

CARACTÉRISATION DE LA VARIABILITÉ DES PERFORMANCES DES BÉTONS. APPLICATION À LA DURABILITÉ DES STRUCTURES

Stéphane POYET*, Jean-Michel TORRENTI**

* CEA, DEN, DPC, SCCME, Laboratoire d'Étude du Comportement des Béton et des Argiles,
F-91191 Gif sur Yvette Cedex, France.

** Université Paris Est, LCPC, Paris

Ce travail a été effectué dans le cadre du groupe de travail 1 du projet ANR APPLET, animé par S. Poyet et J.M. Torrenti. Les autres contributeurs à ce travail sont, par ordre alphabétique, K. Aït-Mokhtar, R. Belarbi, F. Benboudjema, N. Burlion, F. Cussigh, F. Deby, Th. De Larrard, F. Deleruyelle, F. Jacquemot, Ch. Gallé, J.F. Lataste, P. Le Bescop, M. Pierre, P. Rougeau, Th. Rougelot, A. Trabelsi, J. Semenadis, Ph. Turcrys,

d'organismes associés (EDF, IRSN, Syrokko), et de partenaires européens (l'IETCC - Espagne et CSTC - Belgique). Dans ce projet, le groupe de travail N°1 « Altération du béton : étude de l'interaction béton/environnement » a pour objectif de proposer une quantification de la variabilité des propriétés des bétons dans les structures et de la prendre en compte dans des approches probabilistes et non plus simplement déterministes (définition de critères d'états limites et de probabilité de dépassement acceptables de ces seuils) ceci pour une meilleure évaluation de la durabilité des structures. La variabilité des propriétés des bétons dépend de plusieurs facteurs : la variabilité des différents composants utilisés (figure 1), les conditions environnementales (figure 2) ou les conditions de mise en œuvre. La détermination de cette variabilité des bétons fait l'objet d'un programme expérimental portant sur un nombre important d'essais de caractérisation d'indicateurs de durabilité ou d'essais performantiels de durabilité. Ces essais portent sur la porosité à l'eau, la perméabilité au gaz, la résistance à la rupture en compression, le module élastique, l'isotherme de (première) désorption de la vapeur d'eau, la résistance à

1. INTRODUCTION

Le programme de recherche APPLET « Durée de vie des ouvrages : Approche Prédictive PerformantiELLE et probabilisTe » (Cremona 2009), a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche en 2007 pour une durée de 3 ans et bénéficie d'une labellisation du pôle de compétitivité ADVANCITY. Son consortium est composé du LCPC (pilote), d'entreprises (CERIB, LERM, Oxand, Vinci Construction), de laboratoires de recherche (CEA/LECBA, GHYMAC, LEPTIAB, LMDC, LML, LMT, LRMH),

la lixiviation accélérée (nitrate d'ammonium), la résistance à la carbonatation atmosphérique accélérée, le coefficient de diffusion des ions chlorures (essais de migration) et la résistivité électrique.

L'objet de cet article est de présenter les bétons étudiés et les premiers résultats obtenus par le projet.

2. LES BÉTONS

L'option retenue par le projet est la caractérisation de la variabilité de bétons mis en œuvre en conditions de chantier. Pour cela le projet bénéficie du support de Vinci Construction France pour la fourniture des éprouvettes. Les formulations des deux bétons retenus sont représentatives des formulations couramment utilisées aujourd'hui :

- un béton C50/60 de résistance caractéristique à la compression à 28 jours égale à 50 MPa, à base de ciment Portland (CEM I) avec addition de cendres volantes, utilisé pour la réalisation de la dalle séparant les deux voies de circulation du tunnel de l'A86 (ouest parisien) – figure 3;
- un C40/50 à base de ciment composé CEM III utilisé pour la réalisation des appuis (semelles, piles et chevêtres) du viaduc de Compiègne (nord parisien) – figure 4.

Les prélèvements ayant commencé plus tôt sur le premier chantier nous présentons ici uniquement des résultats obtenus à partir du 1^{er} béton.

