



Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages

Abdelhafid Khelidj, Véronique Baroghel-Bouny, Guy Bastian, Jean Godin,
Géraldine Villain

► To cite this version:

Abdelhafid Khelidj, Véronique Baroghel-Bouny, Guy Bastian, Jean Godin, Géraldine Villain. Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages : Détermination expérimentale des gradients résultant d'une interaction hydratation-séchage dans une dalle en béton. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2006. hal-01002853

HAL Id: hal-01002853

<https://hal.science/hal-01002853>

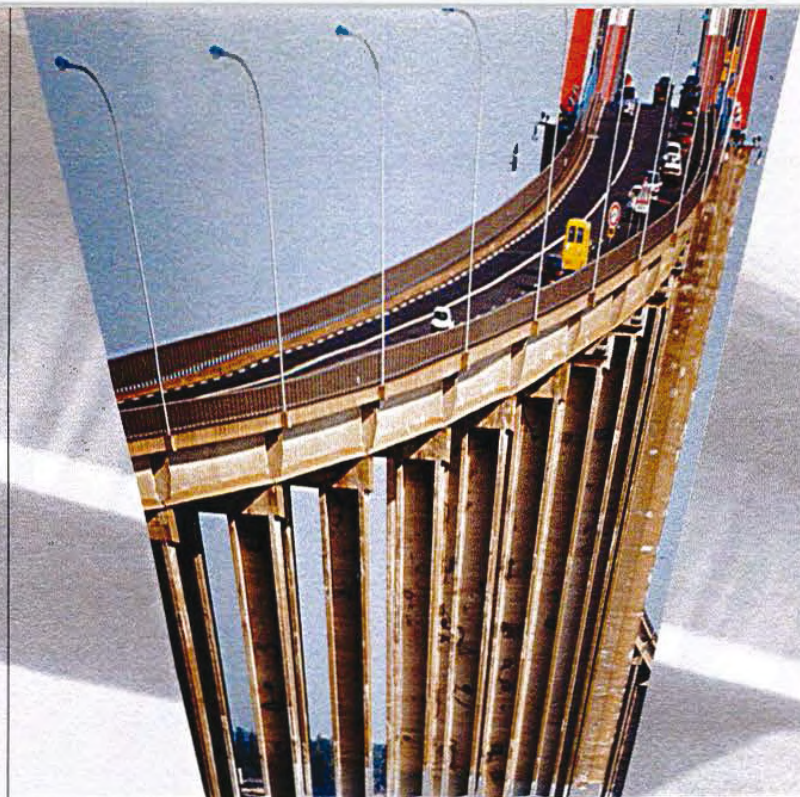
Submitted on 20 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Laboratoire
Central
des Ponts
et Chaussées



Ouvrages d'art OA 39

ISSN 1161-028X

A. Khelidj, V. Baroghel-Bouny, G. Bastian, J. Godin, G. Villain

Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages

Détermination expérimentale des gradients
résultant d'une interaction hydratation-séchage
dans une dalle en béton

ÉTUDES ET RECHERCHES
DES LABORATOIRES
DES PONTS ET CHAUSSEES

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



(CC BY-NC-ND 4.0)



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2
Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages

**Détermination expérimentale des gradients résultant
d'une interaction hydratation - séchage
dans une dalle en béton**

**A. Khelidj, V. Baroghel-Bouny, G. Bastian,
J. Godin, G. Villain**

Octobre 2002



**Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15**

Abdelhafid KHELIDJ
Maître de conférences
LGCNSN, IUT de Saint-Nazaire
Département de Génie civil

Véronique BAROGHEL-BOUNY
Ingénieur divisionnaire des Travaux publics de l'État
Docteur de l'École nationale des ponts et chaussées
Chef de la section "Microstructure et durabilité des bétons"
Division BCC
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Guy BASTIAN
Professeur
LGCNSN, IUT de Saint-Nazaire
Département de Génie civil

Jean GODIN
Ingénieur ESEO
Unité Physique des matériaux
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées d'Angers

Géraldine VILLAIN
Docteur-ingénieur des Travaux publics de l'État
Section "Microstructure et durabilité des bétons"
Divisions BCC
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Ce rapport est issu du thème de recherche du LCPC :
Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages (OA 9)

Pour commander cet ouvrage :
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
IST - Diffusion des Éditions
58, boulevard Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15
Téléphone 01 40 43 50 20 - Télécopie 01 40 43 54 85
ou serveur Internet LCPC : www.lcpc.fr

Prix : 15,24 €

Ce document est propriété de l'Administration et ne peut être reproduit, même partiellement,
sans l'autorisation du Directeur général du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
(ou de ses représentants autorisés)

