela me faciliterait bien les choses pour dresser un bilan de sa vie, voire des services rendus.

Les échanges avec l'environnement sont à la fois causes et conséquences de la dégradation du béton. Les fluides, gaz et principalement l'eau, sont les vecteurs de ces échanges, ils ne s'arrêtent jamais. Leur bilan est toujours provisoire et doit mentionner comme tout bilan les dates des deux limites d'observation. Cette dernière remarque ne semble pas toujours aller de soi si l'on examine l'ensemble des opérations de communication des médias concernant la protection de l'environnement.

…Et pour ne pas rester sans voix face à votre question, je dirais que, même si je m'en sentais capable, je m'interdirais de répondre !

Je ne manifesterais pas la même attitude concernant un ouvrage. Dans le cas du génie civil, si l'ouvrage n'est plus apte à la fonction qui lui est assignée, il est déclassé. Mais, plus généralement, on pourrait considérer comme défunte une structure qui ne serait plus identifiable par les procédés de l'analyse immédiate tout en considérant que ses constituants matériels continuent d'échanger avec l'environnement et ce faisant, je leur reconnaitrais une vitalité d'un caractère nouveau.

Les échanges avec l'environnement sont à la fois causes et conséquences de la dégradation du béton

LERM

Quelles sont les propriétés du béton qui l'ont amené à être utilisé comme enveloppe de colis de déchets ou comme stabilisant de polluants.

Bernard Thuret

Nous rejoignons ici l'aspect multiforme de la vie du béton. Depuis le coulis du premier âge qui autorise l'enrobage des déchets solides, aussi bien que la stabilisation mécanique des boues, jusqu'à la mise en place en enceinte solide en profitant de la propriété tout a fait exceptionnelle que possèdent les bétons et mortiers de passer à l'état durci en conservant une stabilité remarquable de volume apparent (sous réserve d'évitement de sa dessiccation) qui réduit ainsi les risques de contraintes mécaniques contenu/contenant. Si l'on tient compte, en outre, de la réserve alcaline importante assurée par les pâtes de ciments Portland qui permet la précipitation de nombreux sels polluants (nombre de métaux lourds, Pb et autres) ce sont ces propriétés réunies qui autorisent la réalisation de colis adaptés à différents types de déchets complexes.
Il faut bien reconnaître que nous bénéficions d'une conjonction de propriétés quelque peu providentielles si ces dernières sont exploitées à bon escient, c'est-à-dire en résistant aux tentations d'extensions d'exploitations abusives.

LERM

Nous avons vu que les échanges avec l'environnement (gaz, eau) sont des facteurs de dégradation du béton. N'y a-t-il pas un paradoxe à utiliser comme barrière environnementale un matériau, qui, précisément, est… poreux?

Bernard Thuret

S'agissant du béton, l'image de la barrière se rapprocherait beaucoup plus du filtre catalytique ou adsorbant spécifique que de la passoire. La fraction poreuse du volume des bétons : pâte de ciment et interface pâte granulats peut être rendue fort peu perméable (cas extrême des BHP) Il faut avoir présent à l'esprit l'incroyable tortuosité de la structure de la pâte de ciment, un véritable labyrinthe de pores parfois fermés ou communiquant entre eux par des voies étroites de très petites dimensions, voisines de paquets de

quelques centaines de molécules pour les plus petites, d'où l'étendue et l'importance des surfaces des parois des pores.
Pour illustrer ce propos par une image quantifiable, quoique irréaliste : selon un modèle de pores cylindriques, le calcul conduit à la vision du volume d'un seul millilitre de pâte pure de ciment sous l'aspect d'un amas de pores »en vermicelles » de longueur totale s'évaluant en centaine de milliers de kilomètres présentant une surface de parois de plusieurs dizaines de mètres carrés.

Il faut donc tenir compte des phénomènes d'adsorption/désorption, de bouchage/débouchage des pores par condensation/vaporisation d'eau, ce qui doit être rapproché de l'observation selon laquelle la lixiviation n'est pas le facteur primordial de la cinétique de vieillissement, sachant qu'en absence de déplacement des fluides, il y a transports par diffusion en raison de gradients de concentration dans la phase liquide de cet espace.

LERM
L'utilisation environnementale du béton ne nous mène-t-elle pas à des perspectives de durée de vie qui excèdent largement celles des durées de service des ouvrages en béton ?

Bernard Thuret
Merci de recadrer le sujet, c'est bien là où nous voulons en venir. J'oserai répondre par l'affirmative, en tous cas pour la très grande majorité des services attendus de ce matériau dans le présent.
LERM
De quels services s'agit-il ?

Bernard Thuret
Prenons le principal consommateur de béton : le bâtiment. Sa fonction est de rassembler, loger et protéger hommes, animaux et objets. Qualitativement il semble que l'on peut dire que la maîtrise des techniques actuelles permet d'assurer le service attendu pour des durées inégalées dans le passé.
Des exemples, non exemplaires, sont déjà apparus où la vie d'ouvrages a été volontairement abrégée. Ces exemples sont rares, mais ils existent et la décision de destruction ne relevait souvent pas d'un seul souci technique lié à la durabilité du matériau béton.

Par ailleurs des matériaux durables ont été employés pour les possibilités architecturales qu'autorisaient leurs performances mécaniques, mais pas forcément pour les performances en matière de durabilité qui les accompagnent.
Autres raisons : coût, esthétique, interrogation sur les politiques d'urbanisation, menaces de nouvelles contraintes climatiques, éventualités de nécessité de transferts massifs de populations et émergence de futures contraintes encore insoupçonnées font apparaître que le souhait de pérennité peut avoir des limites dans le domaine de l'habitat, et même présenter des inconvénients.

Revenant aux exigences de durabilité à très long terme (centaines de milliers d'années) objectivement quantifiables (période de décroissance radioactive) dans le domaine du confinement des matériaux nucléaires, l'obligation de tenir compte de risques considérés comme peu probables à l'échelle de temps d'un nombre même considérable de générations humaines, conduit à la nécessité de prise en compte de la notion de gestion du risque.

Dans ces domaines, les institutions assurées de leur pérennité comme celles du nucléaire, apparaissent comme privilégiées pour développer une stratégie à long terme et imposer des solutions irréversibles, qui s'opposent aux conceptions de développement durable et de recyclage. Face à ces motifs d'incertitudes dont la liste précédente est loin d'être exhaustive, l'indécision et le temps peuvent apparaître comme une ressource d'action pour étudier et dégager des solutions nouvelles et permettre aux politiques de reprendre la main aux experts.

Les prises de conscience qui sont nées de ces préoccupations actuelles et durables conduisent naturellement les experts et chercheurs conscients de leur limite à faire appel à des collectifs interdisciplinaires.

Des exemples, non exemplaires, sont déjà apparus où

la vie d'ouvrages a été volontairement abrégée

LERM

Les demandes de durabilité extrêmes serait donc selon vous limitées à des domaines spécialisés tels que confinement des toxiques ou autres à intérêt prospectif ?

