

# Protection des éprouvettes de béton vis-à-vis de la dessiccation

## Le point sur quelques techniques de laboratoire

François TOUTLEMONDE  
Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Docteur de l'ENPC

Fabrice LE MAOU  
Technicien supérieur

Division Bétons et ciments pour ouvrages d'art  
Section Comportement mécanique et modélisation  
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

### RÉSUMÉ

Cet article décrit une étude expérimentale visant à comparer et quantifier diverses méthodes de protection du béton vis-à-vis de la dessiccation, par des pesées d'éprouvettes conservées dans des conditions contrôlées. Les pesées se sont échelonnées dans le temps pendant plus d'un an.

Les applications directes de cette étude concernent notamment la protection des éprouvettes de traction et celle des éprouvettes de retrait ou de fluage. On quantifie ainsi les échanges réduits en cas d'application d'une ou de deux couches d'aluminium autoadhésif, tandis que la résine époxy utilisée comme primaire d'accrochage s'avère insuffisamment étanche vis-à-vis de la vapeur d'eau.

Des simulations réalisées grâce au module HEXO de CESAR-LCPC permettent de valider l'interprétation et d'extrapoler les résultats à d'autres types d'éprouvettes.

**MOTS CLÉS :** 32 - Protection - Éprouvette - Béton hydraulique - Séchage - Méthode - Évaluation - Mesure - Poids - Aluminium - Résine époxyde - Conservation - Simulation - Modèle numérique - Essai - Traction - Fluage.

### Objectifs de l'étude

#### Protéger le béton de la dessiccation

Depuis de nombreuses années [1], l'analyse du comportement mécanique des bétons a mis en évidence le rôle crucial que joue la présence d'eau, et en particulier d'eau libre (non liée chimiquement), au sein de ces matériaux dont notamment la phase liante (pâte de ciment durcie) recèle une porosité importante [2].

Or le déséquilibre initial entre un béton saturé d'eau au moment de son gâchage, et le milieu environnant, conduit généralement, malgré la consommation d'eau liée aux réactions internes d'hydratation, à un déséquilibre hydrique entre l'intérieur et l'extérieur du matériau [3]. Il s'ensuit un séchage dont le temps caractéristique, lié à l'épaisseur des pièces et à la perméabilité (faible) du matériau, est généralement du même ordre de grandeur que l'âge des structures, ou même des éprouvettes de laboratoire considérées.

Si l'on ne prend pas de précautions, un élément de béton se trouve donc toujours en situation de séchage, c'est-à-dire hors d'équilibre, d'où un état de contraintes auto-équilibrées mais inhomogène, et une répartition non uniforme de l'humidité relative au sein du matériau qui pourra entraîner l'inhomogénéité du phénomène physique qu'on cherche à étudier. On connaît en effet maintenant l'influence de la présence ou non d'eau libre au sein du réseau poreux du béton, que ce soit sur les déformations différées (fluage [4] et retrait [5]), sur le comportement vis-à-vis de la propagation des fissures [6], ou sur le comportement à haute vitesse [7], et la liste n'est pas exhaustive même si, pour la caractérisation mécanique conventionnelle du béton, on évite le plus souvent le problème en conservant les éprouvettes

dans l'eau [8], [9] et [10] - ce qui n'est qu'assez rarement compatible avec certaines contraintes d'essai ultérieures, et conduit parfois, pour les bétons à très hautes performances, sujets à une autodesiccation intense, à un déséquilibre inverse avec absorption de l'eau extérieure par le béton [11].

Donc, notamment au laboratoire, on peut avoir besoin de conserver les éprouvettes dans un état hydrique homogène, pour mettre en évidence des phénomènes physiques fondamentaux au sein du matériau, ou par souci d'éliminer un artefact important lié à l'inhomogénéité de la teneur en eau et à ses conséquences. La procédure de référence la plus facile à mettre en œuvre est alors de protéger, le plus hermétiquement possible, les corps d'épreuve, dès leur coulage, leur démoulage ou leur carottage, vis-à-vis du séchage. D'un point de vue pratique, au Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC), le problème a principalement été rencontré pour la caractérisation en traction directe (statique et dynamique) [7], et pour ce qui concerne le comportement différé des bétons et pâtes de ciment [3].

### Moyens de protection

Le problème, connu depuis longtemps, a, jusqu'ici, trouvé des réponses essentiellement technologiques dont la vérification quantitative pour des éprouvettes de béton n'apparaît pas toujours évidente à la lecture de la (rare) bibliographie sur le sujet, comme s'il s'agissait de « secrets de laboratoire » bien gardés. Il est vrai que les matériaux susceptibles de former une enveloppe étanche à l'eau, non seulement liquide, mais sous forme de vapeur, sont particulièrement rares, du fait de la petite taille de la molécule d'eau. Classiquement, on s'est orienté vers les résines, notamment époxy. Ces matériaux sont en effet très étanches à l'eau sous forme liquide, et s'appliquent directement sur béton humide. La technique utilisée jusqu'il y a moins de dix ans consistait en une enduction de trois couches successives de résines époxy, de marque ® Éponal 336 (une couche) et ® Éponal 311 (deux couches). Cette technique a l'avantage de constituer une couche d'étanchéité solidaire du béton support, de faible déformabilité, permettant donc une visualisation des fissures, ce qui la rend irremplaçable dans certains cas [7] et [12]. Néanmoins, elle présente des inconvénients de lourdeur de mise en œuvre (gestion des délais de séchage entre les couches, émanations...) et son efficacité n'est pas confirmée sur le très long terme.

C'est notamment pour ces raisons qu'a été adoptée au LCPC, notamment pour les éprouvettes de retrait ou de fluage, la technique de l'aluminium autoadhésif. La feuille métallique constitue en effet une barrière potentiellement très efficace, pourvu

qu'elle soit correctement plaquée contre le béton, et ne présente pas de risque de dégradation en cas de contact avec le béton (ce qui est le cas avec les feuilles généralement utilisées au LCPC, de marque SABA - réf. 335, l'épaisseur de l'aluminium étant de 50 micromètres et la masse adhésive acrylique). La répétition de l'opération (deux couches), en décalant les joints de recouvrement de la feuille d'aluminium, permet bien évidemment une meilleure protection, en prévenant les risques de fuite par déchirure de la feuille métallique ou par mauvais recouvrement. Il a ainsi été démontré que cette technique donnait des résultats au moins aussi bons que l'enduction traditionnelle de résine [13], d'où son utilisation de plus en plus fréquente.

La nécessité de coller les éprouvettes par les faces, ou de les instrumenter, notamment pour les essais de traction, a conduit cependant à modifier la méthode de protection, en intercalant, entre l'éprouvette de béton et l'aluminium autoadhésif, un film plastique de type film alimentaire, permettant d'ôter facilement la protection localement, au cutter, pour les besoins du collage de jauges ou du collage des faces. Pour effectuer les collages dans les zones humides ainsi dénudées, un primaire d'accrochage est nécessaire, et se trouve amené à jouer éventuellement un rôle de protection hydrique. Le primaire généralement utilisé au LCPC est une résine époxy ®S3 (de la Société des Résines Synthétiques). On a pu ainsi s'interroger sur ses éventuelles propriétés d'étanchéité.

Enfin, des difficultés d'approvisionnement et le souci de tester des techniques éventuellement moins contraignantes (visualisation des fissures) ont conduit à s'intéresser à un matériau d'étanchéité transparent distribué par 3M, constitué d'une feuille de polyéthylène plaquée sur l'éprouvette, la masse adhésive étant acrylique. Ce produit n'était disponible qu'en bande mince (5 cm) pour l'étude.

On a donc voulu faire le point quantitativement, en situation réelle de conservation d'éprouvettes de béton, sur ces techniques de protection *a priori* utilisables, mais dont les performances ne nous étaient pas toujours connues et ne sont généralement pas fournies dans la documentation technique (l'aluminium autoadhésif est en fait généralement utilisé en calorifugeage pour des propriétés d'isolation thermique). On a également voulu profiter de mesures fiables, avec certains types d'éprouvettes, pour estimer plus généralement le séchage possible de corps d'épreuve de géométrie variée, selon leur protection, grâce à un modèle de calcul du séchage dont les données caractérisant les matériaux, et notamment les termes d'échange, seraient bien quantifiées [14]. C'est cette étude expérimentale et son interprétation grâce au module de diffusion non-linéaire HEXO de CESAR-LCPC [15] et [16], que l'on présente donc dans cet article.

## Étude expérimentale

### Programme de mesures

Pour répondre aux objectifs ci-dessus, on a voulu suivre le séchage d'éprouvettes typiques de celles utilisées notamment dans l'essai de traction directe où se pose la question de la conservation à l'abri de la dessiccation. Il s'agit alors de cylindres de hauteur 100 mm et de diamètre 74 mm. Il a paru suffisant et adapté, pour suivre quantitativement le phénomène, d'effectuer régulièrement une pesée des corps d'épreuve, protégés dans les diverses conditions étudiées. Un suivi de la répartition locale de la teneur en eau par gammadensimétrie semblait lourd, vu le nombre d'éprouvettes, et peu instructif dans ce cas (faible résolution).

On a voulu se placer dans des conditions assez défavorables en choisissant un béton à fort volume de pâte, potentiellement sujet à une forte dessiccation. Sa formule est donnée dans le tableau I, et ses propriétés caractéristiques dans le tableau II.

TABLEAU I  
Composition du béton de l'étude.