© 2002 - LCPC

SOMMAIRE

NOTATIONS.....	5
PRÉSENTATION ET CADRE DE L'ÉTUDE.....	7
INTRODUCTION	9
1. FORMULATION ET FABRICATION DU MATÉRIAU	11
2. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DU MATÉRIAU.....	11
2.1. RÉSISTANCE À LA COMPRESSION	11
2.2. MODULE D'ÉLASTICITÉ.....	12
3. POROSIMÉTRIE ET PERMÉABILITÉ AUX GAZ DU MATÉRIAU.....	13
3.1. MATÉRIAU ET PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS	13
3.2. PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	14
3.2.1. Porosité accessible à l'eau.....	14
3.2.2. Porosimétrie au mercure.....	14
3.2.3. Perméabilité aux gaz.....	15
3.2.4. Mesures par gammadensimétrie	16
3.3. RÉSULTATS ET ANALYSE.....	17
3.3.1. Porosité accessible à l'eau.....	17
3.3.2. Mesures par intrusion de mercure.....	18
3.3.3. Suivi du préconditionnement des échantillons BOSN A, B, C et D destinés aux mesures de perméabilité aux gaz : pesées et essais de gammadensimétrie.....	21
3.3.4. Perméabilité aux gaz.....	23
4. DESCRIPTION DE L'EXPÉRIENCE DE SÉCHAGE RÉALISÉE SUR LES DALLES EN BÉTON.....	26
4.1. DALLES.....	26
4.2. EPROUVETTES.....	28
5. ÉVOLUTION DES VARIABLES INDÉPENDANTES EN FONCTION DE L'AVANCEMENT DU SÉCHAGE ET DE L'HYDRATATION.....	28
5.1. ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE.....	28
5.1.1. Résultats et discussion	28
5.2. DÉTERMINATION DES GRADIENTS DE TENEUR EN EAU PAR SONDES THERMOHYGROMÉTRIQUES.....	30
5.2.1. Principe des mesures	30
5.2.2. Analyse des résultats obtenus.....	30
5.3. DÉTERMINATION DES GRADIENTS DE TENEUR EN EAU PAR SONDES CAPACITIVES	33
5.3.1. Principe de la mesure	33
5.3.2. Dispositif expérimental.....	34
5.3.3. Etalonnage.....	34
5.3.4. Résultats obtenus sur la dalle.....	35
5.3.5. Etude de la phase d'hydratation sur éprouvettes	38
5.4. DÉTERMINATION DES GRADIENTS DE TENEUR EN EAU PAR GAMMADENSIMÉTRIE.....	40
5.4.1. Principe de la mesure.....	40
5.4.2. Dispositif expérimental.....	41
5.4.3. Méthodologie et précision de la mesure	42
5.4.4. Résultats.....	42
5.5. COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MESURE DES GRADIENTS DE TENEUR EN EAU.....	44
6. MESURE DES PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES	46
6.1. PRÉSENTATION	46
6.2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL.....	47
6.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	49
6.4. ANALYSE ET DISCUSSION	52
7. PARAMÈTRES DU TRANSFERT HYDRIQUE.....	53

7.1.	MESURE DE LA DIFFUSIVITÉ MASSIQUE (HYDRIQUE) ISOTHERME SUR LA DALLE (MÉTHODE DYNAMIQUE).....	53
7.1.1.	<i>Présentation.....</i>	53
7.1.2.	<i>Montage expérimental.....</i>	53
7.1.3.	<i>Résultats.....</i>	55
7.2.	DÉTERMINATION DE LA DIFFUSIVITÉ MASSIQUE (HYDRIQUE) SUR ÉPROUVETTE PAR LA MÉTHODE DE LA COUPELLE.....	55
7.2.1.	<i>Principe de la mesure.....</i>	55
7.2.2.	<i>Dispositif expérimental et méthodologie.....</i>	56
7.2.3.	<i>Résultats expérimentaux.....</i>	58
7.3.	COMPARAISON DES DEUX MÉTHODES DE MESURE DE LA DIFFUSIVITÉ HYDRIQUE	60
7.3.1.	<i>Approche dynamique.....</i>	60
7.3.2.	<i>Approche statique</i>	61
7.3.3.	<i>Confrontation des deux approches.....</i>	62
8.	ETUDE DES DÉFORMATIONS : DE L'ÉPROUVETTE À LA STRUCTURE	63
8.1.	DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES RÉALISÉES ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	63
8.1.1.	<i>Résultats obtenus sur éprouvettes</i>	64
8.1.2.	<i>Résultats obtenus sur la dalle.....</i>	66
8.2.	ANALYSE DES RÉSULTATS.....	68
9.	SYNTHÈSE ET MISE EN ÉVIDENCE DES INTERACTIONS ENTRE HYDRATATION ET SÉCHAGE	69
10.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	70
11.	BIBLIOGRAPHIE	72
12.	ANNEXES.....	74
12.1.	ANNEXE 1 : COMPOSITION CHIMIQUE ET MINÉRALOGIQUE DU CIMENT	74
12.2.	ANNEXE 2 : DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DES COEFFICIENTS DE TRANSFERT DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ	75
12.2.1.	<i>Modélisation des transferts.....</i>	75
12.2.2.	<i>Transfert de chaleur à teneur en eau constante</i>	75
12.2.3.	<i>Transfert d'humidité isotherme.....</i>	79

Notations

Symbole	Signification physique	Unité
a	Diffusivité thermique	m^2/s
A	Section en (m^2) ou constante représentant la sensibilité de la mesure par sondes capacitives	
B	Constante liée à l'oscillateur utilisé lors de mesures par sondes capacitives	
c	Capacité thermique massique	J/kg.K
C	Capacité électrique	F
C_m	Perte de l'isotherme de désorption de vapeur d'eau $w(\phi)$ ("capacité hydrique")	sans unité ou en %
D_{dyn}	Diffusivité massique (hydrique) déterminée par une méthode dynamique	m^2/s
D_{stat}	Diffusivité massique (hydrique) déterminée par la méthode de la coupelle	m^2/s
F	Fréquence	Hz
j_L	Densité linéique moyenne de flux d'humidité (vapeur d'eau)	kg/m.s
j_m	Densité de flux massique (vapeur + liquide)	kg/s. m^2
j_v	Densité de flux massique (vapeur d'eau)	kg/s. m^2
K	Perméabilité aux gaz	m^2
k	Coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau	m/s
K_{int}	Perméabilité aux gaz intrinsèque (au sens de Klinkenberg)	m^2
L	Longueur	m
N	Nombre de photons détectés après traversée du matériau	c/s
N_0	Nombre de photons détectés sans matériau	c/s
P_0	Pression atmosphérique	Pa
P_{adm}	Pression d'admission de gaz	Pa
P_{moy}	Pression de gaz moyenne entre P_0 et P_{adm}	Pa
p_{v1}	Pression partielle de vapeur d'eau du milieu 1	Pa
p_{v2}	Pression partielle de vapeur d'eau du milieu 2	Pa
Q	Débit volumique de gaz	m^3/s