Bernard Thuret

Oui c'est un peu ce que je pense, car je n'imagine pas que l'on pourrait exiger de telles performances de durabilité pour des raisons autres que de protection de dangers particulièrement graves et…durables, précisément.

Ceci induit que les performances recherchées ne pourraient être réalisées que dans des zones géographiques à la fois à l'abri de menaces catastrophiques et classiques et les réalisations implantées dans des lieux éloignés de zones habitées.

Pourtant les progrès réalisés peuvent aussi conduire à des résultats différents des situations envisagées quelques instants plus tôt. Ce sera le cas par exemple si l'on cherche à utiliser à plein l'amélioration des autres performances qui accompagnent celle de la durabilité dans des réalisations audacieuses d'utilisations classiques du BTP et qui auraient pour conséquence d'admettre que le matériau puisse être soumis à des conditions de contraintes ou environnementales d'autant plus sévères.

Au total on perçoit que le champ des problèmes à résoudre risque de ne pas se rétrécir au contraire… Mais ce qui apparaît certain, c'est que la recherche des solutions exigera de balayer un champ d'investigation qualitativement beaucoup plus large et aussi d'envisager pour les très long termes des ordres non classiques de succession de phénomènes et l'émergence de contraintes physico-chimiques supplémentaires ignorées jusqu'alors.

A titre d'exemple caricatural, et dans le domaine du comportement dans le quatrième âge du béton, la prévision des effets délétères de l'alcali-réaction devrait, compte tenu de la modification de l'échelle des temps considérée, envisager la possibilité que les granulats siliceux potentiellement réactifs finissent par manifester cette potentialité, et peut être aussi l'ensemble des granulats siliceux. Dans ce cas la lixiviation des alcalins pourrait avoir éliminé un des réactifs de cette réaction avant que ne se produise cette éventualité. Il faudrait alors s'interroger sur la possibilité de substitution d'une réaction calco-hydroxylique à l'alcali-réaction.

LERM
Avons-nous les moyens méthodologiques et techniques de nous situer dans de telles perspectives de temps?

Bernard Thuret
L'exercice de prévision de la durée d'utilisation satisfaisante d'un matériau présente bien des analogies avec l'estimation de l'espérance de vie d'un être humain. Pour ce faire les statisticiens distinguent des catégories socio-professionnelles, tiennent compte des antécédents, des conditions de vie, de leur environnement climatique et sanitaire et de bien d'autres informations. C'est bien à partir d'une analyse de données expérimentales accumulées dans le temps qu'ils peuvent apporter des réponses diversifiées et pertinentes.
On distingue deux catégories d'informations, celles qui caractérisent l'individu et celles qui caractérisent son environnement au sens large.
Pour un matériau, il est clair que la validité de la prédiction de sa durée probable d'utilisation sera à la mesure de la valeur du stock de données semblables acquises dans le passé et dont le résultat est connu.
Compte tenu

- de l'expérience acquise sur les pathologies de bétons divers et bien identifiés,
- des progrès de modélisations validées par observation d'analogues anciens ou archéologiques
- des performances de l'instrumentation pour l'observation micro et son interprétation en termes de propriétés macroscopiques
- de l'état des connaissances sur les mécanismes de vieillissement du béton dans des structures actuelles fortement altérées,
- et aussi des progrès dans la composition et la mise en œuvre des bétons actuels…

Je pense que l'on peut répondre affirmativement à votre question sans trop de risques… en limitant la portée à 2 à 4 fois les limites actuelles. Soit 400 ans ?…

A l'autre extrémité des ambitions envisagées (les centaines de milliers d'années), nous entrons dans un tout autre domaine ou il faudrait être en mesure de considérer comme normalement prévisibles des phénomènes classés comme improbables dans le présent.

Le problème de la conception et de la réalisation d'un matériau satisfaisant à base d'une formulation spécialisée ne me parait pas hors de portée, compte tenu des perspectives offertes par les bétons surdosés très compacts développés actuellement même si l'expérience de leur vieillissement fait encore défaut. Des points faibles comme leur susceptibilité à la microfissuration peuvent se révéler dans l'avenir, mais ils possèdent sans doute des capacités d'autoréparation compensatrices. Le problème me semble plutôt résider ailleurs : la mise en place en environnement lui-même protecteur indispensable pour rendre effective la durabilité potentielle du matériau, ce qui revient à dire que le questionnement me semble se situer au niveau de la réalisation et aussi de la conception de la barrière ouvragée.
Nous avons vu que des communautés interdisciplinaires cherchent à se doter des moyens de faire avancer cette problématique, polluée par cette interrogation essentielle complémentaire : peut on confiner une menace déjà dispersée ou diffuse par nature ?

Quelques lectures complémentaires

La Durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, sous la direction de Jean-Pierre Ollivier et Angélique Vichot. Presses de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées. 2008.
Progression dans les connaissances sur les phénomènes d'alcali-réaction. Etat des connaissances sur les mécanismes physico-chimiques d'alcali-réaction à travers les derniers colloques, congrès et publications. Journée d'étude AFPC-ITBTP, 6 octobre 1992 H.HORNAIN
Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties Cement and Concrete Research, vol. 27, n°4, pp. 539 – 550 (1997). - C.CARDE, R. FRANCOIS
Durabilité des bétons. Les analogues anciens et l'analyse inverse
Journées Scientifiques et Techniques Mécaniques & Matériaux, « Durabilité des Matériaux de Structures », 3 et 4 nov. 1997, Nabeul, Tunisie
Les analogues anciens et l'analyse inverse pour la durabilité des bétons
Revue Française de Génie Civil, vol. 2, n°3, pp. 341 – 352. - JP. BOURNAZEL, F. BOUTIN, N. RAFAÏ (1998)
Le Pouvoir d'indécision. La mise en politique des déchets nucléaires. Yannick Barthe. Paris, Economica, 2006.
Et la conférence RILEM : *Long Term Performance of Cementitious Barriers and Reinforced Concrete in Nuclear Power Plants and Waste Management*
30 mars – 2 avril 2009, Cadarache

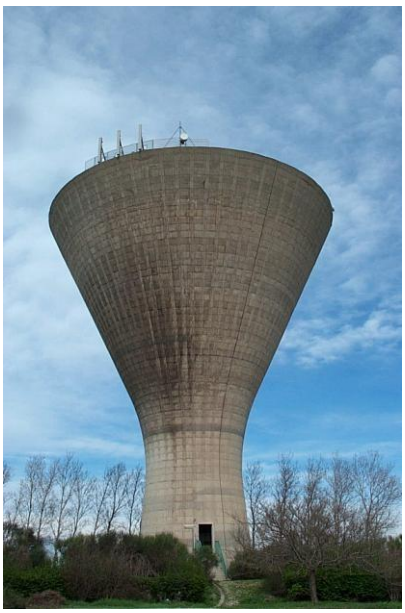
L’approche performantielle de la durabilité des bétons