Constituants	Dosage (en kg/m <sup>3</sup> )
Gravillon silico-calcaire de Seine 4-12,5	1 100
Sable silico-calcaire de Seine 0-4	687
Ciment CPJ 45 (filler inerte) - actuel CPJ-CEM II / B 32,5 R (L) CP2	350
Eau	200

TABLEAU II  
Propriétés du béton de l'étude

Temps d'écoulement au maniabilimètre LCL	4 s
Affaissement au cône d'Abrams	10 cm
Teneur en air occlus	0,9 %
Masse volumique	2 380 kg/m <sup>3</sup>
Résistance moyenne en compression à 28 jours (conservation scellée sous simple couche aluminium)	23,4 MPa
Résistance moyenne en traction par fendage à 28 jours (conservation scellée sous simple couche aluminium)	2,61 MPa

Le coulage du béton a eu lieu le 26 mai 1994. En plus des cylindres de contrôle, cinq prismes 14 × 14 × 56 cm ont été fabriqués, ainsi que six cylindres de diamètre 89 mm et hauteur 250 mm. Les prismes et les cylindres ø 89 ont été emballés dès le démoulage, le 27 mai, dans une simple couche

d'aluminium autocollant, et stockés en salle humide jusqu'au 17 juin, soit une cure de 21 jours représentative du traitement généralement subi par les éprouvettes. Du 14 au 17 juin, on a carotté dans les prismes les cylindres ø 74 (fig. 1).

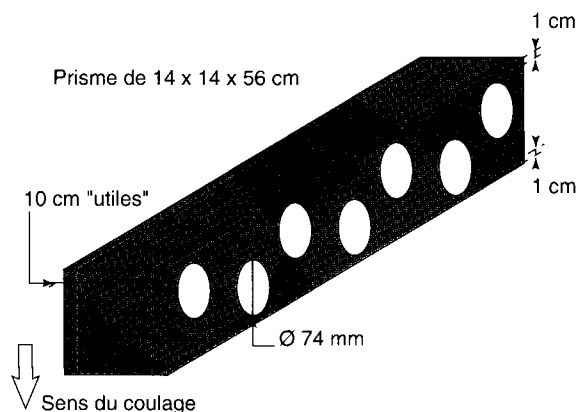


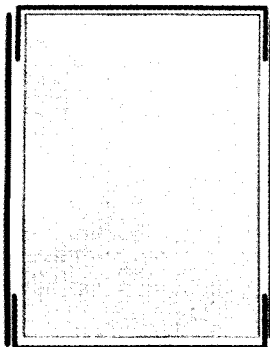
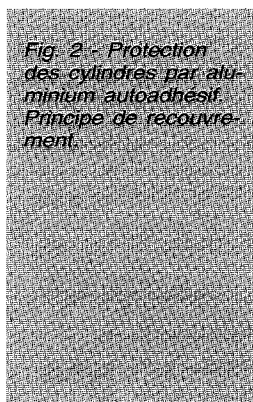
Fig. 1 - Carottage des cylindres ø 74 - h 100  
(éprouvettes de traction).

Le 17 juin, on a procédé à l'emballage des éprouvettes dans les différentes conditions à étudier (les cylindres ont été choisis de façon répartie parmi les prismes d'origine) :

- 6 carottes sous aluminium SABA 335 simple couche (sans film alimentaire),
- 6 carottes sous aluminium SABA 335 double couche (sans film alimentaire),
- 6 carottes sous film alimentaire recouvert d'aluminium SABA 335 (simple couche),
- 6 carottes sous film polyéthylène adhésif 3M,
- 6 carottes sous résine époxy S3 chargée à 10 % (primaire d'accrochage).

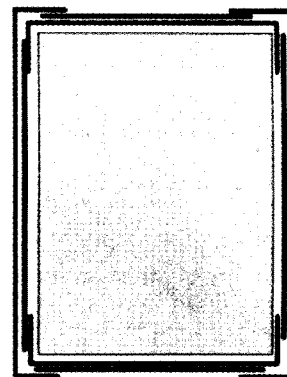
Le recouvrement des couches d'aluminium pour les deux premières techniques évoquées est illustré sur la figure 2. Les cylindres moulés ø 89 recouverts d'aluminium SABA 335 simple couche permettaient, avec leur rapport surface/volume différent, d'analyser le phénomène de séchage et de vérifier qu'il s'agissait bien d'un phénomène de diffusion, modélisable en conséquence. Pour les différentes techniques, on a choisi un nombre de six éprouvettes permettant à la fois d'avoir une bonne estimation de la tendance moyenne, et une estimation de la dispersion possible sur une éprouvette (volume représentatif du corps d'épreuve dans le cas de l'essai de traction).

À partir du 17 juin, soit donc 21 jours après la fabrication du béton, les éprouvettes ont été disposées sur des clayettes dans une salle climatisée à 20 °C ± 1 °C et 50 % ± 5 % H.R. Ces conditions, qui sont normalisées pour les essais de retrait et fluage, sont assez représentatives des conditions qu'on est susceptible de rencontrer dans les salles d'essais ou les salles de labora-



emballage sous simple couche

- 1° couche (couvercles)
- 1° couche (bords)
- 2° couche (couvercles)
- 2° couche (bords)



emballage sous double couche

toire où l'on entrepose des éprouvettes. Les pesées ont été effectuées à intervalles réguliers de racine du temps, c'est-à-dire au bout de 1 semaine, 4 semaines, 9 semaines, etc., la dernière échéance en date étant de 72 semaines (environ 1 an et 5 mois).

Il a cependant été nécessaire de procéder à un changement de la salle de conservation en juin 1995, soit pratiquement un an après le début des pesées. Néanmoins la nouvelle salle a, au moins théoriquement, les mêmes conditions de régulation que la première. On a ainsi une caractérisation fiable sur une durée relativement longue, représentative notamment des durées d'essais de comportement différé.

## Résultats

Les pesées ont été effectuées sur une balance de précision « fine » de capacité 5,5 kg. L'erreur maximale admissible est de  $\pm 0,2$  g dans la gamme médiane (éprouvettes de moins de 2 000 g). Pour les cylindres  $\varnothing 89$ , l'erreur maximale admissible est de  $\pm 0,21$  g (éprouvettes d'environ 3 kg). Il est cependant apparu que ces tolérances étaient largement supérieures à l'imprécision de cette balance.

On a donc tenté une quantification plus adaptée de l'incertitude de pesée. Celle-ci est la somme d'une incertitude de quantification (arrondi de 0,01 g), d'une incertitude de répétabilité, et d'une incertitude de reproductibilité.

Pour la répétabilité, on a effectué 10 mesures successives d'une masse témoin représentative des éprouvettes de 1 000 g utilisées. L'écart-type qui s'en déduit est de 0,005 g. Une vérification de la calibration de la balance a été effectuée à chaque échéance, au début et à la fin de la série de pesées, grâce à une masse métallique témoin, dont on a vérifié que la masse indiquée variait

peu : l'écart-type de reproductibilité est alors de 0,0067 g, du moins pour la première année de mesures. Au total, en sommant ces variances, il s'en déduit un écart-type par pesée de 0,013 g. Lorsqu'on effectue une mesure par différence de pesées, l'écart-type est alors de  $1,414 \times 0,013$  g, soit 0,018 g. Pour des éprouvettes de 1 kg, l'incertitude (assimilée à un écart-type) sur une évaluation de la perte de masse est donc de  $2 \cdot 10^{-5}$  environ. Si l'on veut un intervalle de confiance de 70 %, on doit donc tenir compte des valeurs indiquées (correspondant à une lecture du centième de gramme) avec une incertitude de  $\pm 0,02$  g environ.

À partir d'un an, compte-tenu des conditions de travail dans la nouvelle salle, on a observé une incertitude plus grande, notamment pour l'essai de reproductibilité, conduisant à un écart-type par pesée de 0,023 g. L'écart-type qui s'en déduit pour une mesure par différence est alors de 0,026 g, ce qui donne une largeur de l'intervalle de confiance à 70 % de 0,055 g environ. Pour des éprouvettes de 1 kg, l'incertitude relative sur la détermination de la perte de masse est alors d'environ  $3 \cdot 10^{-5}$ .

L'ensemble des résultats bruts (masses aux différentes échéances) est fourni dans le tableau III. Les informations qui y sont contenues peuvent être visualisées en portant la perte de masse relative, exprimée en %, en fonction du temps (une échelle adaptée consistant à prendre pour abscisse la racine du temps de séchage exprimé en semaines). On présente ainsi sur la figure 3 les évolutions moyennes par type de protection, et sur les figures 4 et 5 les pertes de masse des différentes éprouvettes, pour les éprouvettes protégées par une ou plusieurs couches d'aluminium d'une part, et pour celles protégées par la résine ou le polyéthylène uniquement d'autre part.

