

VERS UNE APPROCHE PROBABILISTE DE LA DURABILITÉ : APPLICATION AU CAS DE STOCKAGE DE DÉCHETS NUCLÉAIRES

Jean-Michel TORRENTI

Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN/DESTQ/DICST)
& ENS Cachan (LMT)

1. POUR UNE APPROCHE PROBABILISTE

Le béton est un matériau hétérogène, fabriqué sur chantier dans des conditions variables avec des matériaux variables. Il est donc inévitable de constater une fluctuation de ses caractéristiques comme la résistance en compression. Cet aspect est d'ailleurs pris en compte dans les règlements constructifs par la notion de résistance caractéristique.

Pour d'autres propriétés, comme celles liées à la durabilité, par exemple la diffusivité ou la perméabilité, il en est de même. Dans le cas de la durabilité, la fluctuation des sollicitations (conditions aux limites) s'ajoute d'ailleurs à celle concernant le matériau.

Lorsqu'une durée de vie très longue est espérée – typiquement 100 ans pour des ponts, 300 ans pour les stockages de surface de déchets nucléaires et plusieurs milliers d'années pour le stockage profond – il paraît donc logique que la prédiction de la durée de vie de ces structures intègre cet aspect probabiliste. Plusieurs articles récents utilisent d'ailleurs une telle approche (Prezzi *et al*, 96), (Schiessl *et al*, 97), (Enright *et al*, 98), (Gehlen *et al*, 99), (Vesikari, 2000), (Violetta, 2002), (Kong *et al*, 2002), (Kirpatrick *et al*, 2002), (Bentz, 2002), (Capra *et al*, 2004), (Duprat, 2004), (Silva, 2004), (Duprat *et al*, 2004).

L'objectif de cet article est, après un retour sur la résistance en compression, de montrer comment la prise en compte de la variabilité de la diffusivité influe sur la durabilité du béton à très long terme et de présenter quelques points sur lesquels la recherche doit encore porter.

2. RÉSISTANCE EN COMPRESSION ET PROBABILITÉ

2.1. Que dit la réglementation ?

Les règlements de calcul comme le BAEL ou l'EC2 prennent en compte la variabilité de la résistance du béton par le biais de la notion de résistance caractéristique. Celle-ci est un fractile 5% c'est à dire que 95% des échantillons fabriqués à partir de ce béton auront une résistance supérieure. L'EC2 ajoute une relation entre la résistance moyenne et la résistance caractéristique : $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$. Cette relation était déjà proposée dans les CEB-FIP Model Code 1990 et le CEB-FIP Model Code 1978 sans qu'il soit malheureusement possible de savoir comment elle avait été déterminée.

Si l'on suppose que la loi de distribution des résistances suit une loi normale, bien que cette hypothèse ne soit pas très physique puisqu'une loi normale correspond à des valeurs variant de $-\infty$ à $+\infty$, on a :

$f_{ck} = f_{cm} - \lambda \sigma$ où σ est l'écart type de la distribution ; or, pour un fractile 5%, $\lambda = 1,645$.

On a donc une loi normale de moyenne f_{cm} et d'écart type $\sigma = (f_{cm} - f_{ck})/\lambda = 8/1,645 = 4,86 \text{ MPa}$. On note que l'écart type est indépendant de la résistance. On peut donc ramener toutes les courbes de distribution à une courbe unique en effectuant le changement de variable qui permet d'obtenir une loi normale centrée réduite, c'est à dire de moyenne nulle et d'écart type égal à 1.

2.2. Comparaison avec des résultats sur chantier

La figure 1 présente deux exemples de distributions expérimentales des résistances. A partir de ces distributions on peut calculer la résistance moyenne, le fractile 5% et l'écart type. On peut également tester la normalité des distributions. Pour cela nous utilisons le test de Shapiro-Wilk.

