

Septième édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Toulouse, France
19-20 juin 2006

LES ECO-MATERIAUX DANS LA CONSTRUCTION : ENJEUX ET PERSPECTIVES

G. Escadeillas

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), INSA - UPS, Toulouse, France

RESUME : Le développement durable est un enjeu pour l'avenir de notre planète et sa prise en compte devrait entraîner des changements multiples dans les prochaines décennies (énergie, transport, ...). Le domaine de la construction, et en particulier celui basé sur l'utilisation de matériaux cimentaires n'échappera pas à cette évolution : il faudra limiter les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles non renouvelables, penser à la déconstruction,... tout en améliorant les propriétés d'usages des matériaux et des ouvrages et en veillant à la santé et au confort des personnes. De nouveaux matériaux conçus dans cette optique - les éco-matériaux - vont devoir, à terme, remplacer les matériaux usuels.

Cet article présente quelques enjeux et perspectives du développement d'éco-matériaux dans le domaine des matériaux cimentaires et précise la stratégie de recherche développée au LMDC. Un exemple de développement d'éco-matériaux limiteurs de retrait illustre cette présentation.

1. INTRODUCTION

La richesse d'un pays se traduit souvent par sa capacité à loger dignement ses habitants et à faciliter leurs déplacements ainsi que celui des marchandises. Le dynamisme d'un pays est aussi souvent associé à l'état de son activité de construction, aussi bien pour les infrastructures liées au transport (routes, voies ferrées, aéroports, ...) que pour la réalisation de bâtiments résidentiels (logements sociaux ou non), structurants (écoles, hôpitaux, services sociaux, équipements sportifs, ...) ou industriels. Enfin, l'audace technique ou le rendu esthétique de certaines réalisations sont des vitrines du savoir faire d'un pays, des entreprises et des hommes qui y ont participé (Viaduc de Millau, Arche de la Défense, ...). Toutes ces raisons font que l'activité construction en général, et les entreprises du BTP en particulier, sont des indicateurs importants de l'état de développement d'un pays.

Cependant, l'industrie du BTP est une grande consommatrice de ressources naturelles et d'énergie. Elle est aussi réputée pour être une grande productrice de gaz à effet de serre (type CO₂) et de déchets en tout genre. Par ailleurs, il s'avère souvent que le rendement énergétique des constructions et leur durabilité sont souvent inférieurs aux calculs, ce qui augmente directement ou indirectement leur impact environnemental.

Pourtant, il est inconcevable aujourd'hui de se priver des avantages techniques, économiques et sociétaux qu'apporte la réalisation de ces infrastructures. Il existe donc de véritables défis, économiques et scientifiques, pour proposer demain au citoyen de nouveaux produits permettant de réaliser le même type de construction mais avec un coût environnemental le plus faible possible. Cette recherche doit se faire au plan mondial mais aussi, compte tenu des spécificités de chaque pays et de chaque région dans les pratiques de construction, les ressources propres et le tissu économique associé, aux plans nationaux et régionaux.

En conséquence, et pour s'inscrire dans cette perspective de développement durable dans laquelle la plupart des pays industrialisés adhèrent, il est indispensable que l'industrie du BTP recherche dès

aujourd'hui des solutions alternatives aux matériaux utilisés (éco-matériaux), comme le préconise la Plateforme Technologique Européenne de la Construction (voir site internet <http://ectp.org>). Il semble aussi évident que ces solutions alternatives sont à rechercher dans de nouvelles approches conceptuelles des matériaux constitutifs et de leur mise en œuvre (éco-conception). De même, l'analyse du cycle de vie du matériau et des constructions doit être systématisée.

La démarche volontaire HQE[®] est pour la France un exemple de concertation nécessaire. Réservée aux opérations de construction ayant fait l'objet d'une démarche de management environnemental des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie, elle vise 14 cibles, structurées en 4 pôles que sont l'éco-construction, l'éco-gestion, le confort et la santé (voir site internet <http://www.assohqe.org>). Elle touche à la fois l'environnement intérieur, celui des futurs usagers, avec des préoccupations de santé et de confort, et l'environnement au sens général, avec des objectifs d'économie de ressources et de réduction des rejets dans l'environnement.

Ces approches conceptuelles passent par des cahiers des charges plus stricts vis-à-vis de l'environnement (valorisation de ressources renouvelables, efficacité énergétique, diminution des déchets, diminution du bruit) tout en offrant des propriétés d'usage plus larges (matériaux adaptatifs, économes, durables, recyclables) et des garanties sanitaires et de confort (matériaux non toxiques, isolants, ...).

Sur le plan scientifique et sociétal, ces éco-matériaux du futur sont un véritable défi à relever puisqu'il va falloir concilier des intérêts financiers parfois contraires, rassembler des compétences qui n'ont pas ou peu l'habitude de partager leurs connaissances et leur savoir faire, fédérer un ensemble de partenaires institutionnels, scientifiques et industriels, convaincre les instances normatives et enfin, et peut être surtout, changer les habitudes dans un secteur d'activité réputé conservateur.

