

# Durabilité des bétons dans une approche performantielle

Razafitrimo V. <sup>1</sup>, Cassagnabère F. <sup>2</sup>, Carcasses M. <sup>2</sup>, Cubaynes M.P. <sup>2</sup>, Allahyar I. <sup>2</sup>,  
Randrianja R., Escadeillas G<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Ecole du Génie Civil, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

<sup>2</sup> LMDC « Laboratoire Matériaux et Durabilité des Construction » de l'Université de Toulouse

<sup>3</sup>Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

Correspondant : *razafitrimo.veroniaina@gmail.com*

**Résumé.** La durabilité constitue l'un des paramètres essentiels dans l'élaboration des ouvrages en béton qui doit être formulé en fonction des sollicitations environnementales auxquelles ils sont soumis. Pour répondre à ces exigences de durabilité, le béton doit être confectionné selon de nouveaux textes normatifs qui autorisent deux méthodes de formulation. L'approche dite prescriptive porte sur des obligations de moyens (savoir-faire, retour d'expérience) alors que la seconde, dite performantielle, consiste à substituer aux exigences, en termes de moyens, les performances basées sur des indicateurs généraux ou spécifiques de durabilité.

Avec l'émergence de nouveaux matériaux plus respectueux de l'environnement (utilisation de métakaolin, laitier, filler calcaire) et la complexification des formulations (phase liante ternaire ou quaternaire) et des moyens de mise en œuvre (traitement thermique, maturation), il devient de plus en plus difficile d'appréhender les propriétés physico-chimiques des bétons de nouvelle génération.

Cette communication présente les avancées des recherches relatives à l'approche performantielle de la formulation des bétons. Elle s'articule en deux parties.

Dans l'optique du développement de cette méthode, la première partie présente les moyens mis en place. Sont détaillés les dispositifs expérimentaux implantés à l'IST d'Antananarivo comme la porosité à l'eau, la résistivité électrique ou la carbonatation...

La seconde partie s'intéresse à un cas d'étude réel développé au LMDC de Toulouse. Ce travail de recherche consiste donc à comparer les propriétés physico-chimiques de bétons à forte teneur en addition minérale (filler calcaire, cendre volante, laitier de haut fourneau et métakaolin), dérogeant à l'approche prescriptive avec celles des bétons de référence répondant à cette même norme. Cette comparaison s'est effectuée au travers d'indicateurs de durabilité généraux (porosité accessible à l'eau, perméabilité à l'oxygène, coefficient de migration des ions chlorure...) et d'indicateurs spécifiques : la résistance à la carbonatation naturelle et accélérée. Pour une application en bâtiment, les campagnes expérimentales menées ont montré que dans la majorité des cas, les bétons à forte teneur en addition minérale, dérogeant aux spécifications, présentent des comportements proches de ceux observés sur les bétons de référence, répondant à l'approche prescriptive.

**Mots clés :** Béton, Durabilité, Additions minérales.

## INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, l'homme a eu besoin de matériaux pour construire et développer ses civilisations. Dans la présentation du Pr. Yves Brechet, sur les « *Sciences comparées des matériaux de structure naturels et artificiels* »[1], il est expliqué comment l'homme a développé, à travers les âges, pour des usages propres, des matériaux (voir Figure 1).

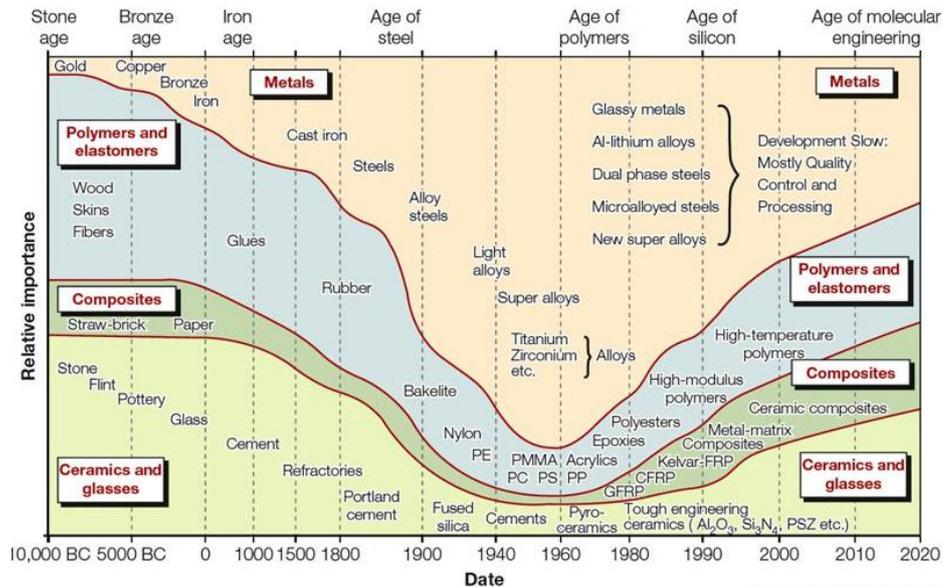


Figure 1 : Usage des matériaux selon les âges[2]