r	Rayon	m
s	Taux de saturation	%
T	Température	°C ou K
t	Temps	s
t_c	Durée de chauffage	s
t^*	Temps adimensionnel	
T^*	Température adimensionnelle	
v	D.d.p. aux bornes du fil	V
w	Teneur en eau massique	g/100g ou en %
w_a	Humidité absolue de l'air	kg/kg d'air sec
X	Coefficient lié à la géométrie des électrodes des sondes capacitives	
x	Distance ou épaisseur	m
Z	Coefficient lié à la géométrie du banc gamma.	
α, β	Coefficients liés à la géométrie des électrodes des sondes capacitives	
β	Constante de Klinkenberg ou coefficient lié à la géométrie des électrodes des sondes capacitives	
ΔM_v	Perte relative de masse volumique	%
ϵ'	Permittivité diélectrique apparente d'un matériau	F/m
ϵ^0	Permittivité diélectrique du vide	F/m
η	Viscosité dynamique	Pa.s
φ	Humidité relative	%
λ	Conductivité thermique	W/m.K
λ_m	Conductivité à l'humidité	kg/s.m.%
μ'	Coefficient d'absorption massique	m ² /kg
π	Coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau	kg/s.m.Pa
ρ	Masse volumique apparente	kg/m ³
ρ_0	Masse volumique apparente d'un matériau à l'état sec	kg/m ³
$\rho_0 C$	Chaleur volumique	J/m ³ .K
ρ_s	Masse volumique d'un matériau à l'état saturé	kg/m ³

Présentation et cadre de l'étude

Le Thème de Recherche "*Transferts dans les Bétons et Durabilité des Ouvrages*" (OA 9), animé par V. Baroghel Bouny (Chef de la Section "Microstructure et Durabilité des Bétons" du LCPC) a débuté en 1995 avec la volonté de mener une action coordonnée entre le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, les laboratoires universitaires et du CNRS, et l'industrie en pointe dans le domaine de la durabilité des bétons, afin de parvenir à des résultats significatifs en la matière.

L'objectif général de ce programme était de fournir des éléments quantitatifs pour une meilleure maîtrise de la durée de vie des ouvrages en béton armé ou précontraint.

Plus précisément, les trois sujets proposés dans le Thème de Recherche visaient à évaluer et à prévoir l'aptitude des bétons aux transferts sous forme liquide ou gazeuse, à partir d'une description pertinente des caractéristiques microstructurales et des propriétés hydriques du matériau, et grâce à la compréhension des processus physico-chimiques mis en jeu.

Dans une telle approche deux étapes apparaissaient indispensables :

- analyser correctement tous les mécanismes physiques et chimiques intervenant dans les processus de carbonatation (sujet n° 2 du Thème) ou de pénétration des chlorures (sujet n° 3), causes majeures de la corrosion des armatures du béton armé, ou encore, de façon plus générale et basique, dans le séchage du béton (sujet n° 1),
- être capable de déterminer, par des méthodes expérimentales, numériques ou combinant modèle et expérience, les coefficients de transfert du matériau (perméabilité, diffusivité) qui, étant donné leur rôle clé dans les processus de transfert, et donc vis-à-vis de la durabilité, pourraient alors être considérés comme des *indicateurs de durabilité*.

Au cours de la vie des ouvrages en béton, le séchage du matériau, ou plus exactement les cycles de séchage-humidification, interviennent de façon concomitante avec son hydratation et ce, dès le décoffrage. Seule l'analyse précise des interactions entre ces deux processus peut permettre de comprendre, puis de prévoir, les conséquences qui sont observées sur les structures, en particulier les déformations différentielles des dalles en béton.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent rapport qui synthétise les travaux menés en collaboration par trois équipes : le Laboratoire de Génie Civil de Nantes Saint-Nazaire (L.G.C.N.S.N., site de l'IUT de Saint-Nazaire), le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers (L.R.P.C.) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.), dans le cadre du Thème de Recherche "*Transferts dans les Bétons et Durabilité des Ouvrages*".

Ce travail a été réalisé sur la base d'une expérimentation de grande ampleur, sur une dalle et des éprouvettes, mettant en œuvre une panoplie très complète de méthodes d'investigation.

Outre les déformations, un grand nombre de paramètres (microstructuraux, thermiques, hydriques, ...) ont été mesurés, et leur évolution a été suivie au cours du temps, dès le plus jeune âge et pendant plusieurs mois.

Notamment, d'importants gradients de ces propriétés ont pu être mis en évidence et quantifiés entre le cœur de la structure et la surface exposée au séchage.

Introduction

Lors de la construction d'ouvrages de génie civil, on assiste de plus en plus à un décoffrage rapide des structures en béton, afin d'optimiser l'utilisation des coffrages et la durée du chantier (rotation des banches etc...). Cette technique a été rendue possible par l'utilisation de bétons atteignant une résistance élevée au jeune âge (béton à hautes et très hautes performances). Cependant, au moment du décoffrage, l'hydratation du béton n'est pas achevée. On assiste alors à une interaction entre deux phénomènes : consommation de l'eau liquide par hydratation du ciment et transfert de l'eau vers le milieu ambiant et évaporation par séchage. Ces deux phénomènes sont générateurs de retraits différentiels, car le séchage se produit lui-même avec un gradient d'humidité entre la surface exposée au séchage et le cœur de l'ouvrage.

Dans cette étude, on s'intéresse à la mesure des différents paramètres et gradients générés par l'interaction de l'hydratation et du séchage dans une dalle. Les dalles peuvent en effet être classées parmi les structures décoffrées rapidement, étant donné qu'elles présentent dès le coulage une surface en contact permanent avec le milieu ambiant. Il est d'ailleurs souvent proposé des cures pour améliorer la durabilité de la structure (Aïtcin et al [1]).

Les paramètres mesurés dans le cadre du programme présenté ici sont les suivants :

Le gradient de teneur en eau qui est à l'origine de tous les autres gradients. Ce gradient est dû au séchage. La teneur en eau (et sa variation spatio-temporelle) a été mesurée par trois méthodes différentes. La première méthode consiste en la mesure de l'humidité relative interne à l'aide de sondes thermohygrométriques enfoncées dans des réservations pratiquées lors du coulage de la dalle. La deuxième méthode consiste en la mesure de la fréquence de résonance entre deux armatures capacitatives implantées dans le béton. Cette fréquence est corrélée à la teneur en eau sur un échantillon coulé à part. La troisième méthode permet d'accéder à la connaissance de la teneur en eau par la mesure de la densité du matériau par rayonnement gamma. Ces mesures ont été effectuées sur une éprouvette issue de la dalle compartimentée décrite plus loin dans ce rapport.