2. ENJEUX ET PERSPECTIVES

2.1 En terme de changement climatique (limitation des gaz à effet de serre)

2.1.1 Etat actuel

Selon les derniers chiffres de l'édition 2006 du «Petit Livre Vert de l'environnement», publié par la Banque mondiale [Banque Mondiale, 2006], les émissions mondiales de dioxyde de carbone ont augmenté de 15% entre 1992 et 2002. Dans cette période, les économies en développement rapide telles la Chine et l'Inde affichent la plus forte augmentation des émissions de CO₂ (+ 33 % pour la Chine, 2^{ème} pays «pollueur», + 57 % pour l'Inde), le principal pollueur restant les Etats-Unis (24% du total), loin devant les pays de la zone Euro (contribuant tout de même pour 10% du total).

Cette augmentation vient contrecarrer les engagements pris dans le Protocole de Kyoto en 1992, ratifié depuis par 189 pays dont plus de 30 pays industrialisés (mais pas les Etats-Unis), protocole qui vise à réduire les gaz à effet de serre des pays industriels de 5,2% entre 1990 et 2012.

Or, même si quelques avis divergent, la majorité des experts s'accorde à dire que l'augmentation des gaz à effet de serre va conduire rapidement (avant la fin de ce siècle) à des changements climatiques irréversibles remettant en cause à terme l'équilibre de la vie sur terre. Il est donc urgent de trouver des solutions durables pour inverser la tendance actuelle sans pour autant remettre en cause les bienfaits du modernisme et en particulier dans le domaine de la construction.

2.1.2 Enjeux pour la construction

En France, comme dans de nombreux pays industrialisés, ce sont le transport et l'habitat qui représentent l'essentiel des émissions de gaz, le bâtiment étant à lui seul responsable d'un quart des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ associées.

Dans le cas de l'habitat, un rapport récent d'une mission d'information parlementaire sur l'effet de serre [Assemblée Nationale, 2006] a indiqué qu'il était envisageable de diviser par 3 à 4 d'ici 2050 ces consommations énergétiques, et donc les émissions de gaz, en impliquant tous les acteurs de la filière «*qui ont tendance, aujourd'hui, à travailler de façon éclatée et sans continuité*» de manière à

créer des synergies entre l'isolation, la ventilation, les équipements et les énergies renouvelables. Le rapport préconise aussi «*de sortir de la logique française consistant à opposer les uns et les autres, et donc d'adopter une conception globale du bâtiment*»...

Le choix des matériaux de construction, et en particulier ceux à matrice cimentaire, peut contribuer à limiter de manière non négligeable les émissions de gaz à effet de serre. Ceci peut se faire par diminution de la consommation d'énergie en améliorant les caractéristiques isolantes des bâtiments grâce à un choix adapté des matériaux (éco-matériaux) qui viendrait compléter des concepts de construction plus performants, plus adaptables et plus durables (éco-conception). Ceci peut se faire aussi par la recherche et le développement de nouveaux matériaux constitutifs, dont la fabrication et la mise en œuvre engendreraient moins d'émissions de gaz tout en gardant ou en améliorant autant que possible les performances d'usages (mécanique, thermique, durabilité, ...).

2.1.3 Evolutions probables

- Pour le ciment

Du point de vue des émissions de CO₂, le ciment Portland a le double inconvénient de nécessiter une température de cuisson élevée (1450°C), obtenue majoritairement par la combustion de combustibles fossiles (ce qui représente 0.28 t CO₂ / t ciment) mais aussi de présenter en cours de préparation une réaction de décarbonatation (la calcite (CaCO₃), qui constitue 80% de la matière première, se transforme en CaO en perdant une molécule de CO₂ qui se dégage, soit 0.52 t CO₂ / t ciment). Ainsi, pour un ciment Portland, le bilan des émissions est en moyenne de 0.8 t CO₂ / t ciment (varie de 0.6 à 0.9 suivant le ciment) ce qui fait de l'industrie cimentière une des principales industries émettrices de gaz à effet de serre. Compte tenu des taxes envisagées sur les émissions de CO₂, le prix du ciment, et en particulier du ciment sans ajout (CEM I), devrait donc augmenter significativement.

Pour répondre aux exigences du protocole de Kyoto, l'industrie cimentière s'est préoccupée depuis plusieurs années de l'évolution des cimenteries et des ciments vis-à-vis de ces émissions de gaz à effet de serre (« Low-CO₂ cements » [Gartner, 2004]).

Du point de vue de la production d'énergie nécessaire au fonctionnement d'une cimenterie (correspondant au tiers des émissions), l'utilisation d'énergie propre (éoliennes par exemple) et la combustion de certains composés qui auraient été de toute façon éliminés (comme les farines animales, les huiles usagées, les pneus) permettent de réduire significativement les émissions de CO₂. Par ailleurs, l'efficacité énergétique des installations a été grandement améliorée.