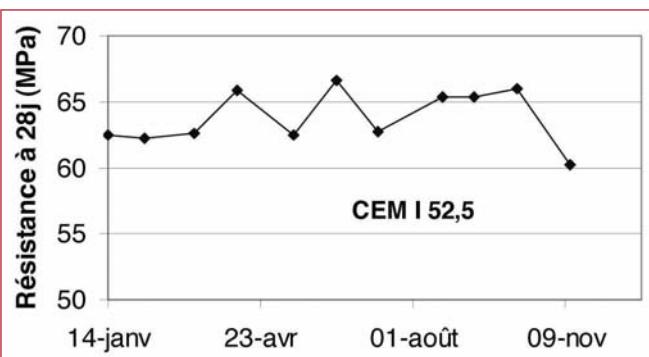


Figure 1. Exemple de variabilité de la résistance en compression d'un ciment CEM I sur une année (mesure à 28 jours).

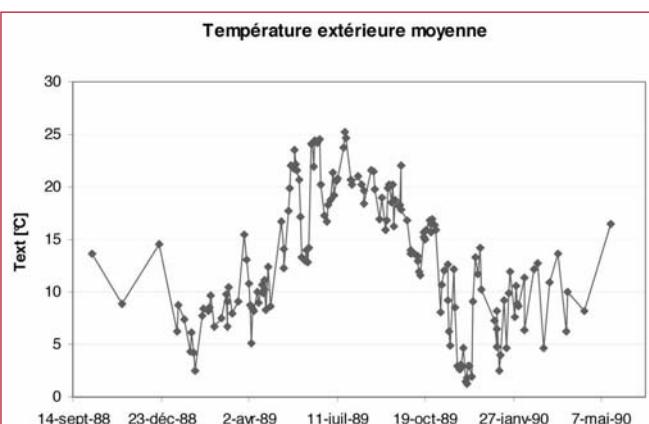


Figure 2. Exemple de variation de la température sur un site d'ouvrage d'art français.



Figure 3. Vue de la finition de la dalle médiane du tunnel de l'A86.

Les éprouvettes sont coulées à l'avancée sur les deux chantiers (utilisation des centrales à béton, coulage par les ouvriers du chantier). Elles sont ensuite conservées sous eau (cure normalisée) puis envoyées aux différents partenaires pour essais. Il est prévu 40 livraisons de lots d'éprouvettes par chantier correspondant à 40 gâchées différentes. En plus des éprouvettes moulées, des échantillons ont été prélevés par carottage sur des structures réelles (un voile expérimental et un chevêtre de démonstration pour les chantiers de l'A86 et du viaduc de Compiègne respectivement).



Figure 4. Vue du chantier du viaduc de Compiègne.

La figure 5 présente la distribution des résistances en compression du béton obtenue sur l'ensemble des éprouvettes (suivi du chantier + éprouvettes APPLET). L'écart-type est voisin de 5 MPa ce qui est l'ordre de grandeur de ce que l'on constate généralement sur les chantiers.

3. MESURE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION DES CHLORURES (ESSAIS RÉALISÉS AU LMDC TOULOUSE)

Le coefficient de diffusion est un paramètre fondamental pour décrire la pénétration des chlorures dans les maté-

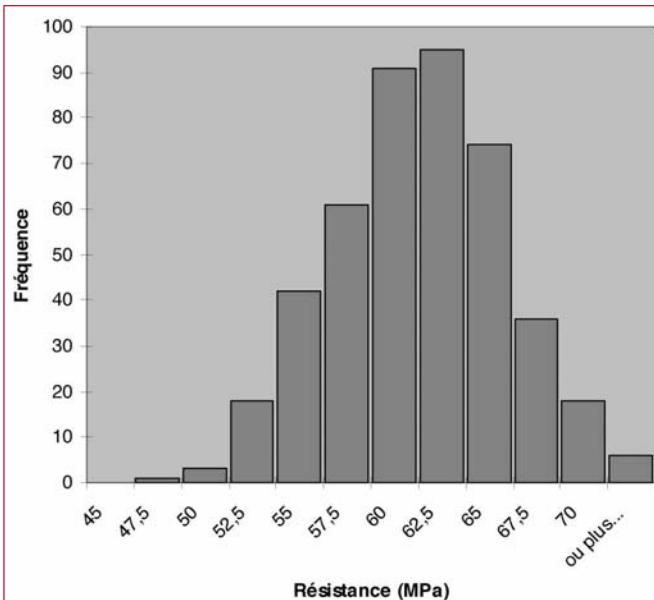


Figure 5. Histogramme des résistances en compression du béton du chantier de l'A86.