En parallèle, cette figure montre aussi que l'usage du ciment a commencé 1 000 ans après Jésus Christ et continue encore à l'être de nos jours.

En ingénierie de la construction, l'homme a aussi besoin de matériaux[3]. Le matériau le plus couramment utilisé est le « **béton** » avec 4 milliards de m<sup>3</sup> par an consommés dont 60 millions m<sup>3</sup> en France pour des applications divers (bâtiments, chaussées, ouvrages d'art...). A l'échelle industrielle, l'intérêt du béton réside dans le fait qu'il soit :

- confectionné avec des constituants de base locaux,
- mis en place facilement car moulable,
- mécaniquement intéressant (en compression et en flexion avec acier, en comportement différé),
- durable dans le temps (conservation des propriétés physico-chimiques dans son environnement),
- peu cher.

Différentes recherches ont montré que la performance du béton réside sur sa durabilité physico-chimique. Afin de quantifier les performances physico-chimiques des bétons, une série d'indicateurs de durabilité a été mise en place et sont encore développés[4]. Afin de se conformer aux exigences de durabilité du béton, l'application des nouveaux textes normatifs[5] dans leur confection va nous mener à apporter une attention particulière sur leurs performances basées sur des indicateurs qu'ils soient généraux (à tous les bétons) ou spécifiques (relatif à un environnement donné).

Ainsi, dans cette communication, nous allons d'abord présenter, dans un premier temps, l'approche par performances de la durabilité des bétons. La deuxième partie explicitera cette méthodologie ainsi que les moyens mis en œuvre. La troisième partie sera consacrée à deux cas d'étude réels développés au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse.

## 1. METHODE

### 1.1. Le contexte.

De nos jours, à l'image de tous les produits, procédés et matériaux employés dans nos quotidiens, le béton fait l'objet d'une optimisation en ce qui concerne l'impact environnemental de sa fabrication et de son utilisation. Sur la figure ci-après, nous pouvons apprécier le pourcentage de béton utilisé dans la construction.

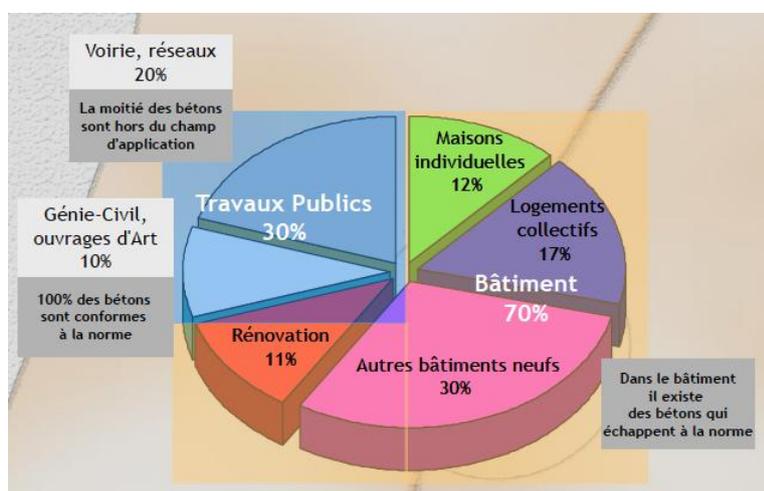


Figure 2 : Utilisation du béton dans la construction[7]

C'est pourquoi, nous allons surtout focaliser notre étude sur le matériau béton. Le béton présente aussi bien des avantages que des inconvénients. En effet, les ouvrages en béton génèrent, d'une part, le dynamisme d'une nation par la création d'emploi dans la construction des infrastructures de transport, de logements, de bâtiments structurants et industriels... D'autre part, par leur audace technique et leur rendu esthétique, par leur durée de vie avec maintenance réduite, la construction en béton s'avère être une vitrine du savoir-faire et de durabilité des constructions.

Mais ces ouvrages présentent aussi des inconvénients en particulier par les impacts sur le milieu naturel en ne citant que l'épuisement des ressources en matières premières, la source de déchets solides, l'émission de gaz à effet de serre, l'émission de poussières, de bruit...