Cependant, d'une manière plus générale, l'amélioration du bilan des émissions en CO₂ du ciment peut être plus facilement réalisée par la substitution partielle d'une partie du clinker par d'autres constituants présentant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques. Compte tenu de sa disponibilité, il est vraisemblable que le laitier de haut fourneau, sous-produit industriel de l'industrie sidérurgique, verra très prochainement sa proportion augmenter dans la composition de la plupart des ciments avec ajouts. De même, il est probable que des pouzzolanes naturelles, ou activées thermiquement, voient leur utilisation augmenter dans ces ciments, surtout dans des pays en voie de développement.

Enfin, sur le plan des émissions de CO₂, le développement de liants à base de sulfates de calcium ou de sulfoaluminates de calcium semble très prometteur, puisque les températures de cuisson sont bien plus faibles et qu'il existe des procédés sans dégagement de CO₂.

- Pour le béton

Du fait de l'utilisation du ciment Portland dans sa composition (dosage moyen de 270 kg/m³), et indépendamment du transport, le béton est directement concerné par les émissions de CO₂. Pour diminuer son impact sur les gaz à effet de serre au moment de la construction, plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- optimiser le choix du liant et son dosage, en privilégiant les « ciments à bas CO₂ » : ceci est la conséquence directe du développement de ciments plus écologiques ;
- mieux prendre en compte les contraintes réelles de l'ouvrage : l'approche performantielle devrait permettre d'optimiser les dosages en liant selon les classes d'exposition des bétons. De même,

- l'approche probabiliste pourrait conduire à une réduction de certains facteurs sécuritaires qui conduisent à surdoser les bétons en liant (ou à augmenter les épaisseurs d'enrobage) ;
- diminuer les pertes en favorisant la préfabrication en usine : on considère généralement que les pertes de béton sur chantier peuvent atteindre 5 à 10%. Or, en préfabrication, le même type d'élément de construction peut être réalisé avec un taux de perte de l'ordre de 3% ;
 - optimiser les structures en utilisant des bétons à hautes ou très hautes performances : l'augmentation des résistances du béton, obtenue essentiellement par réduction d'eau et optimisation du squelette granulaire, permet d'en diminuer le volume pour un même usage. En outre, la durée de vie des ouvrages est accrue.

De plus, pour certains ouvrages ou parties d'ouvrages destinés à l'habitat, le béton pourrait être mieux utilisé afin d'améliorer leur comportement thermique :

- meilleure isolation ou plus grand confort par effet de masse ;
- utilisation de la chaleur accumulée, ...

- Pour les ouvrages

Le fait d'augmenter la durée de vie des ouvrages contribue à la diminution de l'impact des matériaux lorsque ceux ci sont émetteurs de gaz à effets de serre. Les nouvelles approches conceptuelles (éco-conception) et performantielles devraient pouvoir encore optimiser cette diminution.

Ainsi, en France, de plus en plus de bâtiments s'inscrivent dans la démarche HQE[®]. Depuis 2005, il existe même une certification « NF Bâtiments tertiaires – Démarche HQE[®] » opérationnelle pour les bureaux et les établissements d'enseignement. Après les maîtres d'ouvrages publics, on commence à voir certains appels d'offres privés inscrire cette démarche dans leur cahier des charges. Il semble évident que le surcoût financier actuel de cette démarche (+10% environ) puisse être gommé devant la multiplication des opérations de construction.

2.2 En terme d'économies des ressources naturelles

2.2.1 Etat actuel et enjeux pour la construction

La construction est l'activité qui transforme et transporte la plus grande quantité de matériaux issus des ressources naturelles (écorce terrestre), qui sont par définition des ressources non renouvelables (en France, on considère que les domaines de la construction (Génie Civil et Bâtiment) utilisent 7 tonnes de granulats par habitant et par an !).

De plus, compte tenu des incidences du transport (coût, pollution, ...) et des recours administratifs en zones habitées ou protégées, il est de plus en plus difficile de trouver et d'exploiter les matériaux nécessaires à la construction au plus près des zones de forte consommation (grandes villes).

La recherche de matériaux alternatifs et /ou d'économies sur l'utilisation des matériaux actuels est donc une nécessité pour la profession.

2.2.2 Evolutions probables

Dans les prochaines années, et dans l'optique d'économiser les ressources naturelles non renouvelables, le domaine de la construction à base de matériaux cimentaires devrait évoluer dans les axes suivants :

- optimisation des dosages en constituants et économie sur les structures : en croisant les connaissances sur les empilements granulaires, les adjuvants, la durabilité, voire les approches probabilistes, il devrait être possible de réaliser des bétons encore plus performants. Ceci doit conduire à des économies de matériaux pour un ouvrage donné, comme cela a été montré pour les BHP et les BTHP (gains de 25 à 40%) ;
- diminution des déchets : déjà largement engagée, la diminution des déchets pendant la fabrication et la construction devrait continuer (recyclage des eaux et des granulats à la fabrication, préfabrication, ...)
- recyclage de produits : la déconstruction d'ouvrages en béton, la valorisation de pneus usagés et de nombreux autres produits en fin de vie, pourraient être des ressources importantes de

granulats. Cependant, plusieurs points font encore blocage : la durabilité des ouvrages incorporant ces matériaux (problème des granulats « pollués » par les sulfates par exemple, porosité plus forte), le coût de ces matériaux (plus chers actuellement que les matériaux naturels), la normalisation (même si les normes granulats reconnaissent les granulats naturels « recyclés ») et la psychologie des acteurs (matériaux « d'occasion ») ;