26 mai 2014

La revue, ci-dessus, des différentes pathologies dont est susceptible de souffrir le béton donne la mesure de l’ensemble des paramètres qui doivent concourir à la durabilité de ce matériau. Comme la maîtrise de la durée de vie des ouvrages de génie civil est un enjeu important tant du point de vue économique qu’environnemental, l’exigence de durabilité, pour les ouvrages exceptionnels, s’est appuyée depuis une quinzaine d’années sur une conception des ouvrages visant une durée de vie définie contractuellement. Le concept de durabilité s’est donc placé au cœur de la démarche de conception, ce qui a amené le développement d’approches performantielles de la durabilité du béton. L’expérience et le recul acquis en ce domaine permettent d’envisager une évolution de la normalisation qui intègrerait plus étroitement l’approche prescriptive et l’approche performantielle pour la formulation de bétons bien adaptés à leur environnement et dont l’impact environnemental serait plus finement maîtrisé. Pour mieux comprendre cette nouvelle perspective normative, dont **le projet national Perfdub qui fait suite au projet APPLET (voir notre encadré plus bas) et qui actuellement en cours de montage** est actuellement porteur, nous nous proposons ici d’explorer ce que l’on entend aujourd’hui par approche performantielle.

Vieillissement et pathologies du béton

L’expression « *c’est du béton* » consacre la réputation de durabilité de ce matériau, durabilité dont de nombreux ouvrages, même antiques comme le Panthéon de Rome, témoignent. Mais un béton n’est durable qu’au regard de son environnement et de l’usage auquel il est destiné.



Dans les faits, dès qu'un ouvrage est mis en service, son vieillissement commence et il est donc susceptible de dégradations diverses, provoquées par des causes physiques, mécaniques ou chimiques. Les causes mécaniques sont les chargements et les chocs. Les causes physiques sont les températures extrêmes, qu'il s'agisse du chaud ou du froid. Les causes chimiques, les plus importantes, sont liées à l'environnement de l'ouvrage. En effet, l'air, l'eau et le sol favorisent la migration d'agents, qui, compte tenu de la nature poreuse du béton, vont modifier la composition chimique de sa solution interstitielle et sont susceptibles de réagir avec sa matrice liante.
Ces réactions chimiques internes vont provoquer soit une dissolution soit des gonflements du matériau. La dégradation chimique est-elle-même accélérée par les deux autres causes, mécaniques et physiques, dont les effets (fissuration, porosité, état de surface dégradé…) favorisent les transports des agents délétères au sein du béton.
L'évaluation prospective de la durabilité du béton au cours du temps implique donc de coupler la connaissance de l'évolution de ses performances à long terme avec l'impact de son environnement sur le matériau et sur ses performances.

Dans cette perspective, les données de l'auscultation in situ de l'ouvrage doivent permettre l'adaptation progressive des modèles d'évolution de la dégradation.

La durabilité du béton et l'approche prescriptive
Compte tenu de l'importance de l'environnement de l'ouvrage au regard de la possible altération chimique du matériau cimentaire, la norme NF EN 206-1 définit des classes d'exposition qui correspondent à des risques auxquels tout ou partie de la structure seront exposées. Ces classes sont au nombre de 6 :

X0 aucun risque

XC corrosion induite par carbonatation

XD corrosion induite par des chlorures autres que marins

XS corrosion induite par des chlorures provenant de l'eau de mer

XF gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage

XA attaque chimique

Ces classes sont elles-mêmes subdivisées en fonction de l'agressivité des conditions environnementales.

C'est à partir de ces classes d'expositions que la norme prescrit, en s'appuyant sur l'expérience acquise, les moyens de la durabilité attendue : il s'agit d'appliquer des valeurs limites aux paramètres de formulation du béton (rapport eau/ciment, teneur en liant, teneur en air entraîné, additions/ciment).

Rappel des textes sur la durabilité des ouvrages

NF EN 206-1, 2004. + Complément national de 2012. *Béton. Partie 1 : spécification, performances, production et conformité*
NF EN 1992-1-1, 2005. *Eurocode 2. Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*
NF EN 13670, 2013. *Exécution des structures en béton*
FD P 18-011, 2009. *Bétons. Définition et classification des environnements chimiquement agressifs – Recommandations pour la formulation des bétons*
Fascicule 65A du CCTG, SETRA, 2008

Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction, LCPC 1994

Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, LCPC, 2003

Recommandations pour la prévention des désordres dûs à la réaction sulfatique interne, LCPC 2007

Les normes des produits en béton préfabriqués de structure suivent la norme NF EN 13369, 2013 : *Produits préfabriqués en béton. Règles communes pour les produits préfabriqués en béton*, qui, pour ce qui concerne la durabilité, reprend les exigences des normes NF EN 206-1 et 1992-1-1

Les approches performantielles de la durabilité du béton

A côté de la prescription normative que nous venons d'envisager, se sont développées, principalement pour des ouvrages à la durée de vie exceptionnelle ou soumis à des contraintes environnementales particulières, des approches dites performantielles. Plutôt que l'obligation de moyens en termes de formulation, ces approches visent directement les résultats en termes de performance de durabilité. Cette démarche, qui autorise des formulations spécifiques, permet également de formuler des bétons à l'impact environnemental diminué.

NF EN 206-1
avril 2004
Indice de classement : P 18-325-1
ICS : 91.080.40 ; 91.100.30

Béton

Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité

E : Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity
D : Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

Approche comparative

La norme NF EN 206-1 fait place à la démarche performantielle dans le cadre de l'approche dite comparative. Un béton, pour être qualifié, doit présenter des performances comparables à celles d'un béton de référence, lui-même conforme aux tableaux NA.F.1 ou NA.F.2 de la norme la norme NF EN 206-1 pour une classe d'exposition donnée : (paragraphe 5.2.5.3 de la norme, *Concept de performance équivalente du béton) « il doit être prouvé que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa durabilité, conformément aux exigences pour la classe d'exposition considérée. »* Ce concept de *performance équivalente du béton* permet donc de s'affranchir des prescriptions normatives du béton à la condition de montrer par des essais performantiels et des indicateurs de durabilité que les perfomances atteintes du béton sont équivalentes à celle d'un béton à la formulation prescrite par la norme. L'annexe E de la norme NF EN 206-1 donne les principes d'évaluation du concept de performance équivalente.

Notons que, pour faciliter cette approche, autorisée mais non explicitée par la norme, le FNTP a publié, en 2009, des recommandations professionnelles provisoires : *Méthodologie d'application du concept de perfomance équivalente des bétons*. Les essais perfomantiels et les indicateurs de durabilité y sont spécifiés. Les exigences de composition du béton de référence y sont durcies par rapport aux prescriptions de la norme au regard de deux critères : le rapport eau/ciment maximal est diminué de 0,05% et le dosage minimal en liant est augmenté de 5%.