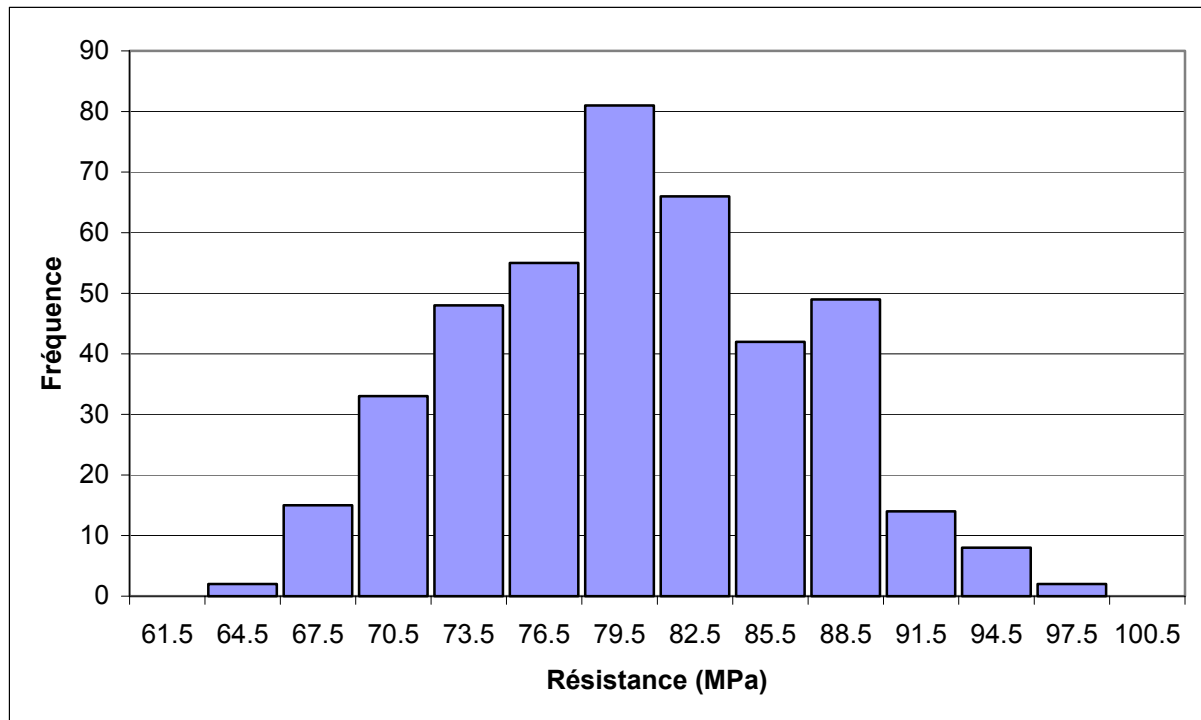


Figure 1.a) Histogramme des résistances mesurées sur les bétons des piles du viaduc de Millau (415 échantillons) – données fournies par Eiffage.