- utilisation de matériaux renouvelables : les mélanges fibres végétales / ciment peuvent constituer de très bons composites pour la construction (résistance mécanique, isolations thermique et phonique). Toutefois, ces composites présentent souvent des hétérogénéités de comportement en milieu humide et favorisent la prolifération de microorganismes (des traitements préalables des fibres végétales pourraient limiter ces inconvénients). Par ailleurs, certains résidus de combustion de matière végétale (cendres de balles de riz, cendres de bagasse, ...) présentent des propriétés pouzzolaniques non négligeables.

Cependant, si les trois premiers axes peuvent être généralisés à l'ensemble des territoires, le dernier sera à développer dans les zones de production des fibres végétales ou de leurs sous-produits (richesse de certaines zones tropicales). Il pourrait même venir en soutien d'une politique agricole.

2.3 En terme de santé et de confort

2.3.1 Etat actuel et enjeux pour la construction

Pendant de nombreuses années, l'usager ainsi que les ouvriers de la construction ont été les « oubliés » du développement des matériaux et des techniques. Le comportement mécanique, la tenue aux agents agressifs, la vitesse d'exécution, l'esthétique, et surtout le prix intervenaient de façon prépondérante dans les critères de choix. Cependant, de graves problèmes de santé publique ont mis en accusation les matériaux et leurs techniques d'utilisation. L'amiante en est l'exemple le plus (tristement) célèbre mais d'autres produits, encore utilisés actuellement, entraînent aussi de graves problèmes respiratoires ou cutanés.

Il convient donc de se soucier non seulement de la santé et du confort de l'usager, qui va vivre et travailler dans des locaux présentant des risques sanitaires importants (émissions de poussières ou de composés organiques volatiles (COV), ...), mais aussi de celle de l'ouvrier qui va être confronté quasi-quotidiennement et de manière accrue à ces mêmes risques et à d'autres (bruits, vibrations, ...), soit lors de la fabrication du produit, soit lors de sa mise en oeuvre.

Il existe donc un besoin réel pour le domaine de la construction de prendre effectivement en compte ces problématiques de santé et de confort dans le développement et le choix des matériaux et des techniques de mise en oeuvre. Ceci devrait déjà donner une meilleure image de la profession et, de ce fait, attirer davantage de personnels qualifiés pour continuer à construire durablement...

2.3.2 Evolutions probables

Les fabricants de matériaux et les entreprises de la construction commencent à réfléchir réellement à ces problématiques de santé et de confort de leurs ouvriers, sous la pression, il est vrai, des autorités gouvernementales et des organismes de santé. Toutefois, et compte tenu de la logique de marché, il est évident que ces changements ne peuvent se faire qu'à coût final quasi-identique.

Ainsi, nous avons vu ces dernières années les bétons auto-plaçants (BAP) se développer dans la préfabrication ou sur chantier avec des arguments basés sur la diminution du bruit (pas de vibration) et de la pénibilité du travail (mise en place presque sans intervention humaine), le surcoût de ces BAP à la fabrication étant quasiment couvert par les gains de productivité.

Dans cette problématique de santé et de confort, d'autres produits ou techniques devraient pouvoir se développer :

- des produits à faible impact environnemental et sanitaire : la mise en place d'une normalisation spécifique aux produits de construction devrait conduire les fournisseurs à qualifier leurs produits (norme NF P 01-010 (décembre 2004) « Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction ») ;
- des produits améliorant le confort des usagers : matériaux isolants phoniques et thermiques, matériaux auto-nettoyants, ... ;

- des produits durables : pas de relargage de poussières ou de COV, pas de prolifération bactérienne ou de champignon, ...

3. STRATEGIES DE RECHERCHE

3.1 En général

Pour intégrer le développement durable dans la démarche de construction, il semble évident que les industriels du BTP doivent faire évoluer les matériaux constitutifs et leur mise en œuvre. Cela peut se faire en modifiant la nature des matériaux ou de certains de leurs composants, les techniques d'élaboration de ces matériaux (moins énergétiques, moins polluantes), et les techniques d'utilisation elles-mêmes (moins pénibles, moins polluantes). Enfin, il faudra dès la conception prévoir l'entretien, les solutions de remplacement partiel et la réutilisation en fin de vie.

Cependant, et avant toute chose, il conviendra d'évaluer l'impact environnemental des matériaux existants et des pratiques de construction. En effet, il est possible que des modifications mineures dans l'extraction, la conception et la mise en œuvre de certains matériaux suffisent à leur donner un impact environnemental négatif limité. De même, certaines capacités pourraient être améliorées afin d'augmenter les performances et d'allonger les durées de vie. Ainsi, l'analyse du cycle de vie de tous les matériaux utilisés dans la construction devrait être systématisée (ISO14040).