riaux cimentaires. Des essais de migrations ont été développés afin d'accélérer le transport des chlorures et d'obtenir une mesure rapide de ce paramètre. L'essai retenu dans le projet APPLET est celui développé par Tang et Nilsson (1992) et fait l'objet d'une norme dans les pays nordiques (NTBuild 492, 1999).

Le principe est d'appliquer une différence de potentiel de part et d'autre d'un échantillon de béton par l'intermédiaire d'électrodes. L'éprouvette de béton saturée est placée entre un compartiment amont, contenant la solution salée et la cathode (signe négatif), et aval, sans chlorures et contenant l'anode (signe positif). Sous l'effet du champ électrique, les chlorures migrent de la cathode vers l'anode. En régime transitoire, ils traversent l'échantillon en formant un front avançant à vitesse constante. L'essai est stoppé pendant cette période et la position du front de chlorures est mesurée pour en déduire le coefficient de diffusion.

Le compartiment amont contient une solution de chlorure de sodium à 10% en masse (environ 2 M ou 110 g/l) et en aval une solution d'hydroxyde de sodium à 0,3 M. L'éprouvette de béton est saturée à l'eau de chaux. Au début de l'essai, une différence de potentiel de 30 V est appliquée à l'échantillon de 5 cm d'épaisseur. La tension est ensuite ajustée en fonction de la qualité du béton de telle sorte qu'au bout de 24 heures (temps de l'essai), le front de pénétration n'atteigne pas l'extrémité de sortie de l'éprouvette. La qualité du béton est évaluée sur la base de la mesure du courant traversant l'échantillon à l'application des 30 V. A la fin de l'essai, l'éprouvette est rompue par fendage et la profondeur de pénétration des chlorures est mesurée par pulvérisation d'un révélateur, le nitrate d'argent. Le coefficient de diffusion obtenu noté Dnssm (non steady state migration) est un coefficient de diffusion apparent.

Les premiers résultats de mesure du coefficient de diffusion obtenus sur 30 éprouvettes du béton du chantier de l'A86 sont récapitulés sur la figure 6 sous forme d'histogramme. La moyenne est de $4,12 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et le coefficient de variation de 12,9%.

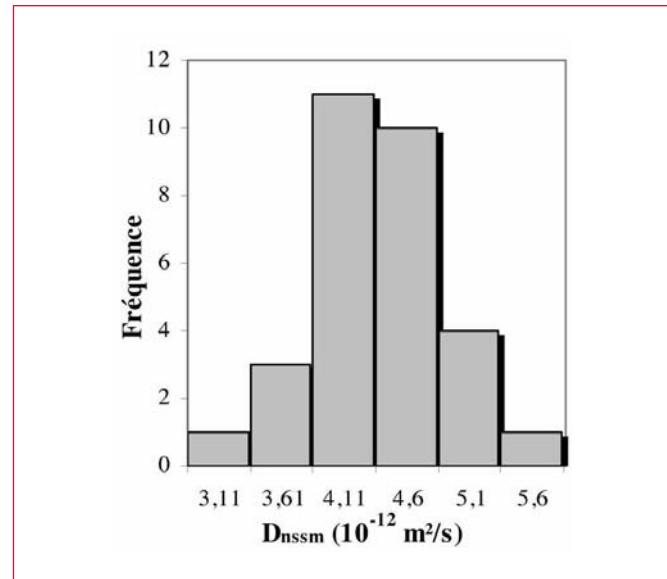


Figure 6. Histogramme du coefficient de diffusion des chlorures Dnssm.