**TABLEAU III**  
**Résultats bruts des pesées (masses en g).**

Date	17/06/94	20/06/94	24/06/94	13/07/94	31/08/94	10/10/94	09/12/94	24/02/95	12/05/95	13/06/95	25/08/95	30/10/95
semaine	0	0,429	1	4	10,7	16,4	25	36	47	51,5	62	71,5
racine(t)	0	0,655	1	2	3,3	4,1	5	6	6,9	7,2	7,9	8,5
<b>Diamètre = 74 mm</b>												
alu1c1	1018,95	1018,96	1018,99	1018,95	1018,87	1018,74	1018,73	1018,59	1018,4	1018,32	1017,53	1017,2
alu1c2	1014,09	1014,09	1014,06	1014,06	1014,01	1013,87	1013,88	1013,82	1013,65	1013,59	1013,11	1013,04
alu1c3	1017,82	1017,81	1017,79	1017,72	1017,56	1017,42	1017,2	1016,94	1016,61	1016,46	1014,93	1014,16
alu1c4	1020,74	1020,74	1020,72	1020,65	1020,43	1020,22	1019,97	1019,61	1019,22	1019,05	1018,38	1018,1
alu1c5	1013,38	1013,39	1013,38	1013,3	1013,13	1012,94	1012,71	1012,39	1012,03	1011,88	1011,03	1010,68
alu1c6	1016,07	1016,09	1016,08	1016	1015,82	1015,57	1015,36	1015,03	1014,63	1014,45	1013,62	1013,28
alu2c1	1024,46	1024,45	1024,47	1024,43	1024,44	1024,34	1024,38	1024,35	1024,27	1024,26	1023,82	1023,8
alu2c2	1025,32	1025,32	1025,33	1025,32	1025,31	1025,22	1025,27	1025,26	1025,23	1025,22	1024,77	1024,77
alu2c3	1019,06	1019,07	1019,08	1019,06	1019,02	1018,93	1018,95	1018,86	1018,76	1018,72	1018,26	1018,2
alu2c4	1027,18	1027,16	1027,19	1027,18	1027,12	1027,08	1027,02	1026,93	1026,82	1026,78	1026,37	1026,3
alu2c5	1021,51	1021,5	1021,53	1021,49	1021,43	1021,34	1021,26	1021,14	1020,99	1020,92	1020,46	1020,39
alu2c6	1019,92	1019,94	1019,96	1019,93	1019,88	1019,74	1019,76	1019,67	1019,55	1019,49	1019,05	1018,97
alu1c1+fa	1014	1013,98	1013,97	1013,86	1013,62	1013,28	1013	1012,58	1012,05	1011,85	1011,13	1010,69
alu1c2+fa	1015,67	1015,65	1015,64	1015,53	1015,28	1014,96	1014,69	1014,24	1013,74	1013,51	1012,11	1011
alu1c3+fa	1018,97	1019,02	1019,01	1018,92	1018,72	1018,46	1018,24	1017,89	1017,49	1017,32	1016,23	1015,71
alu1c4+fa	1015,01	1014,97	1014,97	1014,87	1014,64	1014,34	1014,09	1013,68	1013,23	1013,03	1012,24	1011,89
alu1c5+fa	1023,76	1023,72	1023,7	1023,55	1023,19	1022,79	1022,37	1021,75	1021,06	1020,83	1019	1017,69
alu1c6+fa	1016,64	1016,6	1016,6	1016,55	1016,41	1016,28	1016,15	1015,94	1015,63	1015,55	1013,96	1012,65
3M1	1016,19	1015,86	1015,37	1012,99	1007,3	1002,76	997,51	992,81	989	987,66	984,37	982,48
3M2	1012,95	1012,87	1012,8	1012,41	1011,36	1010,44	1009,24	1007,88	1006,41	1005,73	1003,5	1001,84
3M3	1020,13	1019,87	1019,53	1017,94	1014,11	1010,97	1007,01	1003,21	999,69	998,25	995,07	993,14
3M4	1015,4	1015,15	1014,85	1013,49	1010,22	1007,58	1004,35	1001,13	998,06	996,87	994,23	992,51
3M5	1018,26	1018	1017,69	1015,83	1010,58	1006,33	1001,77	997,6	994,01	992,57	989,56	987,8
3M6	1012,6	1012,34	1011,98	1010,41	1007,17	1004,72	1001,83	998,8	995,68	994,39	991,37	989,41
ResS31c1		1017,01	1016,02	1012,1	1004,03	998,81	993,63	989,3	985,9	984,74	982,14	980,71
ResS31c2		1009,16	1006,83	999,08	989,56	984,71	980,23	976,68	973,91	972,97	970,78	969,64
ResS31c3		1011,79	1010,08	1003,38	993,1	988,2	983,89	980,55	978,02	977,12	975,03	974,06
ResS31c4		1015,51	1013	1005,14	996,14	991,64	987,48	984,02	981,4	980,54	978,4	977,37
ResS31c5		1011,69	1009,44	1001,03	990,71	985,97	981,73	978,43	975,95	975,08	973,01	972,1
ResS31c6		1011,81	1011,17	1008,47	1002,55	998,12	993,14	988,64	984,95	983,64	980,8	979,16
<b>Diamètre = 89 mm</b>												
alu1c1	3686,02	3685,8	3685,75	3685,53	3685,02	3684,42	3683,78	3682,64	3680,6	3679,77	3675,09	3671,46
alu1c2	3690,14	3689,95	3689,88	3689,66	3689,16	3688,56	3688,13	3687,31	3686	3685,28	3682,25	3680,39
alu1c3	3652,86	3652,69	3652,7	3652,66	3652,49	3652,29	3652,27	3652,02	3651,62	3651,43	3650,03	3649,85
alu1c4	3660,82	3660,68	3660,7	3660,57	3660,26	3659,86	3659,63	3659,03	3658,34	3658	3656,17	3655,66
alu1c5	3674,78	3674,57	3674,49	3674,1	3672,79	3671,41	3669,76	3667,61	3665,24	3664,29	3660,91	3659,13
alu1c6	3687,41	3687,25	3687,23	3687,19	3686,99	3686,7	3686,54	3685,96	3685,15	3684,84	3682,9	3682,25

Fig. 3 - Séchage  
(perte relative de  
masse) en fonction du  
temps (racine du  
temps  $t$  exprimé en  
semaine).  
Valeurs moyennes par  
type de protection.

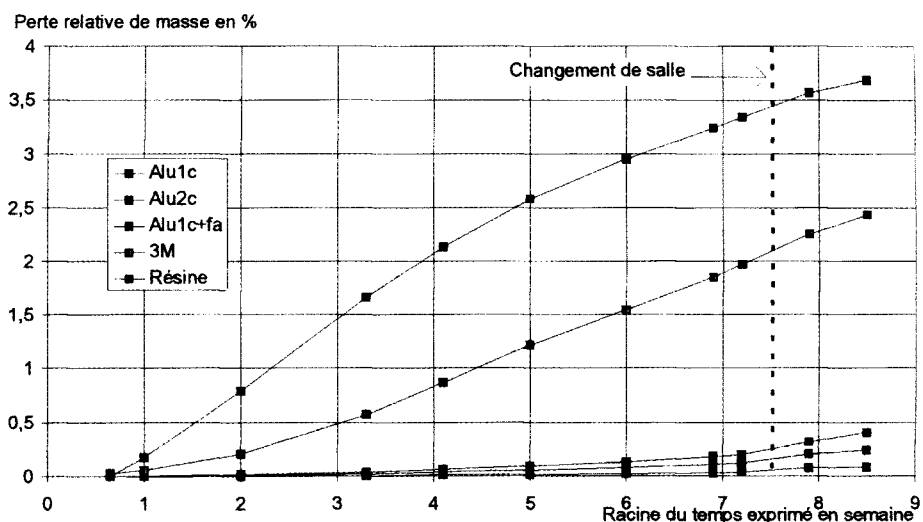


Fig. 4 - Séchage  
(perte relative de masse) en fonction du  
temps (racine du  
temps exprimé en  
semaine).  
Echantillons protégés  
par une ou deux cou-  
ches d'aluminium, ou  
une couche + film ali-  
mentaire.

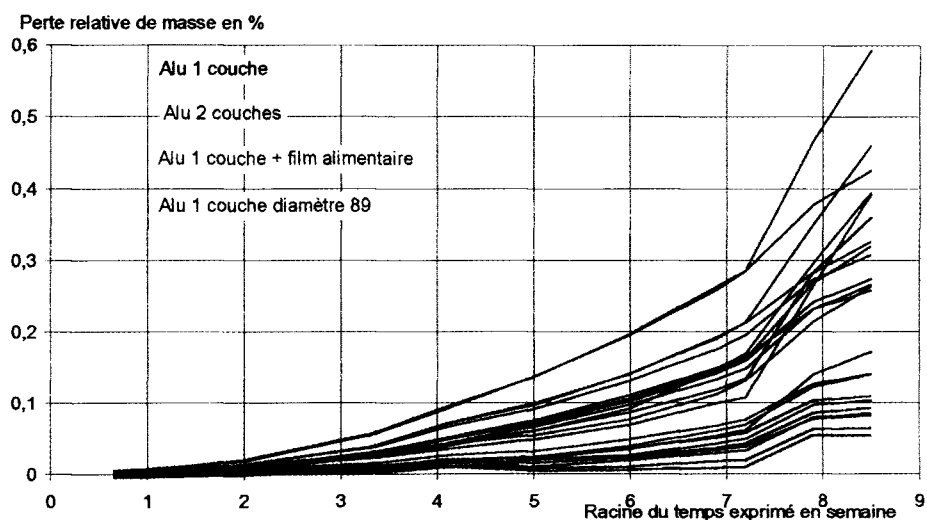
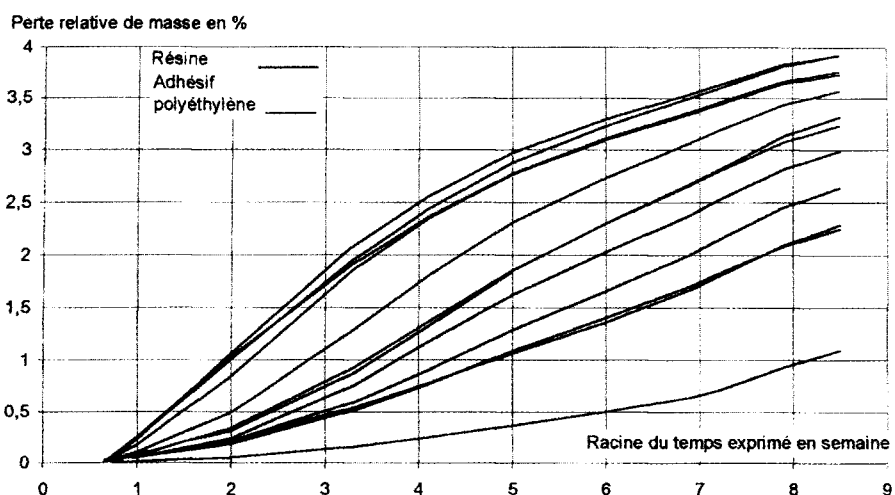


Fig. 5 - Séchage  
(perte relative de masse) en fonction du  
temps (racine du  
temps exprimé en  
semaine).  
Echantillons protégés  
par résine époxy S3  
ou par film polyéthyl-  
ène adhésif 3M.