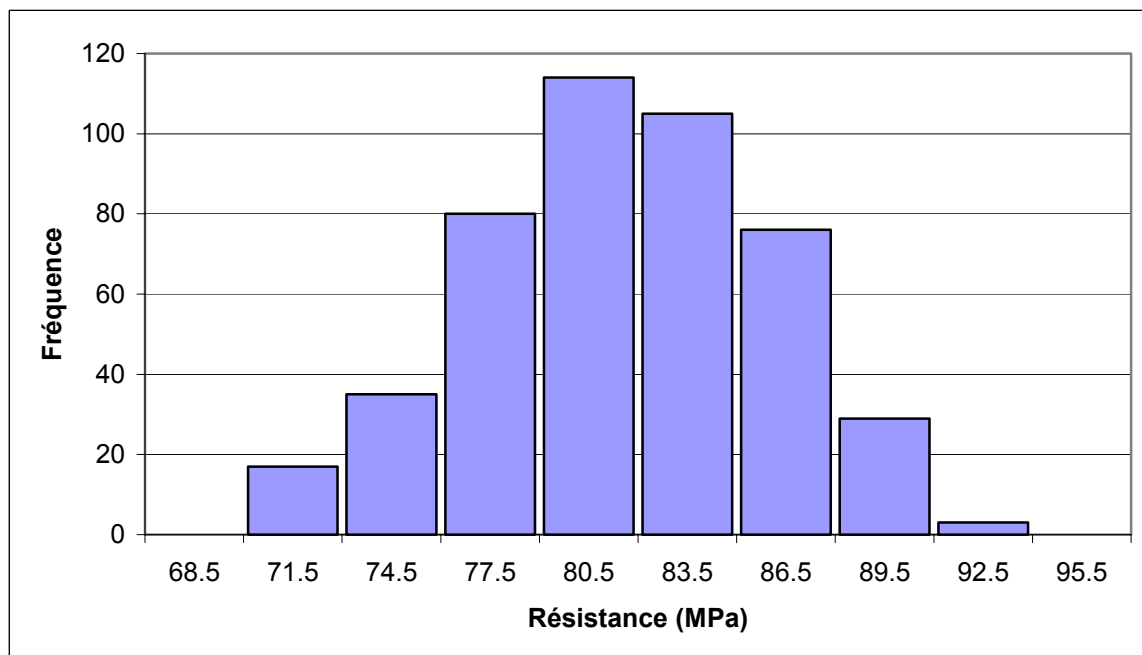


Figure 1.b) Histogramme des résistances mesurées sur les bétons du viaduc d'accès nord du pont de Normandie (459 échantillons) – données Campenon Bernard

Figure 1 : Exemple de distributions expérimentales des résistances.

Le tableau 1 présente les résultats obtenus sur plusieurs chantiers. L'analyse des résultats expérimentaux montre que la différence entre la résistance moyenne et le fractile 5% de la distribution expérimentale n'est pas très éloignée de la valeur proposée par l'EC2. D'autre part, les distributions expérimentales, si elle s'approchent de la distribution normale, ne sont en général pas normales au sens du test de normalité de Shapiro-Wilk.

	f_{cm} Moyenne	écart type	f_{ck} (fractile 5%)	$f_{cm} - f_{ck}$	nombre d'échantillons	normalité/test de Shapiro-Wilk
pont de Normandie – données Campenon	81,6	4,5	73	8,6	459	non
viaduc de Sylans (Cadoret et Richard, 92)	68,5	6,3	-	-	141	-
grande arche de la Défense (Cadoret et Richard, 92)	66,5	5	-	-	66	-
pont de l'île de Ré (Cadoret et Richard, 92)	67,7	6,3	-	-	798	-
viaduc de Millau B60 – données Eiffage	80,1	6,5	68,5	11,6	415	non
viaduc de Millau B35 – données Eiffage	49,3	3,9	41,5	7,8	87	oui
Centrale à béton B35 - données LR Clermont	44,4	4,8	36	8,4	410	non
pont de Tancarville (Dreux, 65)	46	5	36	10	147	non
Plate-forme de forage en mer (Neville, 2000)	55	3,26	48	7	493	non
EC2	-	4,9	-	8	-	-

Tableau 1 : Analyse des résultats expérimentaux de différents chantiers

La figure 2, où l'on compare les distributions expérimentales de 3 chantiers avec la distribution normale suivant les hypothèses de l'EC2, confirme ces résultats. En conséquence, on aura toujours intérêt à utiliser les résultats expérimentaux lorsqu'ils sont disponibles mais, en première approche, la loi normale, avec les hypothèses de l'EC2, pourra être utilisée pour des calculs prédictifs.

3. DURABILITÉ ET PROBABILITÉ

Nous allons traiter ici le cas de la durabilité des structures en béton dans le cas des stockages de déchets nucléaires mais l'approche développée pourrait s'appliquer aussi aux cas de la carbonatation ou de la pénétration des chlorures et donc à la corrosion des armatures. On notera d'ailleurs que l'EC0 indique qu'il "est loisible de baser directement le dimensionnement sur des méthodes probabilistes" et fixe des valeurs cibles de probabilité d'occurrence des états-limites pour la durée de vie des ouvrages.