Par la suite, et dans l'optique de développer ces éco-matériaux, il conviendra de fixer un cahier des charges des plus stricts avec les objectifs suivants :

- la limitation du coût énergétique et environnemental à la conception (éco-conception) et à la mise en œuvre (préservation des ressources naturelles non renouvelables et valorisation des ressources renouvelables, diminution des déchets, du bruit, ...)
- la limitation du coût énergétique et environnemental à l'usage (éco-usage) (efficacité énergétique, constructions plus durables) ;
- l'amélioration du confort de vie (pour l'utilisateur en terme de confort thermique, acoustique, visuel, de la qualité de l'air intérieur et de l'eau dans les bâtiments, mais aussi pour les ouvriers en terme de diminution des impacts sur la santé liés à l'exercice de leur profession).

3.2 Au LMDC

L'expérience du LMDC dans la valorisation de sous-produits industriels dans les matrices cimentaires est ancienne (cendres volantes, fumées de silice, boues rouges, ... [Carles Gibergues, 1961]) mais continue à s'appliquer aux nouvelles ressources potentielles (pneus usagés [Turatsinze et al, 2005], cendres d'incinération d'ordures ménagères [Aubert et al, 2005], cendres de farines animales [Cyr et al, 2006], ...).

Elle s'appuie sur une méthodologie classique de caractérisation mécanique, chimique et minéralogique des matériaux mais aussi environnementale [Cyr et al, 2003]. Plus récemment, et compte tenu de la diversité des produits susceptibles d'être utilisés, les problématiques de santé sont aussi prises en compte.

Pour répondre à ces différentes préoccupations environnementales, plusieurs collaborations ont été formalisées avec d'autres laboratoires du site (spécialisés en géologie, génie biologique, chimie agro-industrielle, chimie inorganique, santé). De plus, des bancs d'essais de qualification environnementale des matériaux de construction soumis à un vieillissement accéléré sont en préparation.

4. EXEMPLE : APPLICATIONS DES ECO-MATERIAUX A LA LIMITATION DU RETRAIT

Le retrait, au sens large du terme, est la première cause de fissuration des ouvrages et est, par conséquent, à l'origine de nombreux litiges sur chantier. Les solutions proposées pour limiter le retrait sont essentiellement de deux types : appliquer une cure efficace aux bétons jeunes pour limiter l'évaporation rapide de l'eau de constitution des bétons, ce qui est rarement le cas dans la pratique, ou utiliser des produits compensateurs de retrait, ce qui est encore très peu répandu.

Du point de vue environnemental, ces solutions ne sont pas toujours idéales car de nombreux produits utilisés sont à base d'éthers de glycol, et sont donc classés nocifs suivant la classification européenne. Ainsi, le développement et l'utilisation de produits à faible impact environnemental comme agents limiteurs de retrait permettraient à la fois d'inscrire l'industrie du bâtiment dans une démarche de type développement durable et d'améliorer la qualité des ouvrages.

L'objectif de l'étude présentée ici et réalisée au LMDC [Cornac, 2005, Cornac et al, 2006] était d'évaluer le rôle d'éco-produits limiteurs de retrait sur les propriétés mécaniques et physiques des mortiers. Pour cela nous avons mené une étude comparative dont une partie est présentée ci-après (comparaisons entre un mortier de référence, un mortier avec un agent anti-retrait commercial et deux mortiers contenant des éco-produits d'origine organique et minérale).

4.1 Eco-Matériaux

Deux produits à faible impact environnemental ont été retenus a priori en fonction d'effets spécifiques présentés dans la littérature et de leur disponibilité locale :

- le métakaolin : obtenu à partir de la calcination de la kaolinite (argile assez fréquente dans l'écorce terrestre), ce produit ne conduit pas lors de sa fabrication à la libération directe de gaz à effet de serre. De plus, d'après la littérature [Brooks et al., 2001 ; Wild et al., 1998], les mortiers dont une part importante du ciment a été substituée par du métakaolin (au-delà de 10% à 15%) présentent une réduction du retrait significative, liée à la formation de composés expansifs;
- le glycérol : issu de la transformation d'huiles végétales, le glycérol est donc un co-produit d'origine naturelle. Il permet de modifier les propriétés interfaciales de l'eau [Koseoglu, 2006], ce qui pourrait limiter les tensions hydrostatiques dans les capillaires (tensions qui se produisent lorsqu'il y a consommation ou évaporation d'eau) et réduire le retrait ainsi que les fissurations.

4.2 Méthodes

L'étude a été réalisée sur mortiers. Des éprouvettes de mortier normal (4x4x16 cm³) ont été confectionnées (suivant la norme NF EN 196-1) en maintenant le dosage en ciment constant pour éviter les phénomènes de dilution. Le ciment utilisé est un CEM I 52,5 R réputé pour avoir un retrait important (finesse Blaine de 0.45 m²/g, teneur en C₃A supérieure à 10%).