Cette séparation des graphiques est due au constat majeur que l'on peut faire à partir de ces résultats : sur des durées assez longues, la résine comme le film polyéthylène ne suffisent pas à constituer une barrière étanche, puisque la perte de masse atteint 2 à 3 % soit une fraction très significative de l'eau libre contenue dans ce béton (45 à 70 l/m<sup>3</sup>). Au contraire, les éprouvettes protégées par une ou plusieurs couches d'aluminium perdent moins de 0,2 % de leur masse, ce qui, tout en étant mesurable, constitue néanmoins un séchage très limité (moins de 5 l/m<sup>3</sup>). Par rapport à l'un des objectifs initiaux de l'étude, qui était de qualifier une technique alternative à celle des feuilles d'aluminium autoadhésif, force est de reconnaître qu'aucune des techniques étudiées ici n'en est effectivement capable.

On constate par ailleurs une dispersion assez importante des résultats pour un même type de conservation. L'écart-type sur la perte relative de masse est en effet, pour l'échéance de 36 semaines, égal à 10 % environ pour la résine S3 (protection assez reproductible), 40 % environ pour le ruban 3M (probablement forte influence des recouvrements, donc de la mise en œuvre de la protection), 30 à 80 % pour les techniques avec aluminium (faibles valeurs absolues de pertes de masse, effet de la précision de la mesure, influence possible des « joints »). Ceci conduit à utiliser la quantification des propriétés d'étanchéité qu'on pourra faire dans la suite avec une certaine prudence.

Cependant, malgré cette dispersion, on constate que le classement des différentes techniques est respecté tout au long du processus. Il est en particulier cohérent avec ce à quoi l'on pouvait s'attendre concernant les techniques utilisant l'aluminium, l'ordre croissant d'étanchéité étant le suivant : film alimentaire + aluminium 1 couche - aluminium 1 couche - aluminium 2 couches. L'effet secondaire du film alimentaire est en effet de créer une mince lame d'air entre le béton et l'aluminium, susceptible de constituer un « drainage » pour l'humidité. Toute la surface de l'enveloppe devient alors une surface d'échange, et pas seulement l'aluminium plaqué sur les « issues poreuses » du béton. On note enfin que la perte relative de masse pour les éprouvettes  $\varnothing$  89 est moins importante, ce qui est cohérent avec un rapport surface / volume divisé par 1,43 (dans un processus, au moins au début, nettement contrôlé par l'étape constituée par la « barrière » d'aluminium, c'est bien ce rapport qui intervient entre les pertes relatives des deux types d'éprouvettes).

De façon directe, on s'aperçoit que si, pour des éprouvettes de traction directe, on doit limiter la perte de masse due au départ d'eau libre à 0,2 %,

soit environ 5 l/m<sup>3</sup>, la résine S3 n'est efficace que pendant environ une semaine, le polyéthylène adhésif 3M environ un mois, alors que l'aluminium avec film alimentaire l'est pendant environ un an. Si on doit limiter cette perte à moins de 0,1 % (2 l/m<sup>3</sup>), le polyéthylène adhésif 3M sera valable une semaine, l'aluminium avec film alimentaire moins de 6 mois, l'aluminium directement appliqué en couche simple environ 8 mois.

Pour étendre ces résultats pratiques à d'autres géométries d'éprouvettes, notamment celles de retrait-fluage, et mieux comprendre le phénomène étudié, il est cependant nécessaire de le modéliser, et c'est ce qui est exposé dans la deuxième partie de cet article.

## Modélisation du séchage

### Calculs de diffusion et calage des paramètres

On a utilisé, pour calculer le séchage de nos éprouvettes de béton, le module HEXO de CESAR-LCPC [16] développé à l'occasion de la thèse de L. Granger [4], et qui repose sur le modèle de diffusion non-linéaire de Mensi et Acker [14]. Ce modèle a notamment été utilisé récemment pour décrire le séchage d'éléments d'aéroréfrigérants, et la fissuration induite grâce au chaînage avec le module PROB [17].

La teneur en eau libre  $C$  au sein du matériau est calculée comme champ solution d'une équation de diffusion non-linéaire, la non-linéarité provenant premièrement du coefficient de diffusion, approché par une fonction exponentielle de la teneur en eau libre, et deuxièmement de la condition d'échange aux frontières du domaine. Les données nécessaires au calcul sont, d'une part les teneurs en eau libre  $C_{100}$ ,  $C_{ini}$  et  $C_{eq}$  correspondant respectivement à la saturation (humidité relative de 100 %), à l'hygrométrie interne initiale du béton (éventuellement différente de 100 % à cause de l'autodessiccation), et à l'hygrométrie extérieure avec laquelle le béton tend à se mettre en équilibre.

Ce sont, d'autre part, les constantes  $A$  et  $B$  du modèle de Mensi et Acker qui permettent de calculer le coefficient de diffusion, ainsi qu'un coefficient d'échange  $k_{ECH}$ , noté  $ECH$  dans CESAR et exprimé en  $m/s (l/m^3)^{-1}$ , relatif aux conditions de « protection » hydrique de la surface.

Ainsi le coefficient de diffusion  $D(C)$  est calculé par la formule  $D(C) = A \exp(B.C)$ , et le coefficient d'échange  $\lambda(C)$  reliant le flux à la différence des teneurs en eau est déduit de :

$$\lambda(C) = \beta \cdot \frac{1 - h_{\text{ext}}}{(C_{\text{eq}} - C_{100})^2} \cdot (C + C_{\text{eq}} - 2C_{100}) =$$

$$k_{\text{ECH}} \cdot (C + C_{\text{eq}} - 2C_{100})$$

en posant :  $k_{\text{ECH}} = \beta \cdot \frac{1 - h_{\text{ext}}}{(C_{\text{eq}} - C_{100})^2}$

L'application du modèle à notre problème a donc essentiellement consisté à déterminer A, B,  $C_{100}$ ,  $C_{\text{eq}}$  ( $= C_{50}$ ),  $C_{\text{ini}}$  pour notre béton, et à caler les coefficients  $k_{\text{ECH}}$  correspondant aux différents moyens de protection étudiés. Le maillage du calcul axisymétrique a été fait de façon très simple en éléments quadrilatères à 8 nœuds, de taille décroissante vers le bord soumis au séchage afin de mieux rendre compte des éventuels gradients. Par symétrie, on a modélisé seulement la moitié inférieure d'un plan méridien d'une éprouvette. Les conditions aux limites du calcul ne variant pas dans le temps, on a simplement noté comme résultats la perte de masse (relative à la masse « humide » initiale) à des intervalles réguliers en racine du temps (1, 4, 9, 16 semaines, etc.).

La détermination des teneurs en eau s'est faite en suivant les indications de la notice d'utilisation [16]. En particulier, il s'agit tout d'abord de calculer la quantité d'eau consommée par l'hydratation. La quantité d'eau potentiellement consommée par l'hydratation du ciment avec ajouts utilisés (CPJ - CEM II / B c'est-à-dire contenant plus de 20 % d'ajouts) est évaluée à 0,185. D'après Waller [18], on peut s'attendre à un degré final d'hydratation de l'ordre de 0,9, étant donné le rapport eau / ciment de 0,57 pour le béton étudié.

Compte-tenu de cette forte quantité d'eau, on peut penser qu'au début des pesées, soit à 22 jours, 95 % de l'hydratation a eu lieu. Au total, la quantité d'eau libre présente dans un mètre cube de béton au démarrage des essais peut donc être estimée à :

$$C_{\text{ini}} = 200 - (350 \times 0,185 \times 0,9 \times 0,95) = 145 \text{ l/m}^3.$$

Compte-tenu de cette forte valeur, liée à l'important rapport eau/ciment, on supposera que la teneur en eau initiale correspond aussi à la teneur en eau à la saturation, c'est-à-dire à une humidité relative de 100 %. On utilise ensuite les isothermes de sorption-désorption [2] pour évaluer la teneur en eau libre correspondant à une humidité relative d'équilibre de 50 %, qui est la condition aux limites imposée aux éprouvettes. Il s'avère que, pour une pâte de ciment relativement poreuse comme c'est le cas ici, cette valeur  $C_{\text{eq}}$  est proche de 50 % de  $C_{\text{ini}}$ . On peut adopter plus précisément, en se référant aux graphiques de [2],  $C_{\text{eq}} = 74 \text{ l/m}^3$ . Le terme B a été pris égal à

0,05 comme indiqué pour les bétons courants [4]. Le terme A a d'abord été pris égal à  $5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ , valeur conseillée pour des bétons d'ouvrages d'art. Néanmoins, comme les pertes d'eau enregistrées se sont avérées assez nettement supérieures, on a calé A de façon à retrouver au mieux les données expérimentales. On a abouti, pour notre formule, à une valeur de  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Le calage des coefficients  $k_{\text{ECH}}$  s'est fait sur les données disponibles à l'échéance de 36 semaines. On a tenté de retrouver au mieux la valeur moyenne des courbes de séchage. Les valeurs auxquelles on a abouti sont récapitulées dans le tableau IV. La figure 6 illustre ce calage.