Méthode de conception performantielle

Cette approche est également prévue par la norme NF EN 206-1 (paragraphe 5.3.3) *: « Les exigences relatives aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant les méthodes de conception performantielles pour la durabilité et elles peuvent être établies en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage dans un essai de gel-dégel. L'Annexe J (informative) de la présente norme donne des conseils relatifs à l'utilisation d'une autre méthode de conception en fonction des performances pour la durabilité. »*

Il est spécifié dans cette Annexe J que cette variante *« considère quantitativement chacun des mécanismes de détérioration, la durée de vie de l'élément ou de la structure, et les critères qui définissent la fin de cette durée de vie. Cette méthode peut se baser sur une expérience satisfaisante avec des pratiques locales dans des environnements locaux, sur des données recueillies à partir d'une méthode d'essai de performance établie pour le mécanisme étudié, ou sur l'utilisation de modèles prédictifs éprouvés. »*

Cette méthode de conception a fait l'objet de recommandations provisoires en 2010 par le LCPC : *Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'arts en béton. Application de l'approche performantielle*. Voici les indicateurs de durabilité qui y sont recommandés :

Corrosion des armatures

Au regard du risque de corrosion des armatures, les indicateurs de durabilité retenus par les recommandations du LCPC sont :

- la porosité accessible à l'eau (P_{eau}),
- la perméabilité au gaz (K_{gaz}),
- le coefficient de diffusion des chlorures (D_{app}), indicateurs auxquels s'ajoute, en complément, dans la perspective des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle, la mesure de la résistivité électrique (ρ).

Le point sur les essais normalisés

- Les essais de perméabilité aux gaz et de porosité accessibles à l'eau font l'objet des normes françaises XP P 18-463 et NF P 18-459 mais ces normes ne sont pas harmonisées au niveau européen.La diffusion des ions chlorures fait l'objet de deux normes françaises qui sont expérimentales :
  - la norme XP P 18-461 (Essai accéléré de migration des ions chlorures en régime stationnaire – Détermination du coefficient de diffusion effectif des ions chlorure) ○ et la norme XP P 18-462 (Essai accéléré de migration des ions chlorures en régime non stationnaire – Détermination du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure)

Enfin la mesure de résistivité électrique ne fait l'objet d'aucune norme, mais il existe un mode opératoire LCPC.

Alcali-Réaction

Au regard du risque d'alcali-réaction, les indicateurs de durabilité retenus sont :

- le bilan en alcalins équivalents de la formule ([Na_2Oeq]),
- la déformation de gonflement d'éprouvettes de béton évaluée selon l'essai de performance NF P18-454 (Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Essai de performance).

Réaction sulfatique interne

Au regard du risque de réaction sulfatique interne, les indicateurs de durabilité concernant les pièces critiques de l'ouvrage sont :

- la température maximale atteinte au coeur de la partie d'ouvrage (Tmax),

- la déformation de gonflement d'éprouvettes évaluée selon l'essai de performance défini par la méthode LPC n° 66.

Risques liés au gel

Au regard du risque lié aux effets du gel, les paramètres de durabilité à considérer sont à choisir parmi les suivants :

- le facteur d'espacement du réseau de bulles d'air (L_{bar}),
- la teneur en air occlus (t_{air}) sur béton frais,
- l'écaillage (Ec), (mesure de la masse écaillée sous cycle agressif),
- l'essai de performance vis-à-vis du gel interne ($\Delta\varepsilon$), mesure de l'allongement en liaison avec la mesure des fréquences de résonance ($f^2/f0^2$),
- la résistance à la compression à 28 jours (fc28).

La conception performantielle est complétée par des épreuves de convenance et de contrôle en phase de chantier, puis, à partir de la réception de l'ouvrage qui définit *le point zéro durabilité* de l'ouvrage, le suivi de durabilité du béton s'effectue à partir de l'évaluation de témoins de durée de vie extraits de chaque partie de l'ouvrage. Ces témoins de durée de vie sont évalués à partir d'essais réalisés *in situ* ou en laboratoire sur des échantillons prélevés.

Recommandations du projet ANR-APPLET (2012) concernant l'approche performantielle

Outre les propositions faites sur les modes opératoires, les recommandations 2012 du projet ANR-APPLET portent sur :

L'intérêt des **mesures de la résistivité électrique** du béton pour le suivi de la variabilité des propriétés de durabilité d'un béton

L'intérêt pour l'utilisation des indicateurs de durabilité d'aller vers une prise en compte des **aspects statistiques**, comme c'est le cas aujourd'hui pour les résistances mécaniques

La nécessité d'intégrer dans l'application de l'approche performantielle les **aspects probabilistes** pour prendre en compte la variabilité des gâchées qu'on retrouve au chantier, comme au laboratoire.

Enfin le projet propose une a**nalyse du choix du béton de référence**, choix particulièrement important dans le cadre de l'approche comparative.

Bibliographie

Norme NF EN 206-1, 2004. Béton -Partie 1 : spécification, performances, production et conformité

Méthodologie d'application du concept de perfomance équivalente des bétons : Recommandations professionnelles provisoires / Rozière, Emmanuel, Auteur; Cussigh, F., Auteur. - Fédération Nationale des Travaux Publics, 2009.

Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton. Application de l'approche performantielle. - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 2010

Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel : Guide technique [document électronique]. - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 2003.

Durée de vie des ouvrages, approche performantielle, prédictive et probabiliste. Recommandations du projet ANR-APPLET . - IFSTTAR, 2012

Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – Etat de l'art. Guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité - Association Française de Génie Civil (AFGC), 2004

Les Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances

25 juin 2013

Entretien avec Jacques Resplendino, Directeur régional Sud-est de SETEC TPI

Avant d'entrer dans l'histoire des BFUP, pouvez-vous nous donner une définition de ce matériau ?

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances sont des bétons dont la résistance caractéristique à la compression est supérieure à 150 MPa et dont la résistance caractéristique en traction directe est supérieure à 7 MPa.

Ces bétons sont additionnés de fibres métalliques, en vue d'obtenir un comportement ductile en compression et en traction et de s'affranchir de l'usage de cages d'armatures passives traditionnelles. Leur composition et leur fort dosage en liant leur procurent une grande compacité qui leur garantit une exceptionnelle durabilité.

Quels sont les principes de base sur lesquels repose la conception des BFUP ?

Les bétons ordinaires présentent un rapport eau sur liant de l'ordre de 0,4 à 0,6. Pour obtenir un béton à haute performance, ce rapport descend en dessous de 0,4. Ce seuil ne peut être atteint que par l'ajout de superplastifiant qui permet la dispersion du liant. Dans ces bétons, on utilise généralement des fumées de silice qui permettent un resserrement du fuseau granulaire.

Pour obtenir un BFUP, on diminue encore le rapport eau sur liant jusqu'à des valeurs inférieures à 0,25 (de l'ordre de 0,16 à 0,2), abaissement obtenu généralement au travers d'une augmentation importante de la quantité de liant. Les fumées de silices ajoutées représentent environ 20% de la masse du ciment. Le béton ainsi obtenu est extrêmement compact ce qui explique sa résistance à la compression et sa remarquable durabilité.

Un soin tout particulier est porté aux granulats dont la taille est très réduite et dont la résistance mécanique doit être élevée pour qu'ils ne soient pas le point faible de la composition.