3.1 Hypothèses

Dans le cas des stockages de déchets nucléaires une des sollicitations type à laquelle est soumis le béton est la lixiviation par une eau pure. En effet, l'eau interstitielle du béton ayant un pH très basique le contact avec une eau pure est ressenti par le béton comme une attaque acide. Il y a alors dissolution progressive des hydrates, en commençant par la portlandite (Adenot, 92). Cette agression est cependant très lente et peut souvent être négligée dans le cas des structures classiques du génie civil¹ (Bournazel *et al*, 98). Pour les stockages de déchets nucléaires, compte tenu de la durée de vie visée, cette sollicitation devient importante.

¹ Même s'il existe quelques cas, de conduites forcées notamment, où des eaux très pures, de fonte des neiges en particulier, ont pu lixivier des bétons.

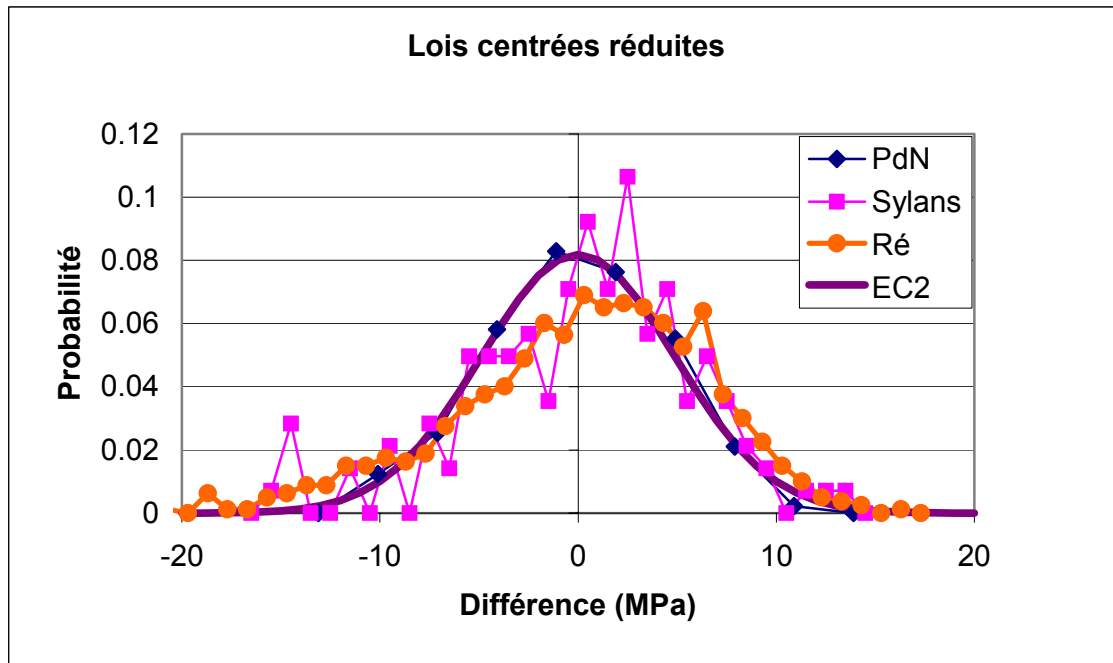


Figure 2 : Comparaison expériences – loi normale centrée réduite avec hypothèse de l'EC2 ;
Les résultats expérimentaux sont ceux du pont de Normandie, du viaduc de Sylans et du pont de l'île de Ré.

Les résultats expérimentaux montrent que la profondeur dégradée correspondant au front de dégradation de la portlandite, x_d , est proportionnelle à la racine carrée du temps (Adenot, 92), (Bourdette, 94), (Gérard, 96), (Carde, 96), (Tognazzi, 98), (Torrenti *et al*, 99), (Le Bellego, 2001), (Kamali, 2003), (Nguyen *et al*, 2005). En général, les modèles prédictifs pour la lixiviation sont déterministes. Mais, il n'y a pas de raison que le coefficient de proportionnalité $k = x_d / \sqrt{t}$ soit constant. On sait par exemple que la profondeur lixiviée d'une pâte de ciment à une échéance donnée est fonction du rapport e/c (Kamali, 2003). Malheureusement, nous ne disposons pas de données sur la variabilité naturelle du paramètre k. Les essais de lixiviation, étant assez longs, ne sont pas répétés comme les essais de compression.