## Discussion

Ces premiers calculs de calage, et les valeurs auxquelles ils conduisent, appellent plusieurs remarques concernant notamment la précision de la détermination du coefficient  $k_{\text{ECH}}$  qu'on peut attendre, la validation de ces calculs sur le long terme, et la dépendance du calage vis-à-vis des caractéristiques du béton. On a essayé d'apporter des éléments de réponse à ces différents points.

Pour ce qui concerne l'influence du type de béton, et donc de sa diffusivité, sur les calculs effectués, on constate que, notamment pour les éprouvettes dont la protection est très étanche, la perte en eau est presque exclusivement contrôlée par la « barrière » extérieure. On a notamment calculé les pertes par séchage d'une éprouvette  $\varnothing 74$  protégée par une couche d'aluminium entourant une couche de film alimentaire, en faisant varier le coefficient A entre  $10^{-13}$  et  $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ , la valeur  $10^{-13}$  correspondant à la limite inférieure de bétons d'ouvrages d'après Granger [4]. On obtient une différence inférieure à 0,5 %. On peut donc affirmer que, même si le coefficient A n'a pas été parfaitement estimé pour notre calage, ceci a une incidence tout à fait négligeable sur la détermination des coefficients d'échange. Par ailleurs, la valeur de  $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  adoptée devrait placer en sécurité pour des calculs de séchage, car elle correspond à des bétons nettement plus poreux que les bétons d'ouvrages d'art couramment étudiés en laboratoire.

La question de la précision de notre détermination se pose cependant, notamment parce qu'avec des éprouvettes de géométrie différente mais soumises à la même protection (une seule couche d'aluminium pour des éprouvettes de diamètre 74 mm et de hauteur 100 mm, ou pour des cylindres de diamètre 89 mm et de hauteur 250 mm) on aboutit à des coefficients  $k_{\text{ECH}}$  variant de 50 %. On pourrait donc mettre en cause un autre phénomène que la diffusion « surfacique » via la feuille d'aluminium, et



TABLEAU IV  
Coefficients d'échange  $k_{ECH}$  calés sur les 36 premières semaines de mesures,  
et valeurs du paramètre  $\beta$  correspondant, avec  $A = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Condition d'échange	Aluminium 1 couche	Aluminium 2 couches	Aluminium 1 couche + film alimentaire	Polyéthylène 3 M	Résine époxy S3	Aluminium 1 couche ø 89
$k_{ECH} [\text{m/s (l/m}^3\text{)}^{-1}]$	$2,2. 10^{-13}$	$6. 10^{-14}$	$4. 10^{-13}$	$5,5. 10^{-12}$	$2,2. 10^{-11}$	$3,3. 10^{-13}$
$\beta [\text{m/s (l/m}^3\text{)}^{-1}]$	$2,22. 10^{-9}$	$6,05. 10^{-10}$	$4,03. 10^{-9}$	$5,55. 10^{-8}$	$2,22. 10^{-7}$	$3,33. 10^{-9}$

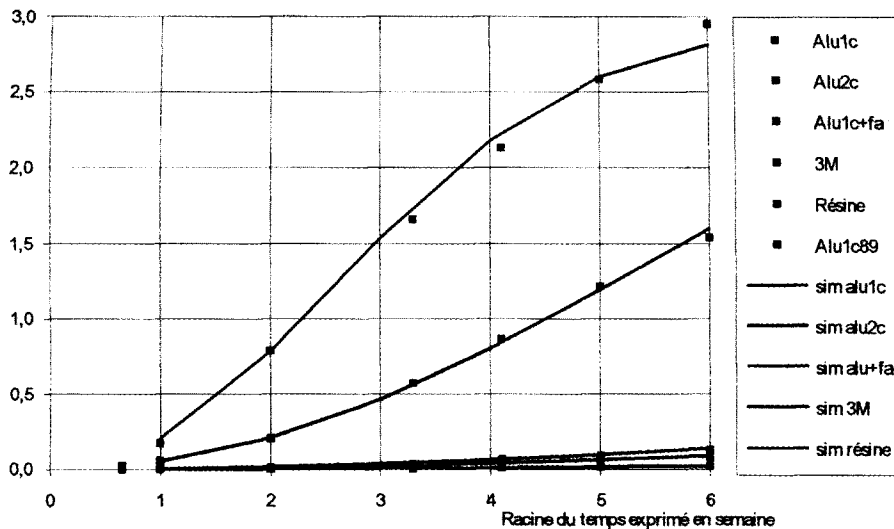


TABLEAU V  
Plage de variation des coefficients d'échange  $k_{ECH}$  calés sur les 36 premières semaines de mesures,  
en tenant compte de la dispersion expérimentale, avec  $A = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Condition d'échange		Aluminium 1 couche	Aluminium 2 couches	Aluminium 1 couche + film alimentaire	Polyéthylène 3 M	Résine époxy S3
$k_{ECH} [\text{m/s (l/m}^3\text{)}^{-1}]$	Moyenne	$2,7. 10^{-13}$	$6. 10^{-14}$	$4. 10^{-13}$	$5,5. 10^{-12}$	$2,2. 10^{-11}$
$k_{ECH} [\text{m/s (l/m}^3\text{)}^{-1}]$	Minimum	$1. 10^{-13}$	$3. 10^{-14}$	$2,5. 10^{-13}$	$3. 10^{-12}$	$2. 10^{-11}$
$k_{ECH} [\text{m/s (l/m}^3\text{)}^{-1}]$	Maximum	$6. 10^{-13}$	$1. 10^{-13}$	$5. 10^{-13}$	$8. 10^{-12}$	$2,5. 10^{-11}$

notamment l'effet des « joints de recouvrement » susceptibles de favoriser le départ de l'eau, dont l'incidence serait différente suivant la géométrie de l'éprouvette.

Si ce type d'artefact n'est pas à écarter, il n'en reste pas moins clair que, compte-tenu d'une dispersion expérimentale très importante (écart-type de 40 à 80 % pour les pertes de masse des deux séries d'éprouvettes en question), on ne doit se limiter qu'à une analyse des ordres de grandeur des coefficients  $k_{ECH}$  obtenus, et que la différence de détermination « numérique » n'est probablement pas significative au regard de la dispersion expérimentale. Du coup, il a paru plus pertinent d'exprimer les données du tableau IV

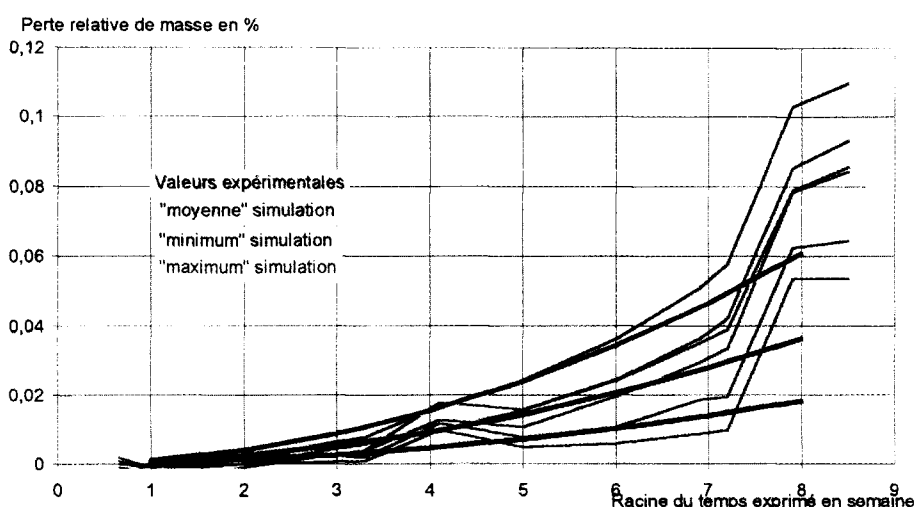
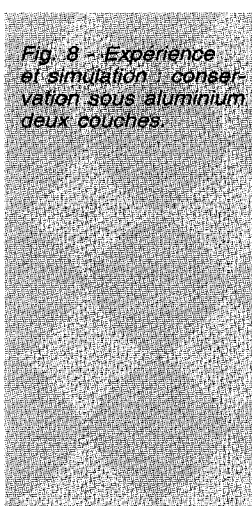
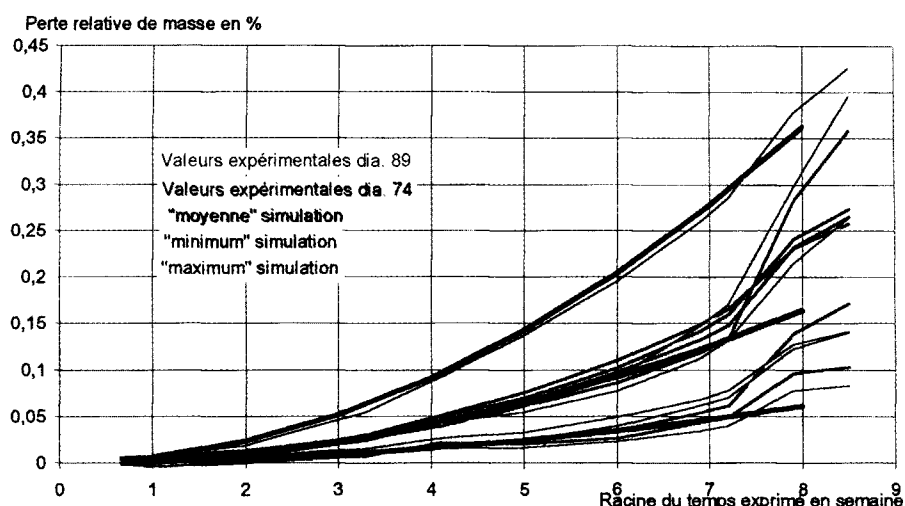
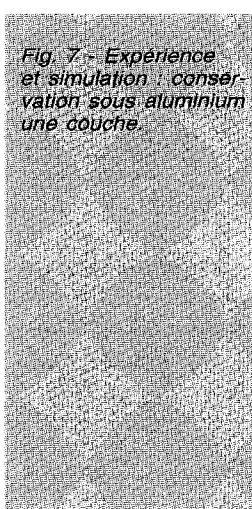
non plus sous forme de valeur unique, mais sous la forme d'une plage (mini-maxi) représentative de la dispersion expérimentale, en indiquant des valeurs « extrêmes » de  $k_{ECH}$  déduites de la valeur moyenne calée (tableau IV) par addition ou soustraction d'un écart-type. On présente donc ces plages de variations dans le tableau V.