Les paramètres thermophysiques : conductivité thermique et chaleur volumique. Ces deux paramètres sont très utilisés dans les codes de calcul en vue de la prédiction des températures dans les ouvrages massifs en béton. Ces calculs sont très importants car ils permettent de prévoir les désordres (par exemple, la fissuration d'origine thermique) souvent observés. Ces désordres sont générés par des dilatations ou retraits empêchés. Or, dans tous les codes de calcul, ces paramètres semblent considérés comme constants quelles que soient les conditions aux limites de la structure. Nous montrerons expérimentalement dans ce travail qu'un gradient s'établit entre la surface exposée au séchage et le cœur de l'ouvrage.

Le gradient de température durant l'hydratation : ce gradient, bien qu'il ne soit pas très important dans le cas d'une dalle, considérée comme mince, a été mis en évidence par la mesure de la température dès le coulage, à l'aide de thermocouples implantés dans la dalle.

Le gradient de degré d'hydratation : l'hydratation du béton s'effectue en fonction de la quantité d'eau présente dans le béton. Or, au cours du séchage, la zone près de la surface exposée au séchage voit son humidité relative ϕ chuter rapidement, alors qu'au cœur de cette même dalle l'humidité relative reste élevée et stable. Il est donc évident que l'évolution du degré d'hydratation au cours du temps est fonction de la cote dans l'épaisseur de la dalle. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le séchage est intense. Il a été observé [2] que l'hydratation était arrêtée à la surface d'une éprouvette 4 jours après le coulage du béton. On verra qu'ici le gradient n'a pu être mis en évidence, probablement à cause des techniques de mesure et des techniques de prélèvement d'échantillon employées.

Le gradient de diffusivité massique hydrique : deux méthodes de mesure sont proposées dans cette étude. La première méthode mise au point à l'IUT de Saint-Nazaire, dite méthode dynamique, consiste en l'exploitation de la courbe de réaction d'un béton à un créneau de séchage. Quatre canaux ont été percés à des cotes différentes dans la dalle, afin d'effectuer ces mesures dynamiques d'humidité relative. On verra que le gradient n'a pu être observé précisément à cause des incertitudes sur les mesures. Nous montrerons par contre que la diffusivité massique hydrique varie avec le temps et la teneur en eau, pour une cote donnée. Nous pensons que l'amélioration de la technique utilisée peut conduire à mettre en évidence ce gradient. Un tel travail n'a jamais été réalisé auparavant à notre connaissance. La deuxième méthode, dite méthode de la coupelle, a été pratiquée au LRPC d'Angers sur une éprouvette issue de la dalle compartimentée. Les deux méthodes donnent des valeurs très différentes ; une tentative d'explication de cette différence est donnée dans ce rapport.

Par ailleurs et en parallèle à toutes ces mesures de gradients, les effets générés par l'hydratation et le séchage ont été mesurés, à savoir les retraits (endogène et total), les déflexions sur la surface séchante de la dalle, ainsi que les propriétés intrinsèques du matériau (la résistance à la compression R_c , le module d'élasticité dynamique E , la porosité et la perméabilité).

1. Formulation et fabrication du matériau

Le matériau utilisé est un béton ordinaire (référéncé BOSN) proche de celui étudié par [3]. Sa composition par m^3 de béton vibré est donnée dans le tableau 1. Les caractéristiques des constituants sont reprises de [3] et données en Annexe 1. La fabrication du béton a été effectuée dans un malaxeur de chantier. Deux gâchées de 300 litres chacune ont été nécessaires pour la confection de tous les corps d'épreuve (dalles et éprouvettes). Le processus opératoire pour la préparation du béton était le suivant :

- Introduction successive des gravillons, des sables et du ciment,
- malaxage à sec pendant 1 min,
- puis, le malaxeur étant en mouvement, ajout d'eau pendant 30 s,
- poursuite du malaxage pendant 2 min,

soit au total 3 min 30 s .

Tableau 1 : Formulation du béton BOSN

Constituant		Quantité (en kg/m^3)
Gravillon calcaire du Boulonnais	12,5/20	776
Gravillon calcaire du Boulonnais	4/12,5	414
Sable du Boulonnais	0/5	360
Sable de Seine	0/4	354
Ciment CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2 "HTS" du Teil (Lafarge)		353
Eau		204
E/C		0,578
G/S		1,667
Porosité moy. (accessible à l'eau)		14,3%
Résistance caractéristique à la compression à 28 jours		33 MPa

2. Caractéristiques mécaniques du matériau

2.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression uniaxiale a été mesurée à l'aide d'une presse "Perrier" d'une portée de 1250 kN et pilotée en force. Juste après leur coulage, les éprouvettes $\phi 110 \times 220$ mm ont été stockées dans une chambre humide à $HR \approx 100\%$ et à $T = 20 \pm 1^\circ C$ jusqu'aux échéances de l'essai, à savoir 1, 5, 7, 14 et 28 jours après le coulage. Les essais ont été effectués suivant la norme NF P 18-406. A chaque échéance, trois éprouvettes ont été testées. Les valeurs représentées sur la Figure 1 représentent la moyenne des trois essais.