Dans le secteur de la construction en béton, l'économie, l'écologique et la durabilité sont liés. En effet :

- économie : dans la fabrication du ciment, un des composants majeurs du béton, la cuisson du clinker consomme beaucoup d'énergie[8], soit 1450°C. Ceci affecte le coût du mètre cube du béton ;
- écologie, d'après Hendriks et al., 1998[9], 810 kg de CO<sub>2</sub> sont émis pour la cuisson de 1 tonne de clinker. Ce qui génère 7% du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ;
- durabilité[10]: beaucoup de recherches sont menées afin de produire des matériaux de construction durable, en l'occurrence le béton[10].

Le béton fait l'objet de normes, entre autres la norme EN 206/CN[5] qui garantissent sa qualité. Plusieurs types de bétons y sont visés, à savoir les bétons destinés aux structures coulées en place (Bétons Prêts à l'Emploi et les Bétons fabriqués sur chantier), les bétons des Produits structuraux préfabriqués en usine ainsi que les bétons pour Bâtiments et pour Ouvrages de Génie Civil.

## 1.2. L'approche prescriptive et l'approche par performances.

Le béton « matériau de synthèse » doit être formulé afin de répondre au cahier des charges (CCTP) en termes d'état frais, de performances mécaniques et de durabilité. L'architecture de texte normatif autour d'une application spécifique (béton de bâtiment, d'ouvrages d'art, béton précontraint, armé, autoplaçant, fibré....) s'articule autour de la norme EN 206/CN « Béton: spécification, performance, production et conformité ». Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** suivant résume les Normes constituants en relation avec la EN206/CN.

Tableau 1 : Exemple de normes importantes interagissant avec la norme NF EN 206/CN[5]

Normes « constituants » NF EN ----- relatif aux				
<u>Granulats</u>				
[Norme 932] Propriétés générales	[Norme 933] Propriétés géométriques	[Norme 1097] Propriétés mécaniques et physiques	[Norme 1367] Propriétés thermique et d'altérabilité	[Norme 1744] Propriétés chimiques
<u>Ciments</u>		[Norme 196] Méthodes d'essais des ciments	[Norme 197] Ciment : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants	
<u>Adjuvants</u>				
[Norme 934-2] Adjuvants pour béton, mortier et coulis				
<u>Eau</u>				
[Norme 1008] Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi				
<u>Additions minérales</u>				
[Norme 450] Cendres volantes pour béton		[Norme 15167] Laitier granulé de haut-fourneau moulu : utilisation dans le béton, mortier et coulis		
Normes « béton » NF EN ----- relatif à l'				
[Norme 12350] Essai pour béton frais		[Norme 12390] Essai pour béton durci		
Normes et réglementations de calcul				
PR NF EN 1990/A1 [1990/A1] Eurocode : Bases de calcul des structures »	NF EN 1992 [Norme 1992] Eurocode 2 : Calcul des structures en béton	DTU P18-703 [18-703] BPEL 99		

Ces textes autorisent deux méthodes de formulation : l'approche dite prescriptive et l'approche performantielle.

L'approche dite prescriptive porte sur des obligations de moyens : savoir-faire, retour d'expérience. Il s'agit de la composition du liant et de la qualité des granulats imposées, la justification par respect des limites de composition du béton, des épaisseurs d'enrobages fixées. Il faudrait connaître, entre autres, le rapport maximal eau/ciment, le dosage minimal en ciment et la teneur limitée en addition. Dans cette approche, il existe des limites imposées par la norme EN-206/CN et/ou prescriptions dans le choix des matériaux

L'approche dite performantielle consiste à substituer aux exigences, en termes de moyens, les performances basées sur des indicateurs généraux ou spécifiques de durabilité du matériau utilisé dans son environnement. La performance ciblée sont des propriétés physico-chimique relative à la durabilité du matériau dans son environnement. Mais d'autres propriétés peuvent également être ciblées (thermique, résistance en flexion...). L'Approche Performantielle est alors basée sur la détermination de la composition du béton, composition du liant et de la qualité des granulats non imposées, mais tout en sachant que les constituants du béton devraient être aptes à l'emploi. Cette deuxième approche doit également apporter des justificatifs par des essais de durabilité sur béton. Et les épaisseurs d'enrobages doivent être modulée. Dans l'Approche Performantielle, on évoque le concept de performance équivalente du béton ainsi que la méthode de conception performantielle. Tout ceci est basée sur la définition d'indicateurs.