On remarquera un écart relatif plus grand pour les protections d'aluminium 1 couche et polyéthylène 3 M 1 couche, qui peut être dû à l'importance cruciale du traitement des zones de recouvrement, avec une dispersion due à l'opérateur. On note l'intérêt d'une valeur de  $k_{ECH}$  « maximum » dans une optique de calcul sécuritaire vis-à-vis du séchage.

On a cherché à valider cette approche en comparant les simulations ainsi obtenues (moyenne, minimum et maximum) sur la durée disponible la plus longue possible, ce qui constitue en quelque sorte une validation de la pertinence physique de notre approche, si elle est susceptible d'être prédictive pour le long terme. Ceci a pu être fait pour des échéances atteignant 64 semaines, et est illustré par les figures 7 à 11.

Ces graphiques permettent de faire plusieurs commentaires. Tout d'abord, on s'aperçoit que l'ordre de grandeur des valeurs de perte de masse due au départ d'eau est assez bien reproduit, y compris au-delà de 36 semaines, sauf pour les éprouvettes enduites de résine pour lesquelles la simulation prévoit un pla-

fonnement de la perte aux environs de 3 %, alors qu'expérimentalement le séchage semble continuer de façon encore quasi-linéaire en racine du temps (fig. 11). On peut incriminer, au moins pour partie, un mauvais calage de la teneur en eau  $C_{eq}$ , prévisible car les données de [2] ne comportent pas le cas d'un béton avec un aussi fort dosage en eau (rapport e/c de 0,57). En effet, le début de la simulation est en très bon accord avec l'expérience, et cette phase est surtout dominée par l'échange au travers de la paroi résinée. Il n'y a donc pas de raison de remettre en cause le coefficient  $k_{ECH}$ , même si sa plage de variation indiquée est probablement trop peu étendue (vu la dispersion des valeurs expérimentales).



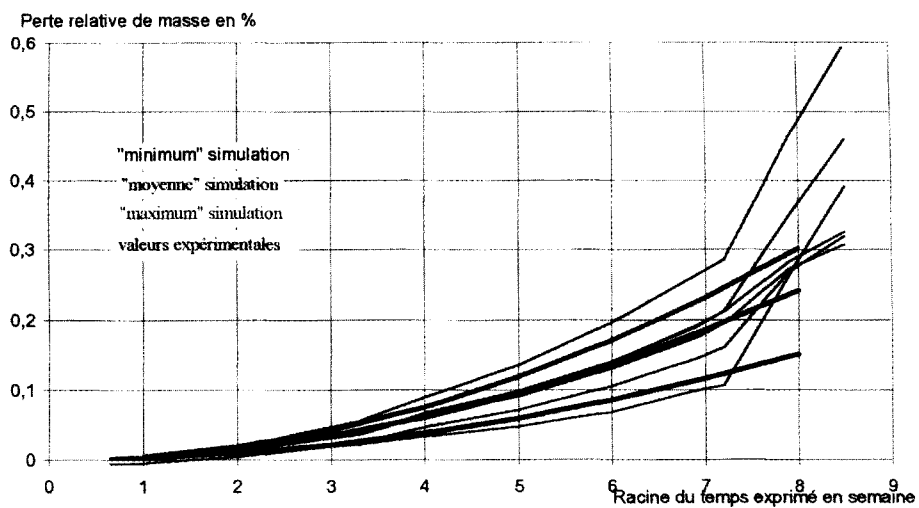


Fig. 9 - Expérience et simulation : conservation sous aluminium + film alimentaire.

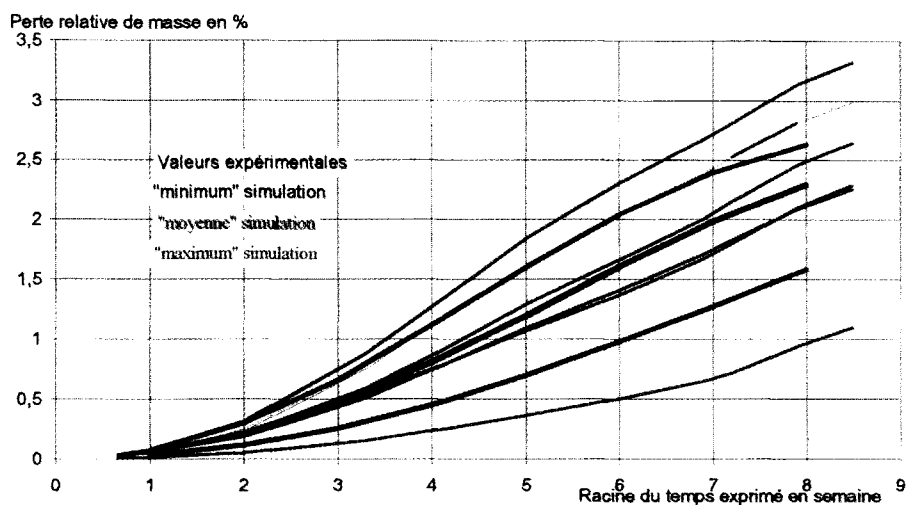


Fig. 10 - Expérience et simulation : conservation sous polyéthylène 3M.

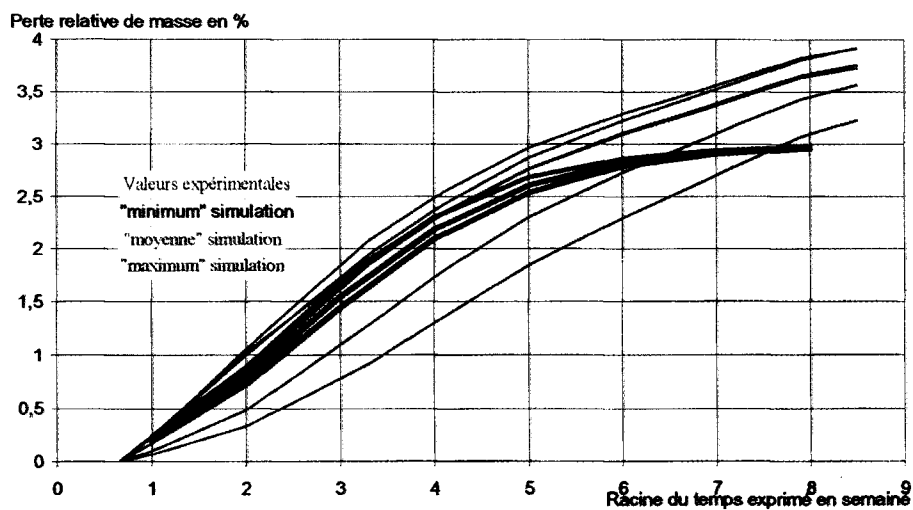


Fig. 11 - Expérience et simulation : conservation sous résine époxy S3.

Pour la protection constituée de deux couches d'aluminium (fig. 8), ou d'une couche d'aluminium recouvrant une épaisseur de film alimentaire (fig. 9), les valeurs adoptées paraissent un peu faibles compte-tenu d'un séchage qui semble augmenter de façon non-linéaire pour les dernières échéances (au-delà de 60 semaines). Il n'y a cependant pas de raison de soupçonner un artefact expérimental (le changement de salle n'a pas introduit de différences de conditions de stockage, la précision de la balance ne s'est pas modifiée). On pourrait invoquer une légère dégradation des propriétés de l'enveloppe d'aluminium au bout d'une longue durée, ce qui évidemment ne peut être traduit par le coefficient  $k_{ECH}$  constant adopté dans le modèle. En fin de compte, on peut penser que la prise en compte d'un écart-type légèrement plus important aurait conduit à des prévisions plus réalistes, en particulier pour estimer la fourchette haute des valeurs de perte de masse.