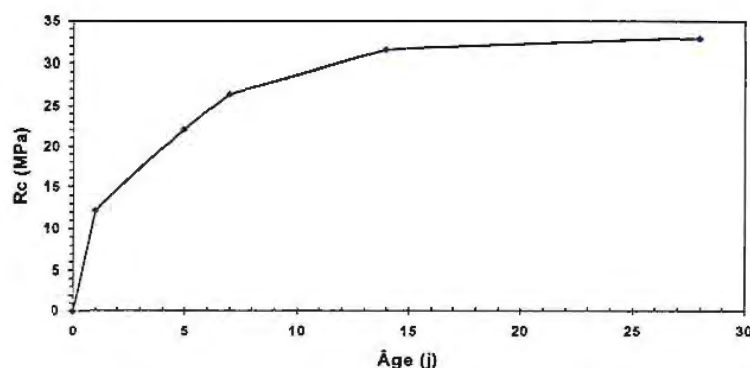


Figure 1 : Résistance à la compression en fonction de l'âge du béton BOSN

2.2. Module d'élasticité

Le module d'élasticité dynamique du béton a été déterminé sur une éprouvette $\phi 110 \times 220$ mm à l'aide d'un dispositif de mesure non destructif : le Grindosonic. Cette méthode constitue un mode dynamique de détermination des caractéristiques élastiques des matériaux. Le principe consiste à exciter l'éprouvette par une légère impulsion mécanique et analyser le phénomène de vibration transitoire qui s'ensuit. Cette vibration est déterminée par la géométrie et les propriétés physiques de l'échantillon. Un détecteur piézo-électrique permet de capter la vibration propre et la transforme en signal électrique. Les résultats apparaissent sous forme de fréquence de résonance exprimée en Hz. Le dispositif est doté d'un logiciel qui convertit les fréquences en module d'élasticité en utilisant un modèle développé par Spinner et Tefft [4] basé sur la théorie des vibrations libres. Des mesures comparatives entre le module d'élasticité statique (pente à l'origine de la courbe contrainte-déformation) et le module dynamique obtenu au Grindosonic, ont montré que ce dernier était légèrement supérieur (de l'ordre de 6%) [5]. Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 2. Au bout de 28 jours, le béton atteint un module de 40 GPa. Ce résultat est conforme à ceux obtenus par d'autres auteurs sur un béton se rapprochant de celui étudié ici [3].

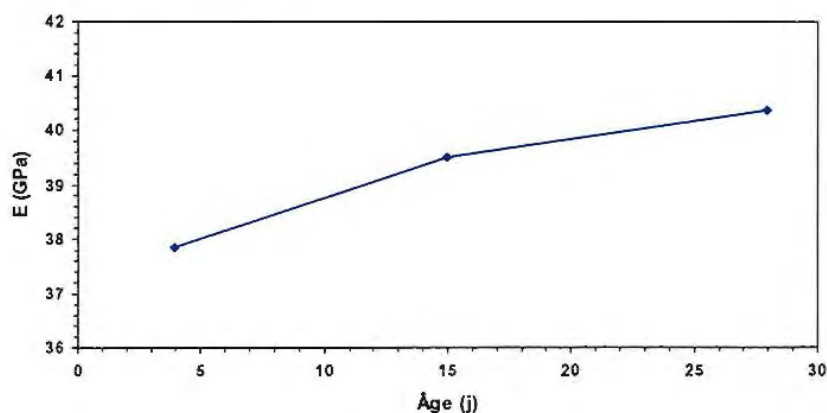


Figure 2 : Evolution du module d'élasticité en fonction de l'âge du béton BOSN

3. Porosimétrie et perméabilité aux gaz du matériau

3.1. Matériau et préparation des échantillons

Les échantillons référencés BOSN A, B, C et D, destinés aux mesures de porosité accessible à l'eau et de perméabilité au gaz, ont été prélevés dans une éprouvette cylindrique de 150 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur, après 3 mois de conservation à $T = 20 \pm 1$ °C et à HR = 100%. Leurs positions relatives dans ce cylindre sont données en Figure 2. Ces échantillons ont un diamètre égal à 150 mm et une hauteur égale à 50 mm, dimensions requises par le dispositif de mesure de perméabilité aux gaz. Préalablement aux mesures de porosité et de perméabilité, le pourtour de ces échantillons a été protégé des échanges hydriques avec l'extérieur par deux feuilles superposées de papier aluminium adhésif.

Des fragments de béton ont été prélevés dans la partie centrale du cylindre Ø150x300 mm pour les mesures de "référence" de porosimétrie au mercure (échantillons référencés : Ref1 et Ref2).

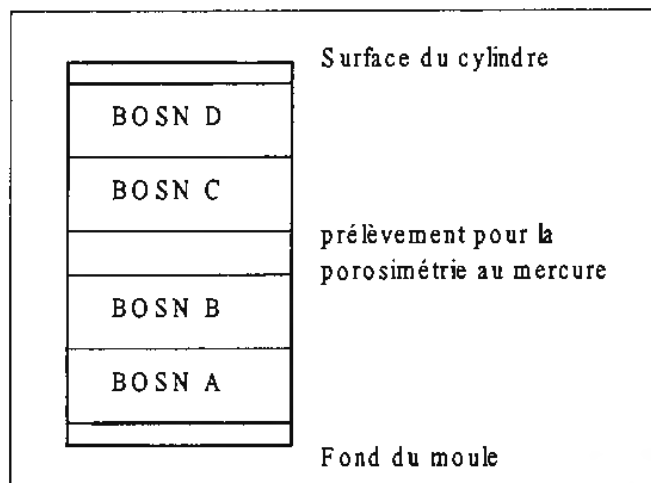


Figure 3 : Schéma de prélèvement des échantillons destinés aux mesures de porosité et de perméabilité aux gaz

Des prélèvements ont également été effectués dans deux prismes 80x80x160 mm (P1 et P2) issus de la dalle compartimentée dont la surface supérieure avait été exposée à $T = 20 \pm 1$ °C et à HR = $50 \pm 5\%$ pendant 3 mois, afin d'effectuer des mesures par intrusion de mercure à deux distances différentes de la surface séchante (cf. Photo 1) :

- à 10 mm de la surface supérieure des prismes : entre 5 et 15 mm (échantillons référencés P1h et P2h),
- à 80 mm de la surface supérieure des prismes : entre 75 et 85 mm (échantillons référencés P1b et P2b).

Ces mesures permettront d'observer l'influence du séchage sur l'hydratation du ciment et donc sur la structure poreuse de la matrice cimentaire au voisinage de la surface séchante et au cœur de l'éprouvette.



Photo 1 : Prismes sur lesquels ont été effectués les prélèvements destinés aux mesures par intrusion de mercure

3.2. Procédures expérimentales

3.2.1. Porosité accessible à l'eau

Des mesures de porosité accessible à l'eau ont été réalisées par pesée hydrostatique, suivant le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM [6]. Les pesées ont été réalisées à la précision de 0,01 g.