4. ISOTHERMES DE DÉSORPTION (ESSAIS RÉALISÉS AU LEPTIAB LA ROCHELLE)

Les isothermes de sorption-désorption constituent une des caractéristiques intrinsèques principales des matériaux vis-à-vis des transferts hydriques. Elles permettent de fournir des informations utiles sur l'activité de l'eau à l'échelle porale du matériau. Elles sont définies par des courbes exprimant la teneur en eau à l'équilibre de l'échantillon en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant pour toute la plage d'humidité relative allant de 0 à 100%. La méthode retenue pour l'évaluation de ces courbes est basée sur une approche expérimentale gravimétrique (Belarbi *et al.*, 2006). Des échantillons initialement saturés ont été placés dans une ambiance isotherme où l'humidité relative de l'air ambiant est régulée à l'aide de solutions salines saturées. Pour chacun des paliers d'hygrométrie utilisés : 90,4%, 75,5%, 53,5%, 33%, 12% et 3%, un suivi régulier de l'évolution au cours du temps de la masse est réalisé jusqu'à obtention de l'équilibre hydrique, caractérisé par une masse de l'échantillon qui n'évolue plus.

Le protocole de saturation adopté consiste à conserver sous eau des éprouvettes cylindriques 11X22 cm pour une durée totale d'environ 4 mois. Elles sont sciées en disques de diamètre 11 cm et d'épaisseur $5 \pm 0,5$ mm. Les disques sont percés d'un trou de diamètre 4 mm permettant leur accrochage sous une balance d'une précision de $\pm 0,001$ g pour des mesures de masse ponctuelles à l'intérieur de l'ambiance régulée. Des exemples de résultats sont donnés par les figures 7 et 8. La figure 7 représente la variation relative de la masse en fonction du temps pour la gâchée 1 du chantier de l'A86. Il est important de relever le caractère lent des cinétiques de transfert hydrique. En effet, la durée totale de l'essai est d'environ 1 an. La durée nécessaire pour atteindre l'équilibre est variable d'un palier à un autre et dépend principalement des paramètres de transfert ainsi que du gradient d'humidité entre deux états d'équilibre. La figure 8 représente

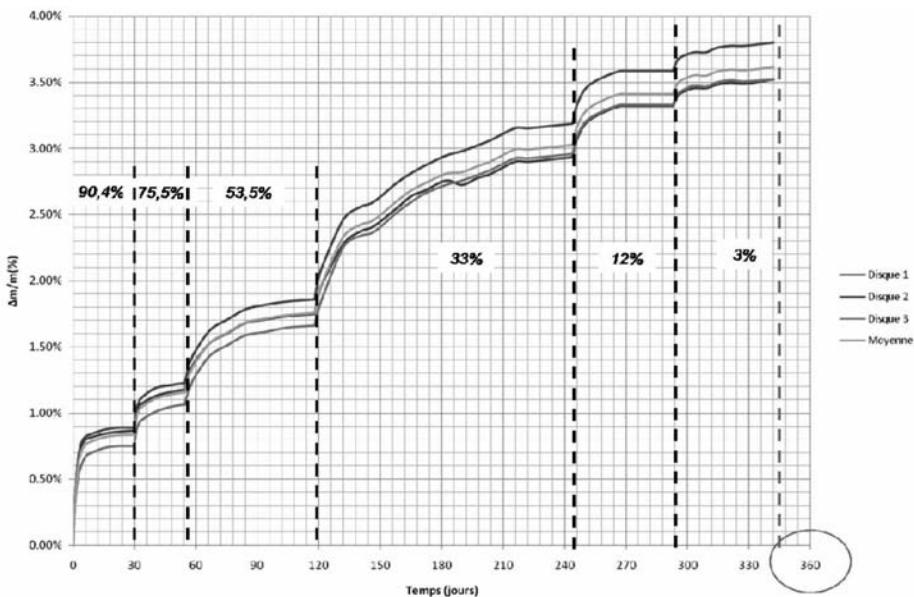


Figure 7. Résultats types du suivi de la masse relative en fonction du temps.