Plusieurs formulations ont été fabriquées à maniabilité constante (un superplastifiant a été introduit pour le mortier avec métakaolin afin d'assurer une maniabilité équivalente à celle du mortier de référence (8s ± 2, mesurée au maniabilimètre LCL)) :

- un mortier témoin ;
- un mortier avec agent anti-retrait commercial à base d'éthers de glycol (2% du poids de ciment) ;
- un mortier avec métakaolin. Le métakaolin utilisé est obtenu par calcination flash à partir d'une kaolinite quasiment pure (finesse BET > 18 m²/g). Il est dosé à 40% du poids de ciment mais est utilisé en addition du ciment (et donc en substitution du sable) ;
- un mortier avec glycérol (dosé à 1% du poids de ciment).

Les compositions chimiques du ciment et du métakaolin utilisés sont données dans le tableau 1.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Perte au feu
Ciment	18.69	5.46	2.39	62.98	3.23	0.13	0.72	3.04	1.14
Métakaolin	58.10	35.14	1.21	1.15	0.20	0.07	1.05	0.03	1.85

Tableau 1. Composition chimique massique (en %) des produits minéraux utilisés

Les caractéristiques étudiées au cours du temps sont les suivantes :

- résistance mécanique en compression : les éprouvettes ont été conservées dans l'eau dès leur démoulage jusqu'à échéance. Elles ont été ensuite testées selon la norme NF EN 196-1 ;
- retraits endogènes et total : Les mesures de retrait endogène et de retrait total ont été réalisées à partir de 18h après le début du malaxage. Pour chaque composition, les variations dimensionnelles ont été effectuées avec un comparateur sur trois éprouvettes conservées dans une salle maintenue à 20°C et 50% d'hygrométrie relative (retrait total) et sur trois éprouvettes conservées sans échange hydrique dans une salle maintenue à 20°C (retrait endogène).

4.3 Résultats

4.3.1 Résistances mécaniques

Les résultats des mesures de résistance en compression sont donnés dans le Tableau 2.

Référence	Dosage (% poids de ciment)	Compression		
		1 j	7 j	28 j
Témoin		24,0 ± 0,8	51,6 ± 1,9	57,1 ± 3,2
Agent anti-retrait	(2%)	16,2 ± 0,9	38,9 ± 2,6	49,3 ± 2,5
Métakaolin	(40%)	45,8 ± 2,4	68,5 ± 0,6	82,2 ± 1,8
Glycérol	(1%)	18,1 ± 0,7	46,3 ± 0,8	49,0 ± 3,8

Tableau 2. Résistances en compression (en MPa) des différentes compositions de mortiers

A la lecture du tableau, et en comparaison avec le mortier témoin, on constate que :

- l'agent anti-retrait commercial affecte les résistances mécaniques (-15% / témoin à 28 jours) ;
- le métakaolin conduit à une augmentation importante des résistances mécaniques (+43% / témoin à 28 jours) ;
- le glycérol diminue les propriétés mécaniques du mortier de référence (-16% / témoin à 28 jours). Cependant, les valeurs obtenues sont similaires à celles déterminées sur le mortier contenant l'agent anti-retrait commercial.

4.3.2 Variations dimensionnelles

Les évolutions du retrait endogène et du retrait total des différentes compositions en fonction du temps sont présentées respectivement Figure 1 et Figure 2.

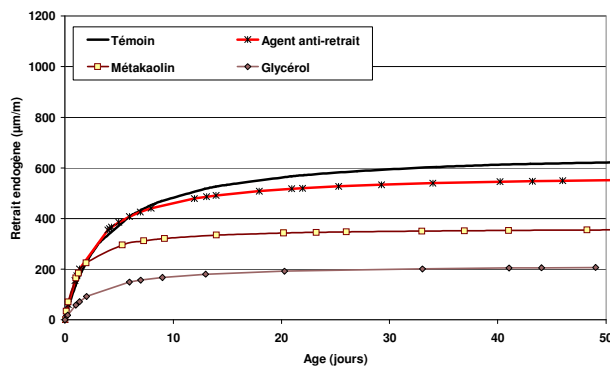


Figure 1. Evolution du retrait endogène des différentes compositions de mortiers (20°C)

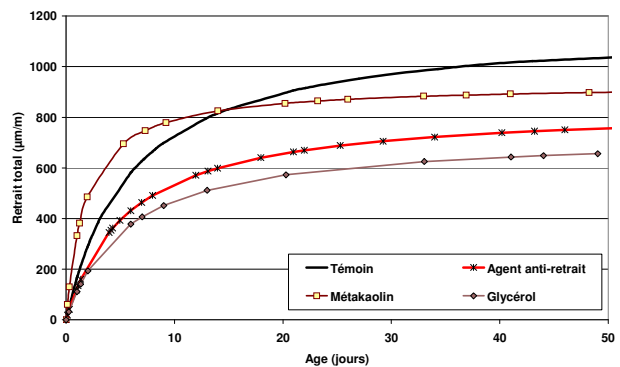


Figure 2. Evolution du retrait total des différentes compositions de mortiers (20°C, 50% H.R.)