Faute de résultats expérimentaux, nous faisons ici une hypothèse forte : on suppose que k est une fonction de la résistance du béton f_c et varie comme la racine carrée du coefficient de diffusion du matériau sain.

Cette hypothèse peut se justifier car :

- si le coefficient de diffusion du matériau dégradé était constant et égal à D, la résolution de l'équation de diffusion montre que l'on aurait k proportionnel à $\sqrt{D}$;
- dans toutes les modélisations simplifiées de la lixiviation, la diffusivité du matériau dégradé est une fonction de D_0 diffusivité du matériau sain.

Cette hypothèse devra surement être rediscutée sur la base de résultats expérimentaux car, si la diffusivité du matériau dégradé dépend de D_0 , elle dépendra aussi d'autres facteurs comme la porosité ou la composition initiale du matériau (Kamali, 2003). Et il y a peu de chances que, sur un chantier, tous ces facteurs ne varient pas en même temps.

Il faut maintenant déterminer comment peut varier la diffusivité du matériau sain. Des essais de diffusivité (Rollet *et al*, 92) montrent que, pour des bétons composés des mêmes matériaux, la diffusivité suit une loi du type :

$$D = D_0 \exp(-a f_c) \text{ (figure 3).}$$

Les paramètres D_0 et a de cette relation seront certainement différents si l'on change de matériaux mais sont raisonnables pour un chantier donné où la formulation serait inchangée.