Le MuCEM. Architecte Rudy Ricciotti

On obtient ainsi des résistances à la compression supérieures à 150 MPa… Mais le matériau a alors un comportement fragile. Pour retrouver de la ductilité à la compression on ajoute des fibres métalliques à un taux de l'ordre de 2 à 3 % du volume qui peut monter jusqu'à 10% en fonction des besoins de performances recherchées en traction pure.

Compte tenu des performances mécaniques des BFUP, les aciers de renfort actifs ou passifs éventuels sont limités aux efforts principaux agissant sur les sections de grande dimension. Comme la conception de

structures en béton sans armatures sort du domaine d'application des règlements de calcul, l'AFGC a rédigé, en 2002, des recommandations qui proposent des règles de calculs spécifiques.
L'amélioration de nos connaissances sur le matériau, les retours d'expériences accumulés, notamment sur les conditions de mise en œuvre, et la nécessité de rendre les principes de dimensionnement compatibles avec l'EUROCODE 2, nous ont amenés à élaborer une mise à jour des recommandations AFGC qui sera diffusée lors du colloque d'octobre 2013 à Marseille.

Vous nous brossez un bref historique des recherches qui amènent aux BFUP ?
C'est dans les années 70 que les recherches sur ce qui allait devenir les BFUP démarrent au Danemark sous la direction du professeur Bache. Elles sont menées dans le cadre de la technologie CRC, plutôt orientée vers la production d'éléments préfabriqués.
En France, les recherches sur les BFUP datent des années 1990. Elles sont menées par Pierre Richard (Groupe Bouygues) dans le cadre de la technologie des Bétons de Poudres Réactives dites BPR. Le concept a été ensuite optimisé au centre de recherche Lafarge de l'Isle- d'Abeau pour aboutir au DUCTAL®, premier BFUP commercialisé.

Première application des BFUP sous formes de poutres dans les corps d'échange des aéroréfrigérants

A la fin des années 90, sous l'impulsion de Gérard Birelli, ingénieur à EDF, les BFUP sortent du laboratoire pour leur première application industrielle sous forme de poutres dans les corps d'échange des aéroréfrigérants des centrales nucléaires de Cattenom et Civaux. Eiffage avec l'aide du cimentier Sika développe un BFUP concurrent du Ductal®, le Ceracem / BSI ®.
Les investigations menées en 2000 et 2008 sur des poutres témoins chargées en flexion dans un aéroréfrigérant de la centrale de Cattenom ont permis de confirmer l'excellente durabilité du BFUP placé dans des conditions extrêmement agressives.
Dans les années 2000, le cimentier Vicat associé au groupe Vinci développe un troisième BFUP : le BCV.

Quelles ont été, ensuite, les réalisations qui ont marqué des étapes dans l'utilisation des BFUP ? En parallèle de cette saga des aéroréfrigérants, le premier ouvrage construit en BFUP sera la passerelle piétons de l'Université de Sherbrooke, en 1997.

Importante sera ensuite la construction des ponts de Bourg-les-Valence, premier pont routier au monde construit en BFUP.

La conception des ces ouvrages s'inscrivait alors dans le cadre de la Charte innovation Ouvrages d'art du SETRA, dont l'objet était de promouvoir l'utilisation de nouvelles techniques ou nouveaux matériaux. Deux ponts innovants ont donc été construits sur la déviation de Bourg-Lès-Valence. Les tabliers étaient constitués de poutres préfabriquées en BFUP. Elles étaient dépourvues d'armatures passives grâce à la prise en compte de la résistance à la traction du matériau fibré.

Ce chantier, par la réalisation des très nombreux essais qui y ont pratiqués, a servi d'expérimentation in situ au groupe de travail BFUP qui a alors pu mettre au point les premières « Recommandations AFGC » de 2002.

Ensuite, l'utilisation des BFUP essaime dans le monde entier pour des réalisations majeures en génie civil. Au Japon, notamment, pour la réalisation de ponts mais aussi, comme à l'aéroport d'Haneda, pour la construction de pistes entières gagnées sur la mer. Leur expérience permet aux Japonais de faire paraitre des recommandations pour la conception et la réalisation d'ouvrages en BFUP dès 2004.

Les BFUP ont été employés pour l'extension des pistes de l'aéroport de Haneda (Japon) sur la mer.

Crédit Google Earth. Tous droits réservés

Aux Etats-Unis, des ponts sont maintenant construits en BFUP et, selon notre ami Benjamin Graybeal, l'administration fédérale (FHWA) a initié des études sur leur emploi dans le développement d'éléments structurels préfabriqués.

En Suisse, à l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), on a plutôt travaillé sur l'usage des BFUP pour la réhabilitation des ouvrages et notamment des ponts : l'idée de base est de renforcer en BFUP, qui combine résistance mécanique et durabilité, les parties exposées à l'environnement agressif et aux chargements mécaniques. L'usage du BFUP en tablier contribue non seulement au renforcement

mécanique, sans surcharger la structure existante, mais encore, du fait de l'absence de retrait, dispense de la pose d'une chape d'étanchéité. L'usage des BFUP pour tout ce qui concerne la réparation et le renforcement des ouvrages existants est d'ailleurs aujourd'hui en pleine expansion.

Notons au passage que la résistance l'abrasion des BFUP trouve une excellente application dans les ouvrages hydrauliques soumis à l'écoulement d'une eau chargée en matériaux abrasifs : canaux, déversoirs…

Soulignons, pour finir, un développement original mené en Australie où l'on a mis à profit les résistances mécaniques des BFUP pour étudier leur résistance aux explosions, aux chocs et aux impacts : ces bétons montrent une remarquable capacité à absorber l'énergie ainsi qu'une bonne résistance à la fragmentation. **A côté du génie civil, l'architecture s'est-elle saisie des opportunités que lui offrent les BFUP ?** Les performances mécaniques tant en compression qu'en traction des BFUP et la suppression des cages d'armatures passives traditionnelles, permettent une libération des formes, une limitation des volumes et un élancement des structures que favorise encore le caractère auto-plaçant du matériau. Les architectes comprennent aujourd'hui à la fois les qualités structurales, esthétiques et durables de ce matériau. La couverture du péage de viaduc de Millau avait ouvert la voie et, pour des réalisations récentes, on peut citer, parmi de nombreuses autres, le MUCEM à Marseille et le stade Jean Bouin à Paris… Dans le domaine de l'architecture ce béton sert également à la décoration et à la réalisation de mobilier urbain.

Après ce regard rétrospectif, pouvez-vous nous offrir quelques perspectives sur les évolutions d'emploi des BFUP ?