Pour la protection constituée de polyéthylène (fig. 10), on peut faire la même analyse, et suggérer d'adopter ultérieurement des coefficients mini et maxi plus écartés de la valeur moyenne (qui semble fournir une bonne estimation jusqu'aux échéances de 64 semaines). Enfin, pour le séchage des éprouvettes protégées par une seule couche d'aluminium (fig. 7), les calculs « extrêmes » encadrent très correctement le fuseau des courbes expérimentales, et fournissent ainsi une bonne évaluation de la perte globale de masse due au séchage. On peut donc accorder toute confiance aux calculs de séchage de pièces protégées d'une seule couche d'aluminium, avec le coefficient d'échange ainsi déterminé, au moins pour des échéances comparables à celles de la présente validation.

### Quelques conséquences pratiques pour les essais de traction ou de fluage

Les considérations ci-dessus permettent donc de mieux connaître les limites du calage effectué, sans néanmoins empêcher de tirer des conclusions pratiques par rapport aux essais couramment entrepris pour lesquels on a besoin de conserver humides les éprouvettes. On regroupe ces conclusions ci-après pour l'essai de traction directe sur éprouvette cylindrique de petite taille (typiquement  $\varnothing 74$ ), puis pour l'essai de retrait ou de fluage (éprouvette  $\varnothing 160$  mm et hauteur 1 m).

Pour l'éprouvette de traction, on est généralement amené à effectuer l'essai sur un béton mature. Les essais eux-mêmes demandent un certain temps, et doivent être assez nombreux vu la dispersion de l'essai ; il n'est donc pas possible de les réaliser au jeune âge. Par ailleurs, pour des raisons d'organisation, il est généralement plus facile de carotter les éprouvettes 2 à

3 semaines après le coulage, indépendamment des dates et conditions d'essai. La durée de conservation à envisager est alors de l'ordre de plusieurs semaines à plusieurs mois. Comme on l'a vu, cette durée n'est pas compatible avec une protection qui serait constituée du seul primaire d'accrochage. Comme on le voit aussi, le polyéthylène 3M tel qu'on l'a employé risque de conduire à des pertes qui pourraient devenir significatives pour une conservation trop prolongée, ou dans de mauvaises conditions (salles trop sèches, par exemple).

En revanche, pour des durées n'excédant pas 6 mois, l'aluminium en simple couche doublant un film alimentaire paraît une bonne solution. Le calcul simulant le profil de teneur en eau d'une éprouvette de traction (béton de l'étude,  $A = 5.10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) enveloppée d'un film alimentaire doublé d'aluminium en simple couche ( $k_{ECH} = 4.10^{-13}$  m/s (l/m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>), en cours de séchage, montre que ce procédé ne conduit pas à une perte d'eau libre de plus d'1 l/m<sup>3</sup> sur 16 semaines, et que le séchage a lieu sans gradients. De plus cette technique rend possible un découpage ultérieur facile pour les zones à instrumenter (jauges) ou les faces à coller. Pour ces dernières opérations, on voit qu'il est préférable de ne pas les entreprendre plus d'une ou deux semaines avant les essais proprement dits, sauf à protéger à nouveau la surface instrumentée ou enduite en attendant les essais.

Dans la mesure où l'on chercherait une façon d'obtenir des éprouvettes d'humidité relative interne constante, par exemple  $C_{50}$ , ce qui permettrait pour certains phénomènes de distinguer ce qui est lié à l'eau des capillaires de ce qui est lié à l'eau libre contenue au sein des nanopores (porosité intrinsèque des hydrates), on a pu se demander si une protection de résine, « pas trop étanche », permettait d'atteindre un séchage des éprouvettes sans gradient interne d'humidité.

Le calcul du profil de teneur en eau d'une éprouvette de traction (béton de l'étude,  $A = 5.10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) enveloppée de résine époxy S3 ( $k_{ECH} = 2.2.10^{-11}$  m/s (l/m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>), en cours de séchage, a en effet montré que pour le béton étudié, où la diffusion de l'eau est relativement facile, on avait un séchage pratiquement sans gradient. Afin d'envisager d'autres cas possibles, on a tenté le calcul analogue avec un béton beaucoup moins poreux, du type d'un B60 à B70, en choisissant un coefficient  $A = 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s. Le résultat, présenté sur la figure 12, montre qu'alors ce n'est plus seulement la « barrière résine » qui contrôle le séchage, mais aussi le béton lui-même, d'où des gradients assez importants qui empêchent, pour cette géométrie d'éprouvette, d'utiliser la résine en question pour l'objectif cité.

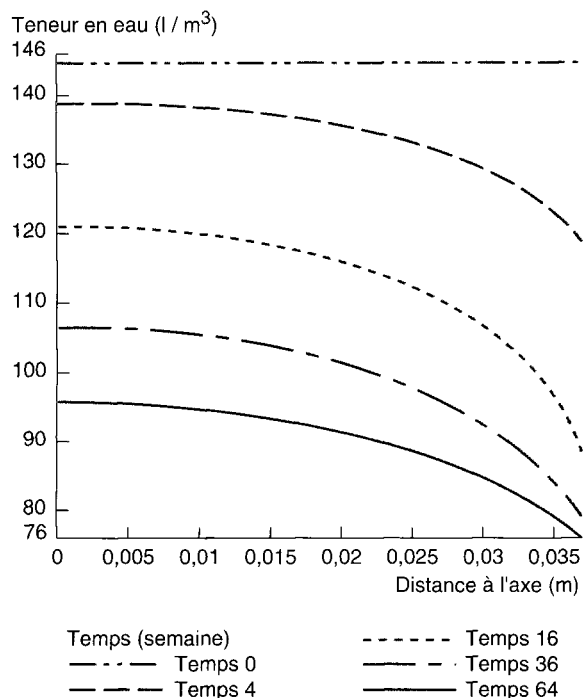


Fig. 12 - Simulation du profil de teneur en eau d'une éprouvette de traction (béton peu poreux,  $A = 1.10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ) enveloppée de résine époxy S3 ( $k_{ECH} = 2.2.10^{-11} \text{ m/s (l/m}^2)^{1/2}$ ), en cours de séchage.

Un problème d'application concret a été soulevé lors d'une récente étude, où des éprouvettes de traction enrobées d'une simple couche d'aluminium ont dû être préparées sur leurs faces pour collage ultérieur. La protection aluminium a donc été enlevée, et la résine primaire d'accrochage S3 appliquée. La question posée était la durabilité d'une telle préparation compte-tenu des conditions ambiantes dans la salle d'essai. Le calage des coefficients d'échange de chaque type de protection a permis de simuler cette situation, pour le béton de l'étude avec une forte

diffusivité ( $A = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), et pour un béton plus proche des matériaux généralement étudiés ( $A = 1.10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ). La figure 13 présente la perte relative de masse sur l'ensemble de l'éprouvette en fonction du temps dans ces deux cas. On s'aperçoit que celle-ci dépasse 0,2 % dès 4 semaines, ce qui constitue donc une limite d'utilisation des éprouvettes ainsi protégées, si elles sont laissées sans précaution dans une pièce à 50 % d'humidité relative.

Par ailleurs, la répartition spatiale des teneurs en eau au cours du séchage indique d'importants gradients dans le cas du béton peu poreux, dès la première semaine, selon l'axe de l'éprouvette, alors que la protection d'aluminium, suffisamment étanche, n'induit pas de gradients selon la direction radiale. Pour le béton de forte diffusivité, le séchage a lieu pratiquement sans gradients y compris selon la verticale.

On donne pour finir un autre cas pratique d'utilisation des résultats de cette étude. Compte-tenu d'une question régulièrement posée concernant la protection des éprouvettes de fluage ou de retrait, on a voulu quantifier dans ce cas la performance d'une protection par deux couches d'aluminium autoadhésif, par rapport à une protection par simple couche.

On s'est placé dans le cas de notre béton d'étude, assez poreux ( $A = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ), donc susceptible de représenter un béton sujet à une forte dessiccation. On a calculé la perte de masse relative dans les deux cas de figure, jusqu'à une échéance de 121 semaines, soit environ 2 ans et 4 mois, une telle durée étant tout à fait envisageable pour ce type d'essai. On a effectué les calculs pour les valeurs minimum, moyenne et maximum des coefficients d'échange des deux cas. Les résultats sont présentés sur la figure 14.