3.2.2. Porosimétrie au mercure

Des mesures par intrusion de mercure ont été effectuées pour caractériser la structure poreuse des matériaux (en particulier, détermination de la porosité volumique totale et de la distribution des tailles de pores). L'eau liquide, de même que les gaz et les vapeurs contenus dans les pores du matériau doivent être enlevés par un séchage et un dégazage préalables des échantillons avant la mesure proprement dite, afin que l'ensemble du réseau poreux soit accessible au mercure. Le prétraitement des échantillons (masse ≈ 20 g) a été réalisé ici à l'âge de 3 mois par "cryosublimation" (piège à froid à -55°C) sous vide et au-dessus de gel de silice pendant 48 heures, après immersion dans de l'azote liquide. Les réactions d'hydratation du ciment sont en outre en principe inhibées par ce processus.

La mesure a été réalisée avec un porosimètre à mercure équipé de deux postes (*Pascal 140* et *Porosimeter 2000 WS*) où la pression d'injection maximale vaut 200 MPa. Seuls les pores dont le rayon r_p vérifie $37\text{Å} < r_p < 60\mu\text{m}$, sont accessibles avec cet appareil.

3.2.3. Perméabilité aux gaz

Les mesures de perméabilité aux gaz ont été réalisées avec un perméamètre à charge constante CEMBUREAU [7]. Le gaz utilisé ici pour la mesure est l'air.

La perméabilité d'une éprouvette de béton dépend de la structure poreuse du matériau et également de la répartition de sa teneur en eau : la perméabilité augmente quand le taux de saturation moyen de l'éprouvette diminue. Pour déterminer la perméabilité (en m^2) d'un béton, il est donc nécessaire d'une part, de sécher, au moins partiellement, l'éprouvette destinée à la mesure afin que le gaz puisse percoler à travers cette éprouvette, et d'autre part, de connaître le taux de saturation moyen (ou mieux, la répartition de la teneur en eau) de l'éprouvette au moment de la mesure.

Les échantillons destinés aux mesures de perméabilité ont été ici préconditionnés de la façon suivante :

- selon le mode opératoire AFPC-AFREM [6] pour les échantillons BOSN A et BOSN B : saturation en eau sous vide, puis séchage en étuve ventilée à $T = 80 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 28 jours, suivi d'un séchage (par les deux faces planes) en étuve ventilée à $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de la masse (différence entre 2 pesées - à la précision de 0,01g et effectuées à 24 heures d'intervalle - inférieure à 0,05%). La progression du séchage est suivie par des pesées régulières des échantillons. La perméabilité est mesurée après 7 et 28 jours de séchage à $T = 80 \pm 5^\circ\text{C}$, puis après séchage complet à $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$ (cf. Figure 4) ;
- selon le mode AFREM' pour les échantillons BOSN C et BOSN D : les échantillons sont préalablement saturés sous vide, puis introduits dans une étuve où la température augmente de 30 à 80°C à raison de 5°C par jour (durée : 9 jours), puis séchés à $T = 80 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 21 jours et enfin à $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à stabilisation de la masse (séchage par les deux faces planes). Les échéances de mesure de la perméabilité sont 9 + 7 jours, 9 + 21 jours et à l'issue du séchage complet à $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$. Vu que la mesure de perméabilité est réalisée à $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, des paliers intermédiaires à $T \approx 45^\circ\text{C}$ ont été utilisés pour le refroidissement puis le réchauffement de l'échantillon à chaque échéance de mesure de la perméabilité (cf. Figure 4). Ce préconditionnement AFREM' a été utilisé de manière comparative, dans l'intention première d'éviter une microfissuration éventuelle du béton due aux chocs thermiques entre 20 et 80°C et susceptible d'influencer la mesure de perméabilité.

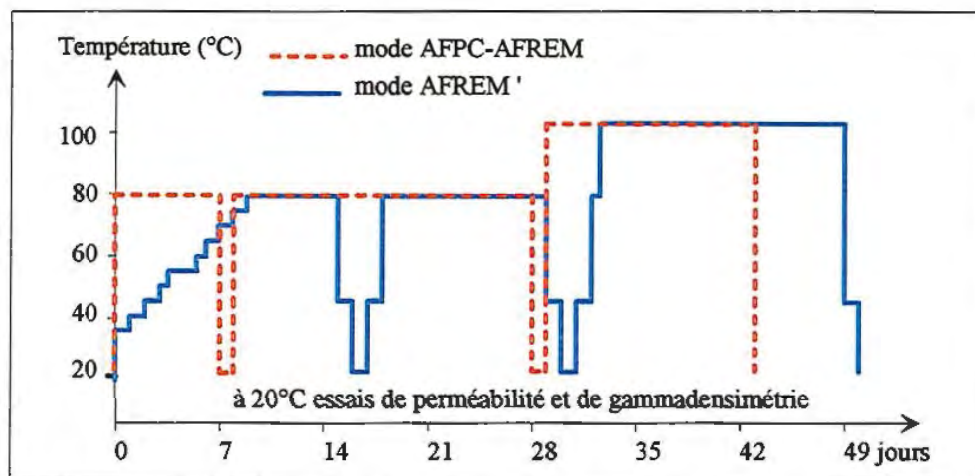


Figure 4 : Schéma chronologique des mesures de perméabilité aux gaz, suivant le préconditionnement adopté

La perméabilité aux gaz K (en m^2) est obtenue à partir de la mesure du débit Q d'air entrant à la pression d'admission P_{adm} et sortant à la pression atmosphérique P_0 [7].

$$K = \frac{2P_0 Q x \eta}{A(P_{adm}^2 - P_0^2)} \quad (1)$$

avec x l'épaisseur, A la section de l'échantillon et η la viscosité dynamique de l'air (en Pa.s).