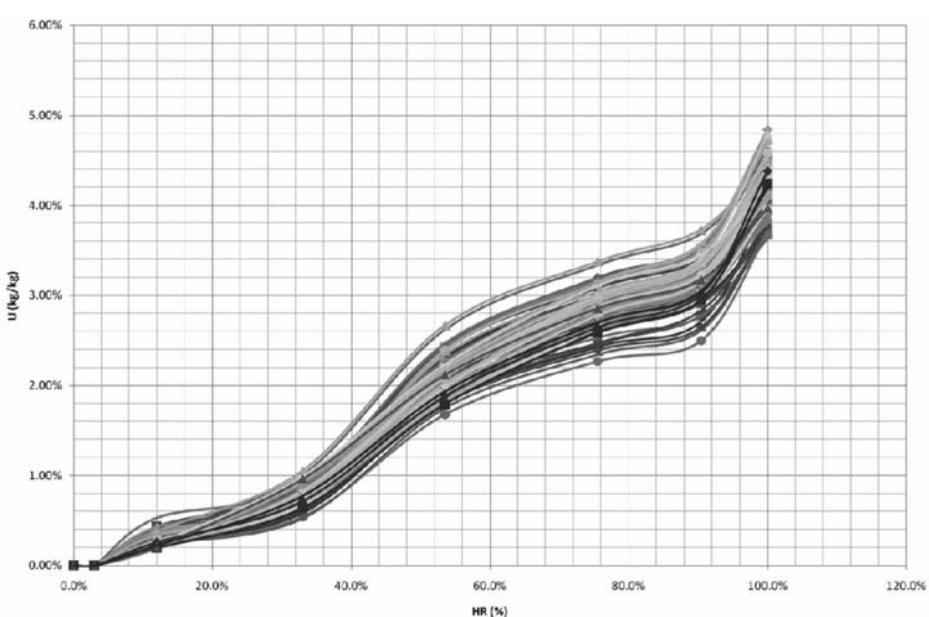


Figure 8. Isothermes de désorption de la vapeur d'eau pour les gâchées 1 à 10 du chantier A86.

l'isotherme de désorption pour les gâchées 1 à 10. Un faisceau de courbes traduisant la variabilité des différentes gâchées est obtenu. Ces résultats ont été comparés avec ceux issus de la littérature (Baroghel-Bouny *et al.*, 99) et des allures analogues avec notamment deux inflexions sont constatées.

5. CARBONATATION ACCÉLÉRÉE (ESSAIS RÉALISÉS AU CERIB)

Les essais de carbonatation ont été réalisés à partir de la méthode d'essai décrite dans le protocole AFGC-AFREM (conditionnement avant essai : conservation pendant 90 jours en eau de chaux puis 2 jours à 40°C). Toutefois les mesures effectuées sur les 30 premiers prélèvements de

béton du chantier du tunnel de l'A86 en respectant ce protocole n'ont pas permis de mesurer de profondeur de carbonatation (profondeur nulle). Pour les derniers prélèvements le protocole a donc été modifié pour se rapprocher de la norme XP P18-458 : conservation 90 jours en eau de chaux puis 14 jours à 45°C pour les échantillons. La figure 9 présente la distribution des profondeurs dégradées.

6. RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE (ESSAIS RÉALISÉS AU GHYMAC)

La résistivité électrique est aujourd'hui un paramètre mesuré sur les structures en béton dans le cadre de la caractérisation de la corrosion des aciers. Cependant, de par sa

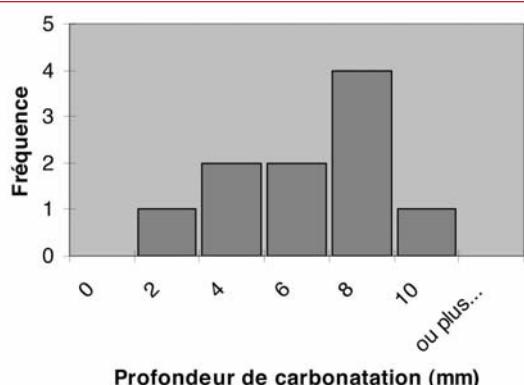


Figure 9. Histogramme des profondeurs dégradées.

dépendance à la porosité du matériau (Andrade et al., 2000), elle apparaît de plus en plus comme une grandeur pouvant servir d'indicateur de durabilité (Baroghel-Bouny, 2004). Les travaux entrepris dans le cadre du programme APPLET visent à évaluer la représentativité de la grandeur électrique pour décrire les propriétés du matériau.