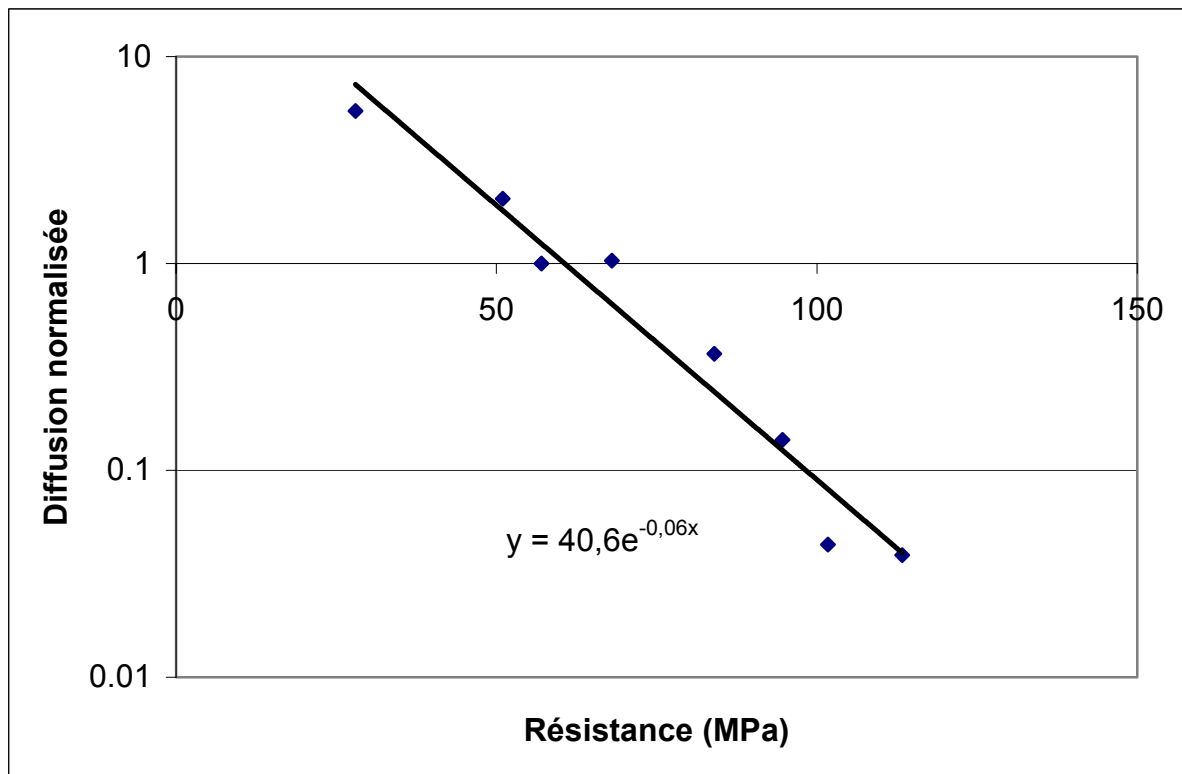


Figure 3 : Détermination de la relation $D = D_0 \exp(-a f_c)$ à partir de résultats expérimentaux (Rollet *et al*, 92). La diffusivité est normalisée à 1 pour $f_c = 57$ MPa.

3.2 Applications

3.2.1 Calcul déterministe

La valeur de k est calée sur les observations expérimentales faites sur un béton de résistance voisine de 40 MPa dégradé de manière accélérée dans une solution au nitrate d'ammonium (Nguyen *et al*, 2005). A l'aide des résultats de Kamali (Kamali, 2003), on sait passer à la profondeur dégradée dans une eau déionisée. Ainsi on obtient $k = 0,195 (D(f_c)/D_0)^{0,5}$.

On calcule alors la profondeur dégradée au bout de 300 ans. Le calcul déterministe donne une profondeur dégradée égale à 87,6 mm.

3.2.2 Approche probabiliste

Pour l'approche probabiliste, on utilise une méthode de type Monte Carlo, avec un échantillonnage selon la méthode des hypercubes latins, en supposant que la résistance suit une loi normale du type EC2 ($f_{cm} = 40$ MPa, $\sigma = 4,86$ MPa) l'ensemble des autres paramètres étant déterministe.

Les résultats obtenus (figure 4) montrent, d'une part, que la dégradation moyenne est égale à 88,6 mm ce qui est proche de la valeur déterministe obtenue avec la résistance moyenne. On constate, par contre, que la distribution des profondeurs dégradées est étendue. La valeur déterministe ne correspond donc qu'à une

borne supérieure pour environ 50% des bétons. Une valeur caractéristique, le fractile 95% par exemple, serait plus pertinente et évidemment supérieure à la valeur déterministe (ici ce fractile est égal à 111,8 mm)².