Pour caractériser la durabilité d'un béton, qui est basée sur la Norme Européenne EN206/CN, on doit donc se référer sur des Indicateurs spécifiques applicables à tout type de béton, mais aussi à des Indicateurs spécifiques à un environnement donné, indicateurs basés sur des risques pathologiques.

Pour quantifier la durabilité d'un matériau ou d'une structure, il y a 2 notions importantes : les indicateurs de durabilité et les témoins de durée de vie. De ce fait, on fait des prélèvements en vue d'essais en laboratoire. On fait alors des essais de routine et des essais de dégradation accélérés.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** suivant résume la méthode basée sur une durabilité potentielle établie à partir de seuils d'indicateurs généraux ou de substitution.

Tableau 2 : Méthode basée sur une durabilité potentielle établie à partir de seuils d'indicateurs généraux ou de substitution[11]

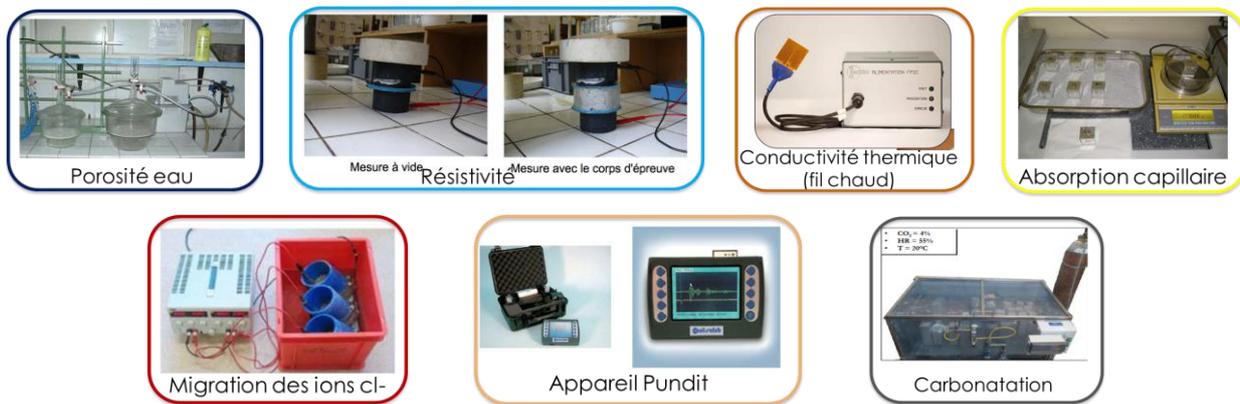
Durabilité potentielle →	Classes et valeurs limites				
	Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Porosité accessible à l'eau [%] $P_{eau}$	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Porosité mesurée par intrusion de mercure ( $P_{hg, max} = 400$ Mpa et prétraitement par étuvage à $T = 45^{\circ}C$ pendant 14 jours en présence de gel de silice) [%] $P_{hg}$		13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
Résistivité électrique [ $\Omega m$ ] $\rho$	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1 000	> 1 000
Coefficient de diffusion <i>effectif</i> des chlorures ( $10^{-12}.m^2.s^{-1}$ ) $D_{eff}$	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de migration ( $10^{-12}.m^2.s^{-1}$ ) $D_{app (mig)}$	> 50	10 à 50	5 à 10	< 5	
Perméabilité apparente aux gaz à $P_{entrée} = 0,2$ MPa et après étuvage à $T = 105^{\circ}C$ ) ( $10^{-18} m^2$ ) $K_{gaz}$	- 1 000	300 à 1 000	100 à 300	10 à 100	- 10
Perméabilité à l'eau liquide (à $P_{max}$ après saturation) ( $10^{-18} m^2$ ) $K_{liq}^{(*)}$	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Teneur en $Ca(OH)_2$ (% massique par rapport au ciment)	< 10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	≥ 25
Type de béton (indicatif et pour des formules simples)		B25 à B40	B30 à B60	B55 à B80	> B80

Dans ce tableau, on peut noter 5 classes de durabilité potentielle[12], à savoir :

- pour la barrière physique : porosité (porosité accessible à l'eau, porosité mesurée par intrusion de mercure) – résistivité électrique – diffusivité (coefficients de diffusion effectif et apparent) – perméabilité (perméabilité apparente aux gaz et perméabilité à l'eau liquide) ;
- pour la barrière chimique : teneur en  $Ca(OH)_2$

## **2. MATERIELS : LES EQUIPEMENTS MIS EN PLACE A L'IST-T**

Le LMDC de Toulouse[13] a partagé son expérience reconnue sur la durabilité des matériaux cimentaires (formulation, caractérisation, métrologie...). Les équipements à l'IST-t permettront de faire une caractérisation physico-chimique des matériaux de construction. De plus précisément, il s'agit d'appareils et de montages permettant de mesurer des indicateurs de durabilité du béton : porosité accessible à l'eau, résistivité électrique, absorption d'eau par capillarité, coefficient de diffusion des  $Cl^-$  apparent par migration, appareil Pundit, et carbonatation accélérée (Figure 3).