Les études continument menées sur les BFUP et les retours, aujourd'hui nombreux, d'expérience, débouchent sur des réflexions au niveau international. Ainsi, un groupe de travail de la *fib* (fédération internationale du béton) constitué de partenaires venant de différents pays dont l'Allemagne, les Pays Bas, la France, le Canada, les Etats Unis et le Japon, a pour objectif de rédiger un additif au Model Code de la *fib* permettant le calcul de structures en BFUP.
Par ailleurs, des réflexions sont en cours au niveau français pour utiliser la matière des nouvelles recommandations AFGC afin de rédiger un corpus de normes permettant de simplifier l'assurabilité des projets de bâtiments réalisés avec ces matériaux.

Muni de ces bases techniques, il revient aux concepteurs d'innover en exploitant les ressources qu'offrent ce matériau (résistances mécaniques, limitation des volumes, liberté des formes, durabilité, faibles effets différés tels que le retrait ou le fluage) pour apporter des réponses novatrices à des problèmes de résistance environnementale, de rapidité d'exécution, d'esthétique architecturale, de gains de matières premières, de renforcement ou de réparation d'ouvrages.

Propos recueillis par Philippe Souchu, documentaliste au Centre de documentation du Lerm. Juin 2013.

Béton et développement durable

26 juin 2013

Entretien avec Patrick Guiraud, Directeur délégué Génie Civil à CIMBETON

Monsieur Guiraud, au cours de ces 25 dernières années, comment l'industrie du ciment et du béton s'est elle inscrite dans la perspective ouverte par le développement durable ? Je crois important de commencer par dire que le Développement Durable n'est pas un concept parmi d'autres, qu'on aurait le loisir de prendre ou de laisser. Si en 1987, date de parution du rapport Bruntland « Our Common Future », l'affirmation selon laquelle le principe du Développement Durable implique la mise en œuvre de politiques économiques, sociales et environnementales qui, coordonnées et intégrées, visent à satisfaire les besoins des populations sans compromettre la satisfaction des besoins des générations à venir, pouvait sembler être une option parmi d'autres, ces dernières années ont montré que le Développement Durable était une impérative nécessité.
L'avenir passe nécessairement par la prise en compte de ces exigences qui sont un moteur considérable d'évolution et d'innovation, et la perspective du Développement Durable, ouverte l'année même de la création du Lerm, est de celles auxquelles on ne peut échapper. Cette prise de conscience est donc, selon moi, un évènement majeur de ce quart de siècle. L'industrie cimentière a, me semble-t-il, travaillé efficacement à relever le défi du Développement Durable sur l'ensemble de ses trois axes que sont l'environnement, l'économique et le social.

« Je crois important de commencer par dire que le Développement Durable n'est pas un concept parmi d'autres, qu'on aurait le loisir de prendre ou de laisser (…) ces dernières années ont montré que le Développement Durable était une impérative nécessité. »

On entre un peu dans le détail de ces axes ?

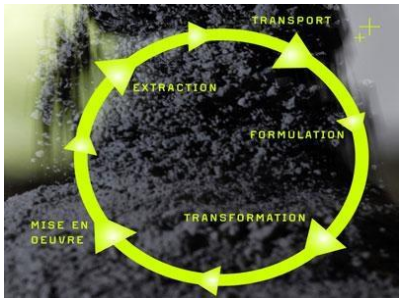
L'axe social est indissociable de l'axe économique : il s'agit de répondre aux besoins humains de logement, de déplacements, de sécurité, de santé, de formation et d'amélioration du cadre de vie en trouvant des solutions solvables. Pour répondre à l'ensemble de ces besoins, l'industrie cimentière a donc globalement travaillé à l'amélioration des modes de construction. Cette amélioration est passée par la mise au point de nouvelles solutions constructives et par l'amélioration de la qualité des bétons, ce qui entraîne l'accroissement de leur durabilité et donc un coût global maîtrisé et plus faible. Du point de vue du cadre de vie, la qualité des matériaux, l'amélioration de leurs performances et de leur potentiel esthétique, la

souplesse de leur emploi ont permis de pleinement les associer à la créativité architecturale. On peut également situer dans cet axe social la sécurité croissante de la mise en œuvre sur les chantiers et la diminution de la pénibilité pour les ouvriers. Les progrès dans ce domaine, permis par les bétons autoplaçants, sont très significatifs.
Enfin, la réponse aux besoins est également passée par un accroissement de la productivité sur les chantiers, qui a été servie en particulier par le développement de la préfabrication et par la possibilité de pompage du béton prêt à l'emploi.

Et pour ce qui concerne l'axe environnemental ?
Pour cet axe, comme pour les précédents d'ailleurs, c'est toute la chaîne de production du matériau qui doit être prise en compte. Disons que, pour ce qui concerne le béton, les efforts ont porté sur plusieurs domaines : l'économie de la ressource en matériaux naturels, la préservation de la biodiversité, la réduction des émissions de gaz à effets de serre et la valorisation de coproduits de l'industrie.

« L'axe social est indissociable de l'axe économique : il s'agit de répondre aux besoins humains de logement, de déplacements, de sécurité, de santé, de formation et d'amélioration du cadre de vie en trouvant des solutions solvables. Pour répondre à l'ensemble de ces besoins, l'industrie cimentière a donc globalement travaillé à l'amélioration des modes de construction. »

On regarde d'un peu plus près ce que vous venez d'énumérer en commençant par le maintien de la biodiversité ?



Oui, je pense là principalement aux carrières. En 25 ans les choses ont beaucoup changé : les carrières ne sont plus des « trous » que l'on rebouche en fin de vie. Elles bénéficient aujourd'hui d'un plan d'exploitation ainsi que d'un plan de réaménagement continu pour préserver leur valeur écologique et anticiper le devenir du site. Ce plan permet, en fin d'exploitation, une réhabilitation souvent remarquable en lacs, zones humides réserves naturelles, refuges de biodiversité…

Des carrières, nous pouvons peut-être passer aux granulats…
En effet… Les granulats sont un composant majeur des bétons et l'économie en ressources naturelles les concerne au premier chef. La substitution par des granulats recyclés voire artificiels permet certes

d'épargner la ressource naturelle et de nombreuses recherches sont encore en cours dans ce domaine. D'un autre côté, il convient également de considérer l'approvisionnement en granulats du point de vue de son impact environnemental ; dans cette perspective, il faut considérer les granulats comme une ressource locale dont l'extraction doit faire l'objet d'une politique cohérente d'aménagement du territoire, afin d'éviter des transports sur de longues distances.

…et pour ce qui concerne la limitation des émissions de gaz à effets de serre ?

C'est la production de ciment qui est globalement émettrice de ces émissions. En moyenne, à l'échelle mondiale, la production d'une tonne de ciment génère l'émission d'une tonne de CO2, du fait d'une part de la décarbonatation du calcaire pendant la phase de pré-calcination, d'autre part de la combustion de combustibles fossiles pour la cuisson du cru.

La réduction de l'émission liée à la cuisson du cru a suivi deux pistes : d'abord celle de l'amélioration de l'efficacité énergétique des fours des cimenteries, ensuite celle de la valorisation énergétique par des combustibles alternatifs (sous produits industriels des filières chimique, pharmaceutique, agricole, automobile, etc…). Cette valorisation, qui permet donc l'économie des ressources fossiles, représente aujourd'hui environ 30% de l'énergie utilisée. La filière cherche à faire passer, dans les années à venir, cette proportion à 50%.