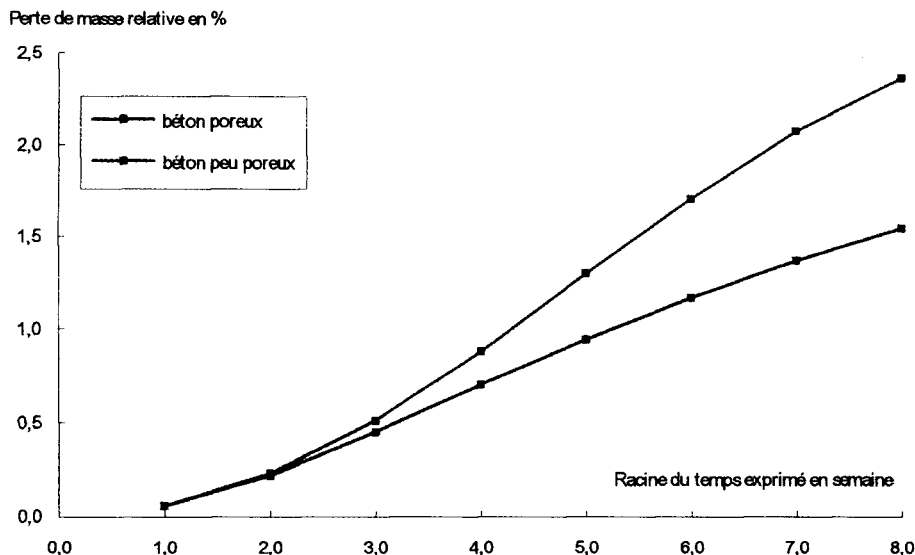
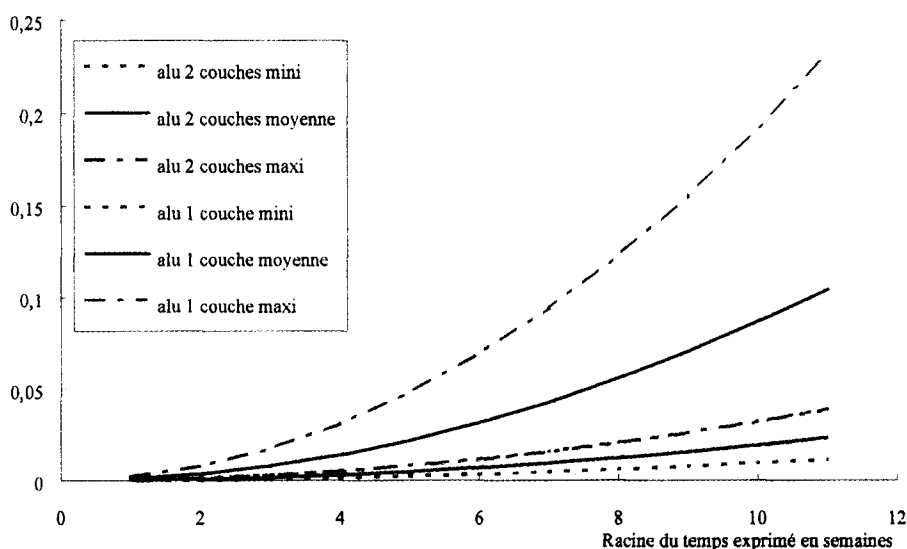


Fig. 13 - Simulation de la perte relative de masse d'une éprouvette de traction (béton poreux,  $A = 5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , et béton peu poreux,  $A = 1.10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ) enveloppée de résine époxy S3 sur les faces ( $k_{ECH} = 2.2.10^{-11} \text{ m/s (l/m}^2)^{1/2}$ ), et d'aluminium monocouche sur le pourtour ( $k_{ECH} = 2.2.10^{-12} \text{ m/s (l/m}^2)^{1/2}$ ), en cours de séchage.



Fig. 14 - Simulation du séchage d'une éprouvette de fluage. Perte de masse relative pour une éprouvette de fluage protégée d'une couche ou de deux couches d'aluminium autoadhésif.

Perte de masse relative en %



On remarque qu'entre les deux types de protection, l'écart moyen de la perte en masse varie de 0,023 % à 0,1 % environ, soit un rapport proche de 4, ce qui est cohérent avec un doublement de l'épaisseur de la protection (phénomène de diffusion au travers de la « paroi » d'aluminium) qu'on traduit par un rapport d'environ 4 entre les coefficients  $k_{ECH}$ . On notera qu'en valeur absolue, le séchage moyen obtenu au bout de 100 semaines correspond à une perte de  $0,55 \text{ l/m}^3$  dans le cas des deux couches, et de  $2,48 \text{ l/m}^3$  pour une seule couche protectrice, la quantité d'eau évaporable étant au total de  $145 \text{ l/m}^3$  (d'où des pertes relatives égales respectivement à 0,38 % et 1,71 %). Il semble préférable donc d'employer systématiquement deux couches d'aluminium autoadhésif pour les essais de fluage propre et de retrait endogène, notamment parce que la dispersion du phénomène de séchage pourrait conduire à des pertes atteignant 4 % de l'eau évaporable, ce qui pourrait commencer à n'être plus négligeable.

## Conclusion

D'ambition au départ très modeste, cette étude comparative de diverses solutions pour protéger les éprouvettes de béton de la dessiccation a permis de répondre non seulement de façon qua-

litative et pratique aux questions que l'on se posait, mais aussi de maîtriser quantitativement (avec les limites de ce terme pour un phénomène fort dispersé) les propriétés d'échange des types de protections appliquées. S'il n'est pas vraiment apparu une alternative au double emballage dans l'aluminium autoadhésif pour les éprouvettes à conserver sur de longues durées, les limites des différentes autres techniques sur le court et moyen terme ont pu être cernées. La capacité à modéliser relativement correctement les essais grâce au module HEXO est rassurante quant aux calculs prédictifs qui peuvent être faits sur le séchage de pièces de béton de géométrie variée, avec différentes protections. On note d'ailleurs qu'une des sources d'incertitude importante, pour les calculs sur le long terme notamment, est la connaissance seulement approximative qu'on a généralement de l'isotherme de sorption-désorption pour le matériau considéré. On a cité quelques retombées pratiques de cette étude pour les essais de traction, ou ceux de retrait et de fluage. Mais il est probable, que dans beaucoup d'autres cas où la maîtrise de la teneur en eau libre du béton doit être contrôlée, on tirera profit d'un calcul du séchage avec des données fiables concernant les coefficients d'échange à appliquer. Il en va probablement de la validité de l'analyse des résultats qu'on pourra faire...

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ACKER P. (1988), *Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique*, Rapport de recherche des LPC 152, 122 pages.
- [2] BAROGHEL-BOUNY V. (1994), *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyses, interprétations*, Publications du LCPC, hors collection, déc., 468 pages.
- [3] LE ROY R. (1995), *Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances*, Thèse de doctorat, ENPC, sept., 378 pages.
- [4] GRANGER L. (1995), *Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires - analyse et modélisation*, Thèse de doctorat, ENPC, fév., 398 pages.

- [5] GRANGER L., TORRENTI, DIRUY J.-M. (1994) Simulation numérique du retrait du béton sous hygrométrie variable, *Bulletin liaison Labo. P. et Ch.*, **190**, mars-avr., pp. 57-64.
- [6] ROSSI P., BOULAY C. (1990), Influence de la présence d'eau libre au sein d'un béton sur le processus de fissuration de celui-ci, *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, t.**310**, Série II, pp. 1155-1161.
- [7] TOUTLEMONDE F. (1995), *Résistance au choc des structures en béton. Du comportement du matériau au calcul des ouvrages*, Publications du LCPC, hors collection, 348 pages.
- [8] NF P 18-404 Bétons (1981), *Essais d'étude, de convenance et de contrôle. Confection et conservation des éprouvettes*, déc.
- [9] NF P 18-406 Bétons. *Essai de compression*, déc.
- [10] NF P 18-405 Bétons (1981), *Essais d'information. Confection et conservation des éprouvettes*, déc.
- [11] LAPLANTE P. (1993), *Propriétés mécaniques des bétons durcissants : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances*, Études et Recherche des LPC **OA13**, déc., 300 pages.
- [12] DO M.-T., SHALLER I., de LARRARD F., AÏTCIN P.-C. (1995), Fatigue des bétons à hautes performances, *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, **536**, sept., pp. 1-27.
- [13] ATTOLOU A., BELLOC A., TORRENTI J.-M. (1989), Méthodologie pour une nouvelle protection du béton vis-à-vis de la dessiccation, *Bulletin liaison Labo. P. et Ch.*, **164**, nov.-déc., pp. 85-86.
- [14] MENSİ R., ACKER P., ATTOLOU A. (1988), Séchage du béton : analyse et modélisation, *Materials and Structures*, **21**, pp. 3-10.
- [15] PIAU J.-M. (1991) Les modèles de diffusion non-linéaire dans CESAR-LCPC, in *Manuel Théorique de CESAR-LCPC*.
- [16] ULM F.-J., GRANGER L. (1995), Calculs « HEXO » : *Diffusion de l'humidité dans le béton*, CESAR-LCPC, Notice d'utilisation, Rapport interne LCPC, janv., 14 pages.
- [17] ULM F.-J., ROSSI P., GUERRIER F. (1995), *Ferraillage minimum dans les aéroréfrigérants. Modélisation de la fissuration due aux gradients d'humidité et de température*, Contrat EDF/SEPTEN ND 1494, Partie II volet 2, 32 pages.
- [18] WALLER V., de LARRARD F., ROUSSEL P. (1996), Modelling the temperature rise in massive HPC structures (modélisation de l'élévation de température dans les structures massives en BHP), *BHP 96*, 4th International Symposium on Utilization of high-strength/high-performance concrete, Paris, 29-31 mai.

### Remerciements

Nous tenons à remercier de leur coopération MM. Belloc et Simitambe, lors de la fabrication des éprouvettes et leur emballage, ainsi que M. Le Béchec pour son aide dans l'analyse des incertitudes de mesure.

### ABSTRACT

#### The protection of concrete samples from dessication : some laboratory techniques

F. TOUTLEMONDE - F. LE MAOU

The authors describe an experimental study designed to compare and quantify various methods of protecting concrete from dessication by weighing samples kept under controlled conditions. The weighings are performed over a period of more than one year. The direct applications of this study relate in particular to the protection of tensile test samples and shrinkage or creep test samples. Lesser exchanges in the case of application of one or two coatings of self-adhesive aluminium are quantified. Epoxy resin used as a primary coating is insufficiently impervious to water vapour. Simulations using the CESAR-LCPC HEXO module make it possible to validate the interpretation and extrapolate the results to other types of samples.