**Figure 3 : Equipements pour l'approche performantielle**

En parallèle, d'autres matériels permettent de caractérisation thermique pour l'habitat. Ces équipements sur la Conception bioclimatique, qui a fait également l'objet d'un stage auprès du laboratoire « Sustainable Buildings Design » de l'Université de Liège, Belgique. A cet effet, des thermomètres infrarouges, un appareil pour la mesure de la pluviométrie pour station météo, un anémomètre pour station météo, une conductivité thermique à fil chaud, des humidimètres-thermomètres sont déjà disponibles à l'IST-t (Figure 4).



**Figure 4 : Equipements pour la conception bioclimatique[6]**

L'ensemble des matériels de caractérisation permettront d'effectuer des enseignements sous forme de travaux pratiques ainsi que des recherches bénéficiant au réseau IST [14].

### **3. RESULTATS ISSUS DE CAS D'ETUDE REELS**

#### **3.1. Nouvelle Route du Littoral (PE Denis, 2018)**

La méthode utilisant l'Approche performantielle a été appliquée au chantier de la Nouvelle Route du Littoral (Ile de La Réunion) et explicitée dans le cadre du Projet National PERFDUB[15]. La Carte 1 suivante localise l'emplacement de ce chantier qui a été réalisée par Vinci Grand Projet.



Carte 1 : Localisation du chantier avec les vues 2D et 3D de l'ouvrage

Cet ouvrage comporte 50 appuis, 2 culées sur pieux et 48 piles avec des fondations superficielles de diamètre de 20 m. Un mur-test durabilité a été construit au droit de la pile du viaduc d'accès afin minimiser les prélèvements sur l'ouvrage (Figure 5). Ce mur est exposé aux embruns et aux éclaboussures. Les prélèvements effectués y sont schématisés.

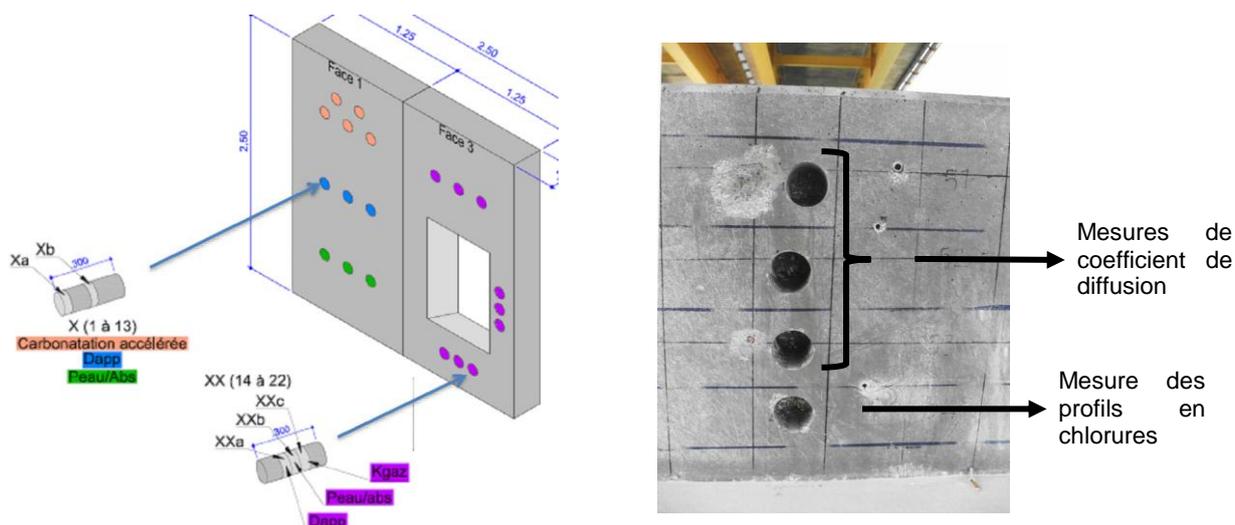


Figure 5 : Prélèvement des échantillons sur les éléments en fonction de leur exposition dans l'environnement

Les classes d'exposition sont basées sur la définition d'indicateurs, à savoir la comparaison avec des valeurs seuils[16], l'application du concept de performance équivalence[17] et l'utilisation de modèles décrivant les mécanismes de dégradation[18].