En outre, afin de déterminer la perméabilité "intrinsèque" K_{int} définie par Klinkenberg [8] comme l'ordonnée à l'origine de la droite donnant la perméabilité en fonction de l'inverse de la pression moyenne P_{moy} (moyenne entre la pression atmosphérique et la pression d'admission du gaz), les mesures ont été réalisées à 3 pressions d'admission différentes comprises entre 1,5 et 6 bars :

$$K = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_{moy}} \right) \quad (2)$$

avec

$$P_{moy} = \frac{P_0 + P_{adm}}{2} \quad (3)$$

et β : constante de Klinkenberg.

3.2.4. Mesures par gammadensimétrie

Les échantillons BOSN A, B, C et D destinés aux mesures de perméabilité aux gaz ont également été soumis à des mesures gammadensimétriques (cf. § 5.4.1.) à chaque échéance de mesure de la perméabilité aux gaz, afin de déterminer leur profil hydrique au cours du préconditionnement.

Les mesures ont été réalisées à 5, 12, 19, 25, 31, 38 et 45 mm de la surface inférieure de chaque éprouvette, afin d'observer le gradient de teneur en eau avec suffisamment de précision (cf. Figure 5) :

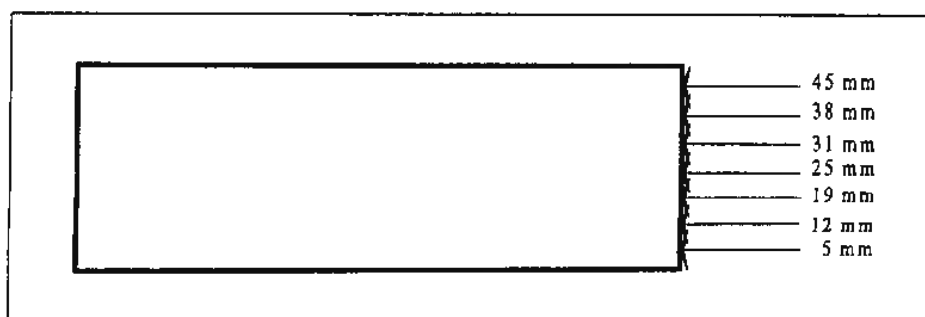


Figure 5 : Position des mesures de gammadensimétrie

Les essais ont été réalisés à l'état saturé, à l'état sec et à différentes étapes au cours du préconditionnement :

- pour le mode AFPC-AFREM, après 7, 28 et 43 jours de séchage,
- pour le mode AFREM, après 9+7, 9+21 et 9+41 jours de séchage (cf. Figure 4).

Si ρ est la masse volumique apparente mesurée à une échéance donnée, ρ_s celle à l'état saturé et ρ_0 celle à l'état sec, il est possible de calculer pour chaque hauteur et pour chaque échéance :

- la perte relative de masse volumique (en %) :

$$\Delta M_v = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \cdot 100 \quad (4)$$

- la teneur en eau du béton (en %) :

$$w = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \cdot 100 \quad (5)$$

- le taux de saturation (en %) :

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_s - \rho_0} \cdot 100 \quad (6)$$

Par ailleurs, les éprouvettes ont été resaturées à l'issue du séchage complet à $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$. La pesée de chaque éprouvette a permis de vérifier que les quantités d'eau ayant pénétré dans les éprouvettes lors de cette saturation et lors de la saturation initiale étaient pratiquement identiques (différence de quelques %).

3.3. Résultats et analyse

3.3.1. Porosité accessible à l'eau

Le matériau étudié a une porosité accessible à l'eau relativement élevée résultant d'une quantité d'eau de gâchage importante ($E/C = 0,578$).

Les résultats de porosité à 3 mois sont dispersés : $14,3\% \pm 1\%$ (cf. Tableau 2), mais l'évolution des valeurs de porosité en fonction de la hauteur ne résulte pas a priori d'une ségrégation du

matériau, l'échantillon de plus faible porosité (D) ayant été prélevé dans la partie haute du cylindre.

Tableau 2 : Valeurs de porosité accessible à l'eau enregistrées sur BOSN A, B, C et D

	BOSN A	BOSN B	BOSN C	BOSN D	Valeurs moyennes
Porosité (%)	14,6	15,2	14,0	13,3	14,3
Densité apparente	2,30	2,29	2,29	2,32	2,30

L'essai pratiqué (pesée hydrostatique) permet également de déterminer la densité apparente du matériau. Les valeurs obtenues, reportées dans le Tableau 2, sont tout à fait classiques et représentatives du matériau étudié. Elles sont en outre identiques à celles obtenues par intrusion de mercure (cf. § 3.3.2.).

3.3.2. Mesures par intrusion de mercure

Les résultats des mesures par intrusion de mercure obtenus sur le béton BOSN âgé de 3 mois sont présentés dans le Tableau 3 et sur les Figures 6 à 9.

Tableau 3 : Résultats des mesures par intrusion de mercure

Echantillon		Volume cumulé (mm ³ /g)	Rayon moyen des pores (Å)	Densité apparente	Porosité (%)
Réf.	Position				
Ref1		43,44	3400	2,28	9,9
Ref2		44,12	3600	2,30	10,2
P1	1 cm : h	48,09	2675	2,27	10,9
	8 cm : b	42,22	138	2,30	10,9
P2	1 cm : h	37,60	130	2,33	8,7
	8 cm : b	46,48	140	2,30	10,7

Comme on l'observe systématiquement sur la plupart des bétons, les valeurs de porosité déterminées ici par intrusion de mercure sont inférieures aux valeurs de porosité accessible à l'eau obtenues par pesée hydrostatique. En effet, seuls les pores tels que $37\text{Å} < r_p < 60\mu\text{m}$ sont accessibles ici par intrusion de mercure, alors qu'avec l'eau, les pores sont en principe tous explorés, aux problèmes de cinétique près (dépendant des dimensions de l'échantillon).

Ces considérations mettent l'accent sur le fait qu'une valeur de porosité n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau. Celle-ci est conditionnée à la fois par la méthode de prétraitement des échantillons et par la technique d'investigation. Il est de fait toujours nécessaire d'accompagner de ces deux informations tout résultat de porosité, sans quoi il perdrait toute signification.