Des mesures sont donc réalisées en laboratoire selon un protocole défini pour distinguer différents niveaux de variabilité. Ainsi la répétitivité de la mesure en laboratoire, et sa reproductibilité sont évaluées pour chaque échantillon. La variabilité du matériau au sein d'une gâchée (2 gâchées étudiées à partir de 20 éprouvettes par gâchée), ainsi que la variabilité du matériau au cours d'une année de coulage (2 formulations étudiées à partir de 40 prélèvements d'éprouvettes) vont être estimées.

Les éprouvettes sont étudiées à 90 jours, après avoir été conservées en saturation depuis leur coulage. Elles sont ensuite placées entre deux électrodes entre lesquelles circule un courant électrique d'intensité connue. Deux éponges assurent la qualité du couplage électrique électrode-béton et un poids constant garanti la reproduction des conditions de contact. La résistivité électrique de l'échantillon (en ohm.m) est calculée à partir de la mesure de la différence de potentiel créée par la circulation électrique dans le matériau.

De manière statistique sur cette série d'échantillon on obtient une valeur moyenne de résistivité de 166,9 ohm.m, avec une variabilité de 17,6% (évaluée comme le coefficient de variation sur la série des résistivités moyennes par échantillon – Figure 10). Cette valeur semble élevée mais, à ce stade de l'étude, elle est à comparer avec les variations des autres caractéristiques mesurées et présentées dans les autres parties de cet article. Le protocole de mesure a lui aussi été caractérisé et présente une reproductibilité de 1,5%, ce qui permet donc de dire que la variabilité liée au protocole de mesure est négligeable par rapport aux variations de résistivités observées sur différentes gâchées d'une même formulation de béton.

7. ANALYSE DE LA POROSITÉ (ESSAIS RÉALISÉS AU LML)

Une étude de la variabilité de la mesure de la porosité à l'eau est conduite sur des éprouvettes cylindriques (diamètre 36 mm, hauteur 74 mm) issues de carottages provenant des différents échantillons fournis. La détermination de la porosité s'effectue selon le protocole de mesure type AFGC-AFREM légèrement adapté (les éprouvettes conservées dans l'eau sont supposées saturées et il n'y a pas besoin de les saturer sous vide). Elle requiert la connaissance du volume des vides (mesuré par un séchage en étuve - températures retenues : 60, 90 et 105°C) ainsi que celle du volume de l'échantillon (mesuré par pesée hydrostatique). Les premiers résultats obtenus sont présentés au paragraphe suivant. Enfin, une détermination de la perméabilité au gaz par pulse-test est réalisée. Les protocoles détaillés sont consultables dans (Zhang, 2008).

L'analyse des premiers résultats issus des éprouvettes moulées du chantier de l'A86 met en évidence une porosité moyenne de 10,1% (moyenne de 39 échantillons issus par carottage de 8 éprouvettes moulées, étuvage à 60°C jusqu'à poids constant), et d'un écart-type de 0,65% incluant