Le programme de recherche consiste à effectuer des prélèvements sur site par carottage afin d'appréhender la variabilité temporelle et spatiale de la mesure d'indicateurs de durabilité :  $p_w$ ,  $k_a$ ,  $Ab_w(t)$ ,  $D_{carb}(t)$ [15].

### **3.2. Bétons à fort dosage en addition minérale[12]**

Pour la seconde application, l'objectif des travaux de recherche est double. Il s'agit d'une part de la validation des bétons de bâtiment à fort dosage en addition minérale, par une approche performantielle répondant à la norme 206/CN et d'autre part, d'améliorer la pertinence de l'essai

performantiel associés au vieillissement accéléré par carbonatation des bétons. Les classes d'exposition étudiées sont la classe XC (corrosion induite par carbonatation) et la classe XD (corrosion induite par les chlorures). Ici, le programme expérimental consiste à :

- la comparaison avec des valeurs seuils : les indicateurs de durabilité généraux (Tableau 3) ;

**Tableau 3 : Protocole d'essai sur les indicateurs de durabilité généraux**

Type d'essai		Protocole d'essai
Porosité accessible à l'eau ( $P_w$ )	%	NF P 18 459
Perméabilité à l'oxygène ( $K_a$ )	$10^{-18} m^2$	NF P 18 463
Coefficient de migration ( $D_{nssm}$ )	$10^{-12} m/S$	NT BUILD 492
Teneur en Portlandite (CH)	%	LCPC M48

- l'application du concept de performance équivalence basé sur la carbonatation accélérée.

**Tableau 4 : Protocole d'essai sur le type de carbonatation**

Type de carbonatation	%HR	%CO <sub>2</sub>	Durée d'exposition	Protocole d'essai
Conditions d'accélération	50	4	70 jours	PrEN 12390-12

Le préconditionnement des échantillons est de 14 jours à 20 (°C) avec une humidité relative HR de 55%.

- et l'utilisation de modèles décrivant les mécanismes de dégradation selon la formule :

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot D_{CO_2}^0 \cdot P \cdot t}{R \cdot T \cdot \left(1 + \beta \cdot C_2 \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n\right) \cdot \left(\frac{\varphi_p \cdot C_2}{n+1} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}}\right)^n + Q_1\right)}}$$

#### 4. **DISCUSSION**

Les résultats expérimentaux de cette étude ont pu montrer, pour des bétons de bâtiment, certaines tendances :

- Au-delà du 20% MK, on observe une augmentation de la carbonatation ce qui signifie une baisse de la réserve en Portlandite.
- La porosité du béton de référence ( $14,1 \pm 0,1\%$ ) est légèrement plus faible que celle du béton avec addition de MK à 20% ( $15,5 \pm 0,3\%$ ). La classe de durabilité de ce dernier est donc potentiellement « faible ».
- La perméabilité apparente des bétons de référence ( $90 \pm 4 K_a$  (0,2 MPa)  $10^{-18}$ ) est légèrement plus faible que celle du MK à 20% ( $229 \pm 11 K_a$  (0,2 MPa)  $10^{-18}$ ). La classe de durabilité de ce dernier est potentiellement « moyenne ».

- Les coefficients de migration  $\text{Cl}^-$  sont comparables :  $18,75 \pm 0,1 [10^{-12} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}]$  pour le béton de référence contre  $21,57 \pm 1,7 [10^{-12} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}]$  pour le MK à 20%. La classe de durabilité de ce dernier est donc potentiellement « *faible* ».
- La teneur en Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est de 37,7% pour le béton de référence et de 13,0% pour le béton avec additions actives 20% de MK. La classe de durabilité du MK à 20% est potentiellement **au moins** « *faible* ».

Ainsi, pour la barrière physique, nous constatons une bonne performance de l'addition « actives » MK vis-à-vis des indicateurs de durabilité généraux caractérisant les réseaux poreux. Les hydrates néoformés par la réaction pouzzolanique augmentent la tortuosité et l'interconnectivité du réseau poreux[19] [20].

Pour la barrière chimique, une baisse de performances des additions « actives » vis-à-vis de la teneur en Portlandite est constatée. En effet, il y a consommation de la Portlandite engendrée par la réaction pouzzolanique.