A partir de la figure 1, et en comparaison avec le mortier témoin, on peut conclure que :

- l'agent anti-retrait commercial influence peu le retrait endogène (-15% / témoin) ;
- le métakaolin diminue fortement le retrait endogène (-40 % / mortier témoin) ;
- le glycérol est le produit testé le plus efficace pour diminuer le retrait endogène (-65% / témoin).

A partir de la figure 2, et en comparaison avec le mortier témoin, on peut conclure que :

- l'agent anti-retrait commercial conduit à une limitation significative du retrait total (-25% / témoin) ;
- le métakaolin augmente le retrait total aux jeunes âges (avant 15 jours) mais le réduit par la suite (-12% / témoin à 50 jours, -20% à un an). Ce changement de comportement peut être relié aux évolutions de la microstructure suite aux réactions pouzzolaniques ;
- le glycérol permet la plus forte réduction du retrait total (- 36% / témoin).

Les évolutions du retrait de dessiccation des différentes compositions en fonction du temps et les pertes de masse relative sont présentées respectivement Figure 3 et Figure 4.

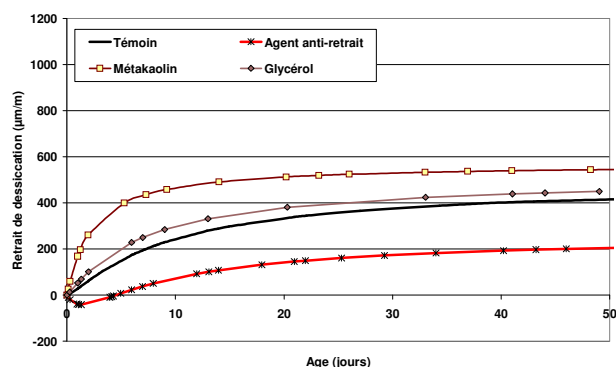


Figure 3. Evolution du retrait de dessiccation des différentes compositions de mortiers (20 °C, 50% H.R.)

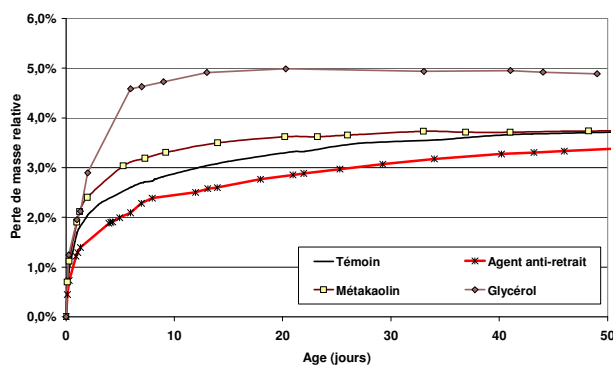


Figure 4. Evolution des pertes de masse des différentes compositions de mortiers (20 °C, 50% H.R.)

A partir de ces figures, et en comparaison avec le mortier témoin, on peut conclure que :

- l'agent anti-retrait commercial conduit à la fois à une limitation significative du retrait de dessiccation (-50% / témoin) et à une diminution de la perte de masse par évaporation. Il est vraisemblable que le produit renferme un agent rétenteur d'eau ;
- le métakaolin augmente sensiblement le retrait de dessiccation (+100% / témoin à 7 jours, +35% à 50 jours). En parallèle, la perte de masse est plus élevée aux jeunes âges ;
- le glycérol ne modifie pratiquement pas le retrait de dessiccation (+5% / mortier témoin) alors que la perte de masse est beaucoup plus élevée, surtout aux jeunes âges (+100% à 7 jours).

Si on prend en compte les différents résultats de retrait, on constate que les mécanismes mis en jeu pour limiter le retrait diffèrent d'un produit à un autre :

- la limitation du retrait endogène en présence de métakaolin peut s'expliquer par la réactivité pouzzolanique du métakaolin et le fait que certains hydrates obtenus (aluminates de calcium) ont un caractère légèrement expansif [Courard et al., 2003] ;
- le glycérol est très efficace sur le retrait endogène du fait, probablement, de ses propriétés mouillantes qui limitent les tensions dans les capillaires lors de la consommation de l'eau [Pease et al., 2005]. Par contre, le fait que l'eau soit moins liée entraîne une perte de masse importante en dessiccation (et une composante de retrait de dessiccation un peu élevée) ce qui conduit à imposer un produit de cure lors de l'utilisation de cet agent anti-retrait (pour éviter l'évaporation rapide). L'utilisation additionnelle d'un rétenteur d'eau pourrait aussi être envisagée ;
- le produit commercial à base d'éther de glycol contribue à une diminution importante du retrait de dessiccation en limitant principalement les pertes de masse par évaporation et accessoirement le retrait endogène.