L'autre piste est celle de la valorisation matière dans le ciment lui-même. Le calcaire, mais aussi l'argile, sont en partie substitués, pour la fabrication du cru, par des laitiers, des cendres volantes, des sables de fonderie, des oxydes de fer, des boues d'alumine… Chaque année, ce sont environ 500 000 tonnes de ressources naturelles qui sont ainsi économisées.

Différents co-produits (laitier de haut fourneau, cendres volantes, fumée de silice) peuvent être intégrés dans la composition des ciments pour constituer des ciments de type CEM II, CEM III, CEM IV et CEM V. Le taux de substitution du clinker, fruit de cette valorisation matière, est de l'ordre de 25 à 30%… si bien que le chiffre que j'avançais d'une tonne de CO2 en moyenne pour la production d'une tonne de ciment tombe, en France aujourd'hui, à 600 kg de CO2.

La valorisation concerne également le gypse qui est ajouté au ciment pour en réguler la prise. Le gypse naturel est aujourd'hui largement remplacé par des titanogypses, des désulfogypses ou des résidus de l'industrie du plâtre. Ce n'est pas négligeable, car ce gypse représente aux alentours de 6% du poids du ciment.

« …pour ce qui concerne le béton, les efforts ont porté sur plusieurs domaines : l'économie de la ressource en matériaux naturels, la préservation de la biodiversité, la réduction des émissions de gaz à effets de serre et la valorisation de coproduits de l'industrie. »

Le béton le moins cher, dit-on, c'est celui qu'on ne coule pas… On aborde là directement la question de la durabilité du matériau.

Vous avez raison, la durabilité du matériau et donc de l'ouvrage diminue son coût économique et son impact environnemental si l'on considère l'ensemble du cycle de vie. L'amélioration de la durabilité du béton résulte de la convergence de nombreuses études qui ont été menées sur le matériau lui-même et sur ses composants, ainsi que sur les interactions chimiques avec le milieu environnant.

L'approfondissement de la connaissance de la microstructure de la matrice cimentaire et des ses évolutions physico-chimiques, notamment face aux agressions et aux attaques chimiques, l'exploration de la rhéologie du béton à l'état frais, celle de son comportement à l'état durci, enfin les progrès de l'adjuvantation et l'usage des ultrafines permettent aujourd'hui de prédire la durabilité du béton et de prévoir son évolution au cours du temps.

L'anticipation de la durée de vie de l'ouvrage est d'autant plus importante qu'elle conditionne la stratégie d'entretien et de maintenance de l'ouvrage qui contribuent à la durabilité escomptée. Ces progrès ont été largement relayés par l'évolution du contexte normatif, car les normes de dimensionnement, les Eurocodes par exemple, prennent en compte la durée d'utilisation d'un ouvrage et la norme NF EN 206-1 définit des classes d'exposition en fonction des environnements des ouvrages, et spécifie des formulations de bétons adaptées à l'agressivité de ces environnements.

A côté de cette approche prescriptive, basée sur une obligation de moyens, la norme laisse ouverte la possibilité d'une approche performantielle, fondée sur une obligation de résultats, qui , pour de grands ouvrages, permet des formulations optimales des bétons qui peuvent être source d'économie ou de meilleure adaptation à leur environnement et à leur durée de service.

« Avec l'analyse du cycle de vie des ouvrages, nous avons un outil qui nous permet de comptabiliser l'ensemble des impacts environnementaux d'un ouvrage sur l'ensemble de son cycle de vie. Cet outil, couplé à une estimation du coût global d'une option, permet de comparer diverses solutions entre elles et de faire des choix informés et pertinents. »

L'ensemble des progrès scientifiques et techniques des ces années convergent donc vers une forme de sobriété économique et environnementale des ouvrages ?

Oui, c'est d'ailleurs ce qui montre bien que le Développement Durable n'est pas une exigence qui tombe du ciel, mais la recherche d'un subtil équilibre et le résultat d'une approche rationnelle et pluridisciplinaire des problèmes qui se posent à nous.

Avec l'analyse du cycle de vie des ouvrages, nous avons un outil qui nous permet de comptabiliser l'ensemble des impacts environnementaux d'un ouvrage sur l'ensemble de son cycle de vie. Cet outil, couplé à une estimation du coût global d'une option, permet de comparer diverses solutions entre elles et de faire des choix informés et pertinents.

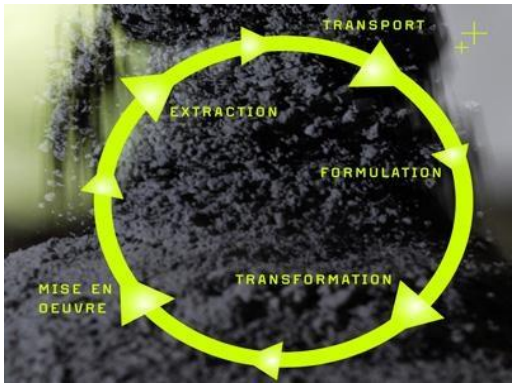
Les exigences du Développement Durable sont donc loin de nous imposer des solutions uniques et toutes faites. Nous avons, en 25 ans, construit des outils de prédiction et d'anticipation et développé des solutions techniques innovantes qui permettent des choix raisonnés, et le Lerm a accompagné cette logique d'innovation et de progrès. Il revient aux ingénieurs, aux concepteurs et aux architectes de trouver le meilleur compromis en arbitrant selon les trois axes, économique, social, environnemental du développement durable, en se souvenant que comme le disait Paul Valéry dès 1931 (!), *le temps du monde fini commence…*

Propos recueillis par Philippe Souchu, documentaliste au Centre de documentation du Lerm. Juin 2013.

Durabilité et recyclabilité du béton ou le cycle bouclé de la vie du béton

23 novembre 2012

Nous avons consacré de nombreux articles à la durabilité… Aussi durable que devienne le matériau, l'existence des ouvrages ou édifices qu'il constitue est régulièrement remise en cause, par les révisions qu'impose la restructuration permanente de l'urbanisme. Pour le béton, il doit donc y avoir une vie après la durabilité. Les évolutions conjointes des connaissances scientifiques, des moyens technologiques, des conceptions durables et de la réglementation ouvrent au béton la possibilité d'entrer, dans un avenir proche dans l'économie dite circulaire.



Enjeux et perspectives du recyclage du béton

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde.. On en produit un peu plus de 20 milliards de tonnes chaque année.

Si son coût financier est bas, son empreinte environnementale est conséquente.

La fabrication du ciment, en effet, représente 5 à 6% de la totalité des émissions de carbone d'origine anthropique dans l'atmosphère. Ainsi, la production d'une tonne de clinker, qui est la matière première du ciment, génère en moyenne une tonne de CO2 : 55% de ce CO2 est produit par la décarbonatation du calcaire, 35% par l'usage de combustibles de cuisson, 10% par l'usage d'électricité.