En conclusion, l'incorporation d'additions minérales dans une matrice cimentaire défavorise la résistance à la carbonatation ; autrement dit, le MK à 20% est plus sensible à la carbonatation. Toutefois, le béton à qualifier MK20 se comporte aussi bien qu'une composition de référence. La réduction des émissions est d'autant plus significative que le taux de substitution du ciment Portland est plus élevé, soit 17% de réduction pour le MK à 20%. L'empreinte carbone diminue sans modification des propriétés de durabilité.

## **5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVE**

Pour conclure, l'IST-T peut améliorer ses capacités en matière de maîtrise de l'habitat dans l'enseignement et la recherche sur l'Approche Performantielle, les matériaux alternatifs et renouvelables ainsi qu'à la thermique de l'habitat. Le montage du laboratoire de caractérisation de matériaux sera effectif avec le concours du LMDC de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, qui, de par ses compétences, va permettre à la discipline Habitat, donc à l'IST-t :

- de développer les matériaux locaux de Madagascar, tels que le métakaolin (MK), les cendres de balle de riz (RHA), ... ;
- d'améliorer les performances (endommagement par rapport au Pundit) ;
- de transposer cette approche performantielle à d'autres propriétés thermiques par exemple ;
- de mettre en place des matériaux au village vert.

A plus long terme, le LMDC de l'Université Paul Sabatier de Toulouse III va toujours continuer sa collaboration avec l'IST-t en matière d'appui au fonctionnement et à la mise en place du nouveau laboratoire, d'encadrement de thèses en cotutelles...

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Bréchet Yves, *La science des matériaux : rendre les rêves possibles*. Ecole Polytechnique - Université Paris-Saclay, 2017.
- [2] Fleck N. A., Deshpande V. S., et Ashby M. F., « Micro-architected materials : past, present and future », *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 466, n° 2121, p. 2495-2516, 2010.
- [3] Wargnier H., Kromm F. X., Danis M., et Brechet Y., « Proposal for a multi-material design procedure », *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, p. 44-49, 2014.
- [4] Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil IREX, « Projet National PERFDUB », *PERFDUB*, 2019-2015. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.perfdub.fr/>.
- [5] AFNOR, « NF EN 206/CN - Décembre 2014 », déc-2014. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-206-cn/beton-specification-performance-production-et-conformite-complement-national-a-la-norme-nf-en-206/article/819603/fa185553>.
- [6] Razafinimanana M., « Projet MADEEHI - UE », 2016. [En ligne]. Disponible sur : <http://madeehi.univ-antananarivo.mg/Presentation-du-projet-MADEEHI>.
- [7] Cassagnabere F. *et al.*, « R-065 Base de données des indicateurs de durabilité des bétons développée par l'association Française de Génie Civil », *NoMaD 2018*.
- [8] Poize N. et Rüdinger A., « Projets citoyens pour la production d'énergie renouvelable : une comparaison France-Allemagne », *IDDR I Paper*, vol. 1, 2014.
- [9] Hendriks C. A., Worrell E., De Jager D., Blok K., Riemer et P., « Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry », in *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies*, 1998, p. 939-944.
- [10] Baroghel Bouny V., *Développement d'une approche globale, performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) sur la base d'indicateurs de durabilité : Bilan et perspectives : Caractérisation de la microstructure des bétons, étude des propriétés hydriques et de transport, évaluation des déformations libres et prédiction de la durée de vie des ouvrages*. LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC), 2008.
- [11] Baroghel-Bouny V. et Chaussadent T., « Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages », *Bulletin du Laboratoire Ponts et Chaussées*, vol. 248, p. 93-111, 2004.
- [12] Allahyari I., « Approche performantielle des bétons : vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité », Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2016.
- [13] LMDC, « Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions », 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/>.
- [14] « Projet MADEEHI - UE Village vert », 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://madeehi.univ-antananarivo.mg/Commune-Manandriana-Avaradrano-selectionnee-entant-que-projet-pilote-Village>.

- [15] Linger L. *et al.*, « Influence of aggregates porosity on concrete overall durability–outcomes of investigations carried out for the New Coastal Road on La Reunion Island major project », in *High Tech Concrete : Where Technology and Engineering Meet*, Springer, 2018, p. 2244-2255.
- [16] Baroghel-Bouny Arnaud V., Henry S., D., Caracasses M., et Quenard D., « Vieillissement des bétons en milieu naturel: une expérimentation pour le XXIe siècle. III-propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire », *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 241, 2002.
- [17] Rozière E., « Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle », Nantes, 2007.
- [18] Hyvert N., « Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton », Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [19] Kinuthia J. B. J. et Wild B. S. S., « Metakaolin–Pulverised Fuel Ash–Portland Cement Binders and Their Role in Mortar and Concrete », in *Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction : Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9-11 September 2002*, 2002, p. 159.
- [20] Batis G., Pantazopoulou P., Tsivilis S., et Badogiannis E., « The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars », *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, n° 1, p. 125-130, 2005.