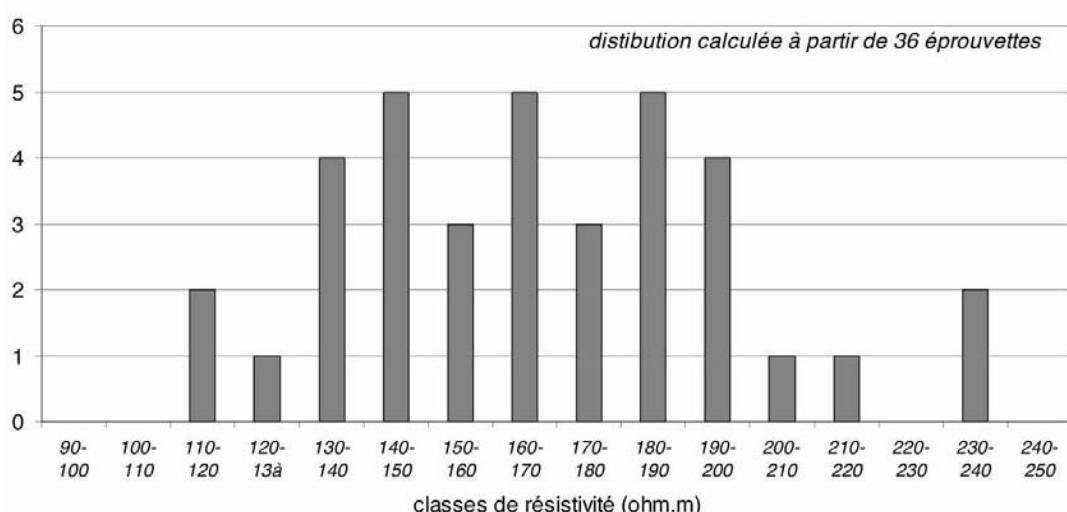


Figure 10. Distribution de la résistivité électrique pour le chantier de l'A86.

la variabilité liée à la méthode expérimentale et au matériau lui-même. En étudiant plus attentivement les porosités mesurées sur chacun des échantillons issus d'une même éprouvette moulée, une dispersion des résultats peut être remarquée. Celle-ci pourrait être liée en particulier à l'inhomogénéité du matériau au sein même de l'éprouvette moulée (vibration différente, effets de bords, ...). Ainsi, si l'on retient la valeur moyenne de la porosité des échantillons issus d'une même éprouvette comme valeur représentative de la porosité de l'éprouvette moulée, l'écart-type entre ces différentes éprouvettes chute à 0,32%. La détermination de la porosité du matériau requiert donc non seulement un nombre suffisant d'éprouvettes pour être représentatif, mais aussi un échantillonnage adéquat de cette dernière. Des travaux complémentaires sont actuellement en cours pour confirmer ces premiers résultats.

Enfin, l'influence du séchage réalisé en étuve est analysée, en soumettant les éprouvettes saturées à un séchage accéléré à des températures successives de 60°C, puis 90°C et 105°C (stabilisation en poids pour chaque palier), ou en les plaçant directement à 105°C tel que préconisé par le protocole AFGC-AFREM. La porosité mesurée augmente avec la température de séchage, comme cela pouvait logiquement être attendu, sans que l'écart type ni le coefficient de variation ne varient (Tableau 1). La température de séchage ne joue pas de rôle clair sur la dispersion des résultats. En revanche, le séchage direct à 105°C aboutit à une porosité moyenne de 12,2%, à comparer à celle de 11,5% pour les éprouvettes portées par étapes à 105°C. L'existence de gradients hydriques plus importants dans le cas du séchage direct à 105°C conduit à une fissuration plus importante du matériau. Ainsi, la porosité est mieux connectée, et

Température de séchage	60°C	90°C	105°C
Moyenne	10,1%	10,9%	11,5%
Ecart-type	0,65%	0,69%	0,75%
Coefficient de variation	6,44%	6,35%	6,49%
Minimum	8,5%	9,2%	9,7%
Maximum	11,8%	12,8%	13,6%

Tableau 1. Porosités et données statistiques issues des 39 éprouvettes cylindriques 36X74mm du chantier de l'A86 portées successivement à 60°C, 90°C et 105°C.

engendre probablement une vidange de certains pores restés occlus lors d'un séchage par paliers.

8. LIXIVIATION (ESSAIS RÉALISÉS AU LMT ET AU CEA)

Des essais de lixiviation accélérée dans une solution de nitrate d'ammonium 6 M sont également réalisés dans le projet APPLET en conditions extérieures (température variable). Ces essais sont en cours et seront présentés ultérieurement. En laboratoire, nous essayons en parallèle de quantifier la variabilité induite par les conditions expérimentales, à savoir les variations (saisonnieres) de température et les différences de protocoles expérimentaux. Concernant l'influence de la température, quatre températures sont testées : 5, 15, 25, 35°C. Les résultats des essais montrent que la dégradation peut être vue macroscopiquement comme un phénomène thermoactivé (thermoactivation d'Arrhénius, Figure 11a). La connaissance de l'évolution de la température réelle lors de la dégradation permet alors de calculer l'évolution de l'épaisseur dégradée et d'estimer l'erreur induite par les variations de température pour la première échéance (28 jours) lors de l'essai de dégradation accélérée en conditions extérieures (Figure 11b).