Enfin, les granulats constitutifs du béton, sont produits soit à partir de dépôts alluvionnaires, soit à partir de roches naturelles concassées. En France, on en consomme 431 millions de tonnes par an, soit 7 tonnes par habitant. Le recyclage du béton est donc un enjeu majeur tant pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre que pour la préservation des ressources naturelles en granulats.

Le béton déconstruit : une ressource abondante qui s'ignore encore largement

Les cimentiers se sont engagés dans la voie de la réduction d'émission du CO2 dans l'atmosphère (voir notre entretien avec Paul Acker). Une voie complémentaire au potentiel très important est celle du recyclage de ce matériau, d'autant plus abondant que, en France, les restructurations urbaines conduisent à la déconstruction du parc immobilier des années 70 constitué de nombreux bâtiments et ouvrages en béton.

En 2008, l'ADEME estimait que la production des déchets inertes du bâtiment s'élevait à 27,7 millions de tonnes dont 14% de bétons et 17.7% de déchets en mélange contenant également du béton [Commissariat Général au Développement durable, Chiffres & statistiques, n°231, Juillet 2011].

De la démolition à la déconstruction

La valorisation des bétons est facilitée par l'émergence, dans les années 2000, du concept de déconstruction sélective qui préconise la mise en place du tri dès le chantier de déconstruction, voir à ce sujet notre entretien avec Benjamin Trinel. Cette pratique est encouragée par l'évolution réglementaire : depuis fin 2011, en effet, le diagnostic déchets avant déconstruction est devenu obligatoire pour les bâtiments d'une surface hors œuvre brute supérieure à 1000 m² ou ayant accueillis certaines activités spécifiques [décret du 31 mai 2011 et l'Arrêté du 19 décembre 2011 relatifs au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition]. Cette règlementation va contribuer à faire évoluer les pratiques et devrait conduire à améliorer le taux de valorisation des déchets de démolition.

On observe déjà que lorsque le béton est trié directement sur le chantier son taux de valorisation est de 77,7% contre seulement 12 % pour les déchets en mélange [Commissariat Général au Développement durable, Chiffres & statistiques, n°164, Octobre 2010].
Les bétons provenant de démolition et déconstruction, lorsqu'ils sont triés, sont considérés comme inertes à l'exclusion de ceux provenant de sites contaminés [Arrêté du 28 octobre 2010]. Comme ils ne sont réutilisables qu'à cette condition, cette étape du tri est essentielle : elle permet la séparation du béton et du plâtre ce qui limite l'apport en sulfates.

Des granulats recyclés aux performances encore insuffisantes

Depuis la fin des années 90, de nombreux travaux portent sur l'amélioration des performances de ces bétons de granulats de bétons recyclés. Mais les techniques actuelles de concassage, peu sélectives, génèrent des granulats composites formés à la fois du granulat naturel d'origine et d'une gangue de mortier.
Leurs propriétés dépendent de la nature des bétons déconstruits, de la qualité du tri et des techniques de traitement utilisées et leur introduction dans la formulation de nouveaux bétons fait apparaitre des problématiques particulières comme notamment une demande en eau élevée ou des résistances mécaniques limitées.

En France, les granulats issus de bétons concassés sont donc majoritairement employés en infrastructure routière : remblais, couches de forme, chaussées réservoir, couches d'assises de chaussée. A la fin des années 70, des chantiers expérimentaux réutilisant des granulats de bétons dans la fabrication de béton de chaussées routières et aéroportuaires ont été réalisés en région Ile-de-France mais ces pratiques se sont peu développées. La normalisation actuelle prévoit néanmoins leur utilisation dans la formulation de nouveaux bétons (NF EN 12620) et différentes expériences se développent dans d'autres pays européens.

Des projets convergents d'amélioration
Le Projet National RECYBETON qui vient de débuter, vise à faire évoluer la qualité des granulats recyclés en apportant des réponses aux questions qui subsistent. Le projet s'intéresse également au recyclage des matériaux hydrauliques issus de la déconstruction des bétons comme matière première dans la production de liants hydrauliques (clinker).

Parallèlement, d'autres travaux de recherche se concentrent sur les techniques de traitement avec pour objectif de séparer les granulats naturels de leur gangue de mortier. C'est le cas du projet ANR COFRAGE. Ce projet s'intéresse aux technologies innovantes de fragmentation du béton, comme la fragilisation par chauffage micro-ondes et l'endommagement par voie électro-hydraulique.
Ces techniques permettraient d'obtenir le granulat naturel d'un côté et le mortier de l'autre probablement sous forme de fines.
Le granulat se recyclerait ainsi très facilement dans un nouveau béton et les fines de mortiers pourraient trouver des voies de valorisation dans la production de ciment. Le recyclage du béton serait alors complet, et le cycle de vie du béton bouclé.

Retour à l'amont des produits de construction et des projets d'ouvrages d'art

Le développement devant être aujourd'hui durable, on s'intéresse désormais aux impacts environnementaux de matériaux de construction au sens large et donc par les produits en béton au cours de leur cycle de vie.
L'analyse de cycle de vie (à laquelle nous avons consacré une précédente Lettre d'information) est une méthode globale et multi-critères qui permet d'évaluer les flux de matières et d'énergies et les impacts environnementaux d'un produit pour chaque étape du cycle de vie (production, mise en œuvre, vie en œuvre et fin de vie).
En France, la norme NF P01-010 sélectionne dix indicateurs environnementaux pour les produits de construction et définit le format et le contenu des FDES (Fiches de Déclaration Environnemental et Sanitaire). La réalisation de ce type d'analyse est de plus en plus fréquente, elles permettent d'identifier les possibilités d'amélioration des performances environnementales des produits.

Début 2011, la base INIES recensait 31 FDES de produits béton (produits préfabriqués et bétons prêt à l'emploi). Le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi met également à la disposition de ces adhérents un outil de calcul baptisé BET*ie* qui permet de réaliser un bilan environnemental pour leur réalisation en BPE et ainsi de créer des FDES sur mesure pour chacun de leur projet.

En indiquant au paragraphe 56 que : « *Aux fins de l'évaluation de l'utilisation durable des ressources et de l'impact des ouvrages de construction sur l'environnement, il convient d'utiliser, lorsqu'elles sont disponibles, des déclarations environnementales de produits* ».
Le Règlement n° 305/2011 du Parlement européen appuie cette pratique émergeante.

Concernant les ouvrages d'art, l'utilisation de l'ACV pour l'évaluation des impacts environnementaux, commence à se pratiquer mais de nombreuses données d'entrée ne sont pas encore disponibles. C'est dans ce contexte que l'AFGC a créé le groupe de travail DIOGEN avec l'objectif d'aboutir à la création d'une base de données spécifique aux ouvrages d'art librement accessible par la profession. Ce groupe travaille d'une part au recensement des données existantes et à leur évaluation vis-à-vis d'un usage en génie civil et d'autre part à l'enrichissement de ces données. Voir notre entretien sur ce sujet.