## **REMERCIEMENTS**

Sincères remerciements au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, particulièrement à Franck Cassagnabère, Gilles Escadeillas, Myriam Carcassès, Marie-Pierre Cubaynes, I. Allahyari.

Merci également à l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo et à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

## ANNEXES

Selon la classe d'exposition identifiée pour l'élément étudié, la « prescription sur la formulation » est basée en terme de choix de constituants, de limite (min ou max), de teneur, de ratio, de teneur en air,.... Il existe une obligation de moyen (même philosophie que l'ancienne norme française NF X18-305).

Référence au Tableaux **NAF-1** et NAF-2 de l'Annexe Nationale française de EN 206-1 (2014).

Tableau 5 : Notion d'indicateurs de durabilité, NAF-1

		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	
		Rapport $E_{eff}/liant$ éq maximal <sup>c)</sup>	-	0,65	0,65	0,60	0,60
		Classe de résistance minimale	-	C20/25	C20/25	C25/30	C25/30
		Teneur mini en liant éq ( $kg/m^3$ ) <sup>c) d)</sup>	150	260	260	280	280
		Teneur minimale en air (%)	-	-	-	-	-
		Essai(s) de performances <sup>m)</sup>	-	-	-	-	-
Combinaison CEM I + addition	Rapport maximal A/(A+C) <sup>o)</sup>	Cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Fumées de silice	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		Métakaolin type A	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		Laitier moulu	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Addition calcaire catégorie A	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Addition calcaire catégorie B	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		Addition siliceuse de minéralogie QZ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Combinaison CEM I/IIA + addition	Rapport maximal A/(A+C) <sup>o)</sup>	Cendres volantes	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
		Fumées de silice <sup>q)</sup>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		Métakaolin type A <sup>q)</sup>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		Laitier moulu	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
		Addition calcaire catégorie A	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		Addition siliceuse de minéralogie QZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		Nature du ciment	-	-	-	-	-

Tableau 6 : Notion d'indicateurs de durabilité, NAF-2

Tableau NA.F.1 — Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition																				
	Classes d'exposition																			
	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures						Attaque gel / dégel				Environnements chimiquement agressifs				
						Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer											
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3 <sup>a) m)</sup>	XF1 <sup>b)</sup>	XF2 <sup>b)</sup>	XF3 <sup>b) c)</sup>	XF4 <sup>b) c)</sup>	XA1	XA2	XA3	
Rapport $E_{eff}/liant$ éq maximal <sup>d)</sup>	—	0,65	Valeurs numériques identiques à XC1 <sup>f)</sup>	Valeurs numériques identiques à XF1 <sup>f)</sup>	Valeurs numériques identiques à XF1 <sup>f) g)</sup>	Valeurs numériques identiques à XS2 <sup>f)</sup>	0,55	0,50	Valeurs numériques identiques à XF1 <sup>f)</sup>	0,55	0,50	0,60	0,55	0,55	0,45	0,55	0,50	0,45		
Classe de résistance minimale	—	C20/25					C30/37	C35/45		C30/37	C35/45	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur mini en liant éq (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>d) e)</sup>	150	260 <sup>h)</sup>					330	350		330	350	280 <sup>h)</sup>	300	315	340	330	350	385		
Teneur minimale en air (%)	—	—					—	—		—	—	—	4 <sup>i)</sup>	4 <sup>i)</sup>	4 <sup>i)</sup>	—	—	—		
Rapport maximal A/(A+C)	Cendres volantes	0,30					0,30	0,15		0,15	0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,15 <sup>j)</sup>	0,30 <sup>k)</sup>	0,30 <sup>k)</sup>	0,00	
	Fumées de silice	0,10					0,10	0,10		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10		
	Laitier moulu	0,30					0,30	0,15		0,15	0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,15	0,30 <sup>k)</sup>	0,30 <sup>k)</sup>	0,00	
	Addition calcaire	0,25	0,25	0,05	0,05	0,05	0,05	0,25	0,25	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00						
	Addition siliceuse	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20	0,05	0,00	0,00	0,00						
	Nature du ciment	—	—	PM <sup>l)</sup>	PM <sup>l)</sup>	—	—	—	—	—	m)	n)	n)	n)						