9. CONCLUSIONS

Le projet APPLET va permettre une estimation de la variabilité de plusieurs propriétés de bétons fabriqués en conditions de chantier. Nous avons présenté ici les premiers résultats concernant différents paramètres dont certains sont bien connus comme la résistance et d'autres beaucoup plus novateurs et correspondent à des indicateurs de durabilité comme la porosité et la résistivité ou à des sollicitations comme le séchage, la carbonatation et la lixiviation. L'analyse de ces résultats visera ensuite à mettre en évidence les corrélations éventuelles entre les différents paramètres et permettra d'alimenter une méthodologie de dimensionnement des ouvrages vis-à-vis de la durabilité.

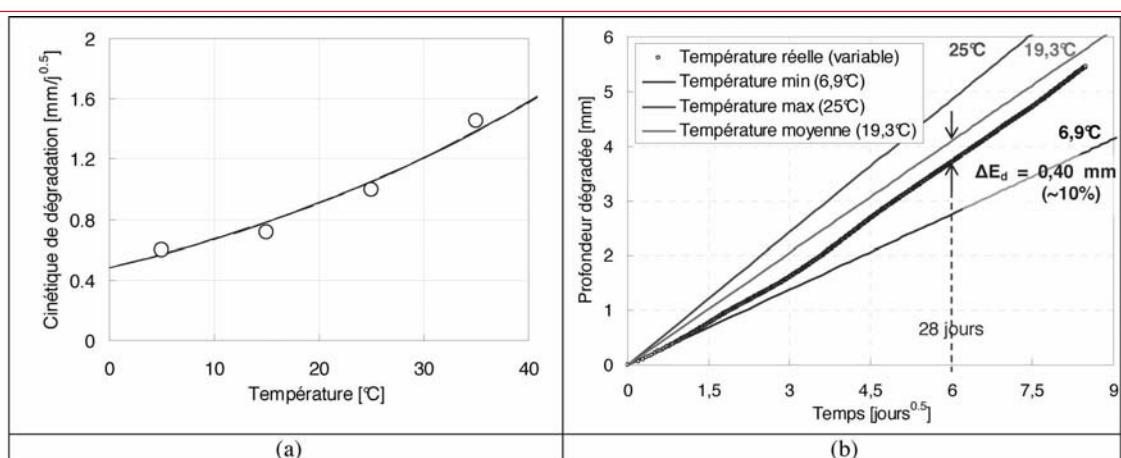


Figure 11. Thermoactivation de la dégradation (a) et estimation de la variabilité induite par la température (b).

10. REMERCIEMENTS

Les recherches et les résultats rapportés dans cet article bénéficient de l'aide apportée par l'Agence Nationale de la Recherche (France) dans le cadre du projet APPLET (contrat ANR-06-RGCU-001-01).

11. RÉFÉRENCES

- Andrade C, Alonso C, Arteaga A, Tanner P., 2000. Methodology based on the electrical resistivity for calculation of reinforcement service life. *5th CANMET/ACI International Conference*, 899–915.
- Baroghel-Bouny V., Mainguy M., Lassabatere T., Coussy O., 1999. Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, (29), 1225-1238.
- Baroghel-Bouny V., 2004. *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*. Documents scientifiques et techniques de l'AFGC, 252p.
- Belarbi R., Aït-Mokhtar A., Qin M., Omikrine O., 2006. Development of simplified approach to model the moisture transfer in building materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, (10)9, 1033-1048.
- NTBuild 492, 1999. *Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non steady state migration experiments*, Nordtest.
- Cremona C., 2009, Durée de vie des ouvrages : Approche prédictive, performante et probabiliste – Le projet APPLET, GC'2009, Cachan, 18-19 mars 2009.
- Tang L., Nilsson L.O., 1992. Rapid determination of chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, *ACI Materials Journals*, 49-53.
- Zhang F., 2008. *Analyse expérimentale de la variabilité de mesure dans les bétons*. Rapport de Master Recherche, Université des Sciences et Technologies de Lille.