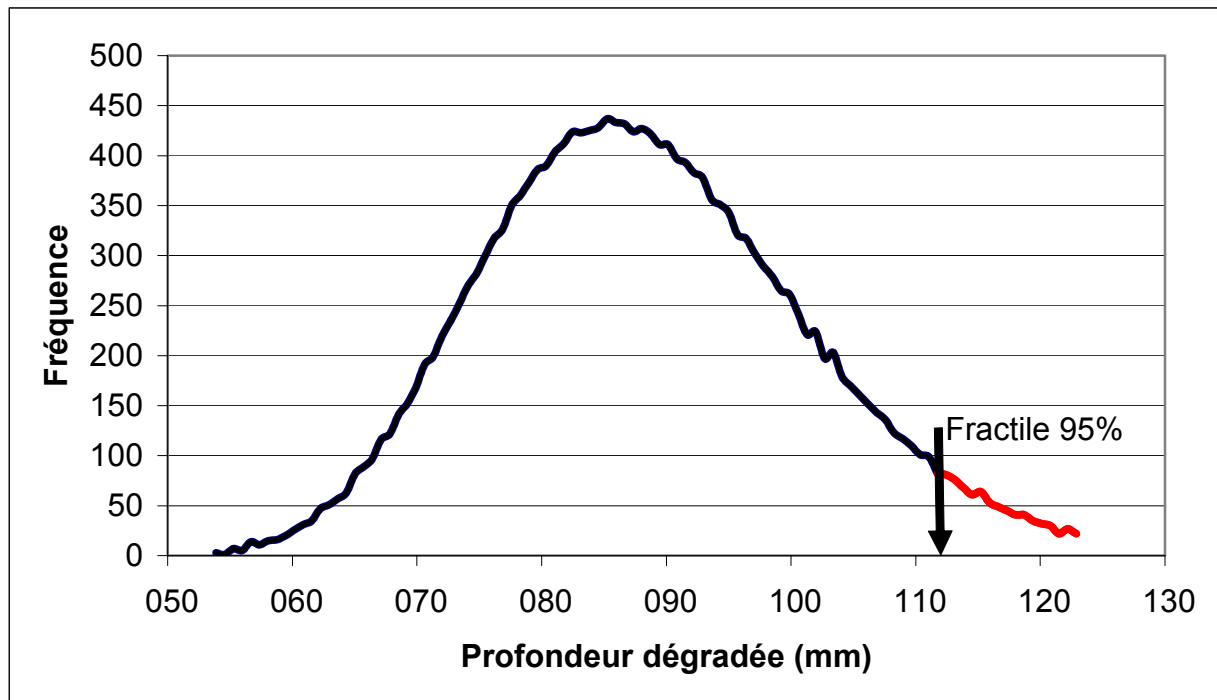


Figure 4 : Distribution des profondeurs dégradées au bout de 300 ans. La résistance du béton suit une loi normale de moyenne $f_{cm} = 40$ MPa et d'écart-type $\sigma = 4,86$ MPa.

4. CONCLUSIONS

Cet article présente une approche probabiliste de la durabilité. Cette approche paraît nécessaire si l'on veut prévoir la durée de vie de structures comme les stockages de déchets nucléaires sur de très longues durées. L'application présentée ici n'était que qualitative compte tenu des hypothèses sur la variation de la diffusivité. Une investigation expérimentale, en liaison avec un chantier et qui intégrerait donc les aléas d'une fabrication in-situ, permettrait d'obtenir un jeu de données fiable. Elle permettra aussi de valider ou de modifier les hypothèses de la modélisation.

L'approche utilisée a montré (avec nos hypothèses) :

- que la valeur moyenne obtenue par l'approche probabiliste n'est pas très éloignée de la valeur déterministe correspondant à la résistance moyenne;
- qu'il serait pertinent d'introduire une valeur caractéristique de la profondeur dégradée, le fractile 95% par exemple, valeur correspondante à la résistance caractéristique dans notre approche.

Enfin, certains points qui n'ont pas été abordés ici devront sans doute l'être dans le futur :

- quelle est la représentativité des éprouvettes de contrôle par rapport au béton in-situ ?
- faut-il relier le paramètre pilotant la durabilité à la résistance en compression ou à un autre paramètre comme la porosité ou la résistivité par exemple ?

² On notera que, dans notre approche très simple, il était possible de calculer directement le fractile à 95% de la profondeur dégradée car il correspond au fractile à 5% de la résistance soit en fait à la résistance caractéristique, 32 MPa dans le cas étudié.

- comment peut-on systématiser la mesure de la dégradation sur ouvrage afin d'intégrer des approches Bayésiennes dans la prédiction et d'améliorer la prévision de la durée de vie ? (voir un exemple dans (Capra *et al*, 2004).