4.4 Conclusions

A partir des résultats présentés ci-dessus, on peut d'ores et déjà retenir deux points :

- du point de vue mécanique, et dans le but d'améliorer le bilan environnemental des matériaux cimentaires, on peut envisager le remplacement d'une partie du ciment par le métakaolin (approche liant équivalent des normes européennes) et celui des éthers de glycol, problématiques du point de vue de la santé, par le glycérol.
- du point de vue de la réduction du retrait, on constate qu'il est tout à fait possible de diminuer les différents types de retrait (endogène, dessiccation) en introduisant des matériaux à faible impact environnemental.

Des essais sont en cours pour étudier l'impact de la combinaison de ces produits en remplacement d'une partie du ciment et pour évaluer leur aptitude à la limitation de la fissuration. Les applications sont nombreuses et visent l'amélioration du comportement au jeune âge et de la durabilité : chapes auto nivellantes, bétons de dallages et en particulier bétons auto plaçants, ...

5. CONCLUSIONS

La prise en compte du développement durable dans le domaine de la construction devrait conduire ces prochaines années à la mise au point de nouveaux concepts, matériaux et techniques, en particulier pour les produits cimentaires. Les problématiques de santé et de confort, aussi bien des professionnels de la construction que des usagers, devraient aussi contribuer à l'évolution de ces matériaux.

Ces développements vont entraîner des besoins spécifiques en recherche, aussi bien sur les plans théoriques (approches expérimentales et modélisation, analyse du cycle de vie) que techniques (de la fabrication à la déconstruction). De plus, pour répondre à l'ensemble des problématiques, il conviendra de développer une recherche pluridisciplinaire associant des spécialistes du minéral, du végétal, de l'organique, de la santé, ..., sans oublier les spécialistes des matériaux cimentaires !

Cependant, pour inciter à l'utilisation de ces éco-matériaux et donc pour s'inscrire réellement dans le développement durable, il faut associer aux efforts de recherche et développement une politique volontariste. Ainsi, mieux que les éco-taxes qui viendraient augmenter le prix de certains produits (ce qui ne représente pas grand chose sur le coût global d'une construction), des incitations fiscales pour le maître d'ouvrage seraient certainement préférables (comme cela se pratique déjà pour les énergies renouvelables).

6. REFERENCES

- Assemblée Nationale, Rapport n°3021, au nom de la Mission d'Information sur l'effet de serre, 2006.
- J. E. Aubert, B. Husson and A. Vaquier, « Use of municipal solid waste incineration fly ash in concrete », *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 6, June 2004, Pages 957-963.
- Banque Mondiale, « Petit Livre vert de l'Environnement », publié à l'occasion de la 14e session de la Commission des Nations unies sur le développement durable, New York, 2006.
- J.J Brooks, M.A. Megat Johari, « Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete », *Cement and Concrete Composites*, 23 (2001), pp 495-502.
- A. Carles Gibergues, « Contribution minéralogique à l'étude des propriétés pouzzolaniques des cendres volantes des principales centrales thermiques françaises », Doctorat de spécialité, Faculté des Sciences, Toulouse, 1961.
- S. Cornac (2005), « Amélioration de la qualité environnementale des mortiers », *Mémoire de stage Master Recherche MIS-MSE*, ENS de Cachan, 45p.
- S. Cornac, C. Oms-Multon, G. Escadeillas, P. de Caro, « Influence d'éco-produits réducteurs de retrait sur les caractéristiques des mortiers », *Colloque AUGC*, La Grande Motte, France, Juin 2006.
- L. Courard, A. Darimont, M. Sschouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, « Durability of mortars modified with metakaolin », *Cement and Concrete Research*, 33 (2003), pp 1473-1479.
- M. Cyr, J.E. Aubert, B. Husson, G. Escadeillas, P. Clastres, « Méthodologie d'étude des déchets en vue de leur valorisation dans les matériaux de construction », *Revue, Ciment, béton, Plâtres, Chaux*, n° 864, déc. 2003-janv 2004, pp. 58-64M.
- M. Cyr and C. Ludmann, « Low risk meat and bone meal (MBM) bottom ash in mortars as sand replacement », *Cement and Concrete Research*, Volume 36, Issue 3, March 2006, Pages 469-480.
- E. Gartner, « Industrially interesting approaches to low CO₂ cements », *Cement and Concrete Research*, 34 (2004), pp 1489-1498.
- D.J. Gielen, « Building materials and CO₂, Western European emission reduction strategies », *MATTER Project*, ECN-C-97-065, 1997.
- S. Koseoglu, « Glycerol Production and Utilization », *Practical Short Courses on Biodiesel : Market, Trends, Chemistry and Production, 2006*.
- B. Pease, H. Shak, J.Weiss, « Shrinkage behavior and residual stress development in mortar containing shrinkage reducing admixtures (SRA's) », *International Conference on Advances in Concrete composites and Structures (ICACS)*, Chennai, India, January 2005.
- A. Turatsinze, S. Bonnet and J.-L. Granju, « Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres », *Building and Environment*, Volume 40, Issue 2, February 2005, Pages 221-226.
- S. Wild, J.M. Khatib, L.J. Roose, « Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement-metakaolin pastes », *Advances in Cement Research*, 10 (1998), pp 109-119.