RÉFÉRENCES

- F. Adenot, "Durabilité du béton : caractérisation et modélisation des processus physiques et chimiques de dégradation du ciment", thèse de l'Université d'Orléans, 1992.
- C. Le Bellego, "Couplage chimie-mécanique dans les structures en béton attaquées par l'eau: étude expérimentale et analyse numérique", thèse de l'ENS Cachan, France, 2001.
- E. C. Bentz, "Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides", ACI Materials journal, september-october 2003.
- B. Bourdette, "Durabilité du mortier : prise en compte des auréoles de transition dans la caractérisation et la modélisation des processus physiques et chimiques d'altération", thèse de l'INSA de Toulouse, 1994.
- J.P. Bournazel, F. Boutin, N. Rafai, "Les analogues anciens et l'analyse inverse pour la durabilité des bétons", revue française de génie civil, vol.2 – n°3, 1998.
- G. Cadoret, P. Richard, "Utilisation industrielle des bétons à hautes performances dans le bâtiment et les travaux publics", in "Les bétons à hautes performances", Presses des Ponts et Chaussées, 1992.
- B. Capra, K. Li, V. Wolff, O. Bernard, B. Gérard, "A risk management process for reinforced concrete structures by coupling modelling, monitoring and Bayesian approaches", OECD Workshop on Long term behaviour of concrete structures, Madrid 2004.
- C. Carde, "Caractérisation et modélisation de l'altération des propriétés mécaniques due à la lixiviation des matériaux cimentaires", thèse de l'INSA de Toulouse, 1996.
- G. Dreux, "Contribution à l'étude du comportement des éprouvettes de béton", Annales de l'ITBTP, N°206, février 1965.
- F. Duprat, "Analyse probabiliste de la fiabilité des poutres en béton armé corrodées", Revue Française de Génie Civil, Volume 8 – n°2-3, 2004.
- F. Duprat, A. Sellier, L. Lacarrière, "Evaluation probabiliste du risque de corrosion par carbonatation", Revue Française de Génie Civil, Volume 8 – n°8, 2004.
- M.P. Enright, D.M. Frangopol, "Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion", Engineering Structures, vol. 20, N°11, 1998.
- Gehlen C., Schiessl P., Probability-based durability design for the Western Scheldt Tunnel, Structural concrete, Journal of the FIB, vol. P1, n° 2, june 1999, pp 1-7.
- B. Gérard, "Contribution des couplages mécanique-chimie-transfert dans la tenue à long terme des ouvrages de stockage de déchets radioactifs", thèse de l'ENS Cachan, 1996.
- S. Kamali, "Comportement et simulation des matériaux cimentaires en environnement agressifs : lixiviation et température", thèse de l'ENS Cachan, 2003.
- T.J. Kirpatrick, R.E. Weyers, C.M. Anderson-Cook, M.M. Sprinkel, "Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks", Cement and concrete research 32, 2002.
- J.S Kong, A.N. Abadneh, D.M. Frangopol, Y. Xi, "Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete", Probabilistic Engineering Mechanics 17, 2002.
- A.M. Neville, "Propriétés des bétons", Eyrolles, 2000.
- V.H. Nguyen, B. Nedjar, H. Colina, J.M. Torrenti, "A separation of scales homogenization analysis for the modelling of calcium leaching in concrete", accepted by Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005.
- M. Prezzi, P. Geyskens, P.J.M. Monteiro, "Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to marine environments", ACI Materials Journal, November-december, 1996.
- M. Rollet, C. Levy, F. Chabanis, "Physical, mechanical and durability characteristics of various compressive strength concretes", Canmet/ACI conf on advances in concrete technology, Athens, 1992.
- Schiessl P., Hergenröder M., Künzel H.M., Möller J.S., Nilsson L.O., Siemes T., New approach to durability design - An example for carbonation induced corrosion, CEB Bulletin, n° 238, 1997, 138 p.
- R. de C. Silva, "Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé", thèse de l'ENPC, 2004.
- C. Tognazzi, "Couplage fissuration - dégradation chimique dans les matériaux cimentaires : caractérisation et modélisation", thèse de l'INSA de Toulouse, 1998.
- J.M. Torrenti, O. Didry, J.P. Ollivier, F. Plas, "La dégradation des bétons", éditions Hermes, 1999.
- Vesikari E., Estimation of service life of concrete facades by the factor approach, Proceedings of the International RILEM Workshop "Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures" (Ed. by D.J. Naus, RILEM, 2000), pp 15-23.
- B. Violetta, "Life-365 service life prediction model", Concrete international, december 2002.