Les Figures 6 à 9 mettent en évidence une distribution de tailles de pores bimodale :

- un premier mode poreux apparaît dans le domaine des grands rayons de pores capillaires, centré autour de 3500 Å. A l'échelle considérée, ce mode est caractéristique des pâtes et bétons de rapport E/C supérieur ou égal à 0,55 (cette valeur dépend en fait du ciment utilisé),
- un second mode poreux apparaît dans le domaine des petits rayons de pores capillaires, centré autour de 120 Å. Ce pic correspond aux pores situés entre les amas d'hydrates et il est toujours localisé aux environs de 100-200 Å pour les pâtes et bétons de ciment CPA-CEM I et sans ultrafines, quel que soit le rapport E/C [3].

En outre, toutes les courbes obtenues sont similaires et caractérisent bien le même matériau.

La Figure 6 (mesures effectuées sur les échantillons de référence) illustre la bonne répétabilité des mesures.

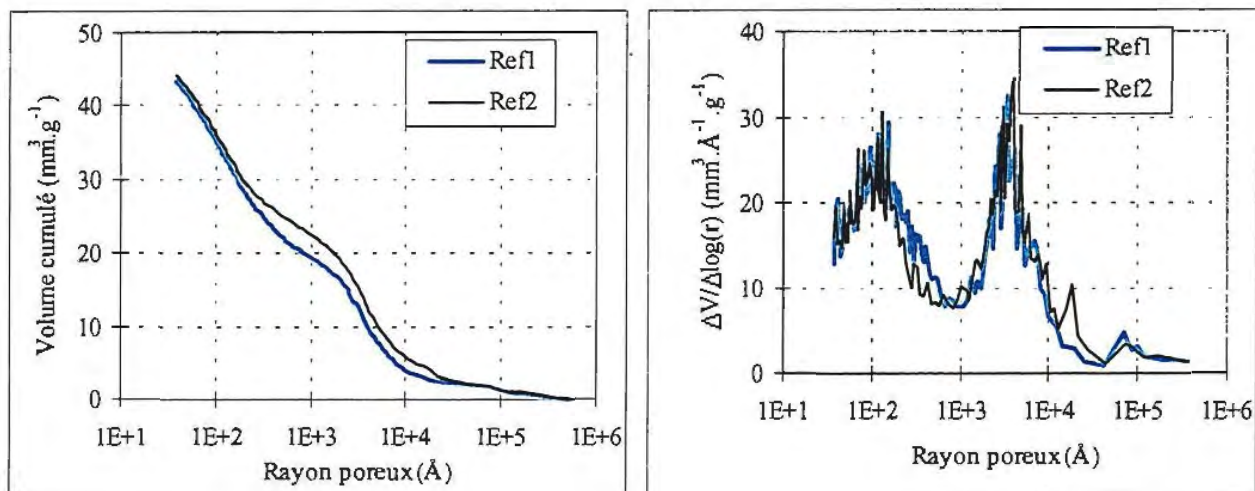


Figure 6 : Courbes de volume cumulé et distributions des tailles de pores obtenues par intrusion de mercure sur les échantillons Ref1 et Ref2 (au cœur du cylindre Ø150x300 mm)

La Figure 7 indique que le matériau se trouvant à 80 mm de la surface séchant du prisme (P1b) est très semblable à celui de l'échantillon de référence (Ref2).

D'après les Figures 8 et 9, le pic de la zone 100-200 Å est d'amplitude plus faible dans la partie haute des deux prismes (échantillons P1h et P2h), comparé à celui obtenu pour la partie basse (échantillons P1b et P2b). Ceci témoigne sans doute d'une hydratation gênée par le séchage dans la zone proche de la surface (moins de CSH se forment). Toutefois, la différence aurait sans doute été plus marquée si le prélèvement avait pu être effectué au voisinage immédiat de la surface. De plus, la ségrégation du béton dans le prisme en fonction de la hauteur, visible à l'œil nu (cf. Photo 1), est susceptible d'engendrer un gradient supplémentaire des caractéristiques microstructurales en fonction de la hauteur.

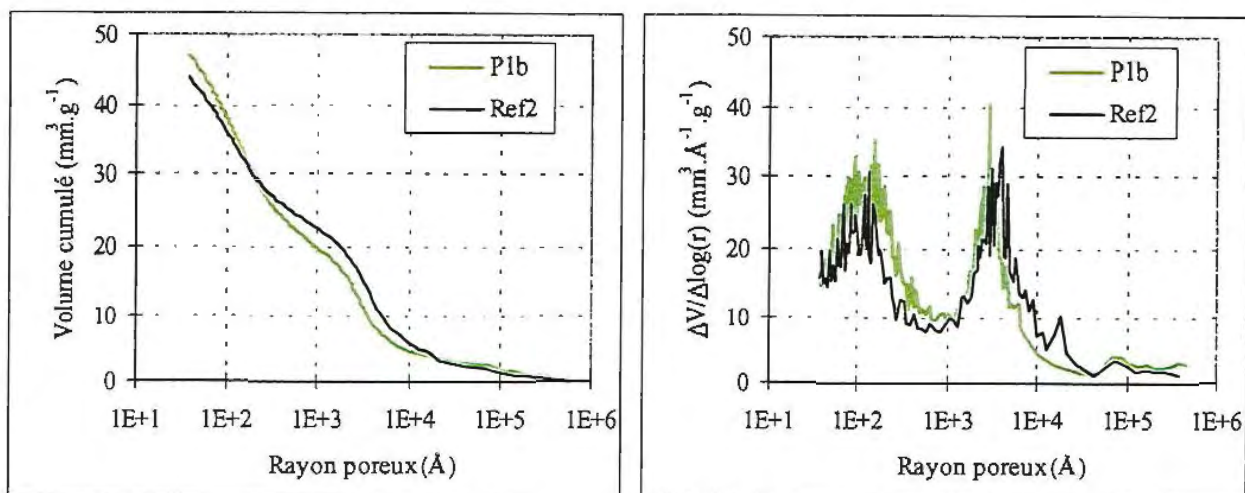


Figure 7 : Courbes de volume cumulé et distributions des tailles de pores obtenues par intrusion de mercure sur les échantillons Réf 2 et P1b

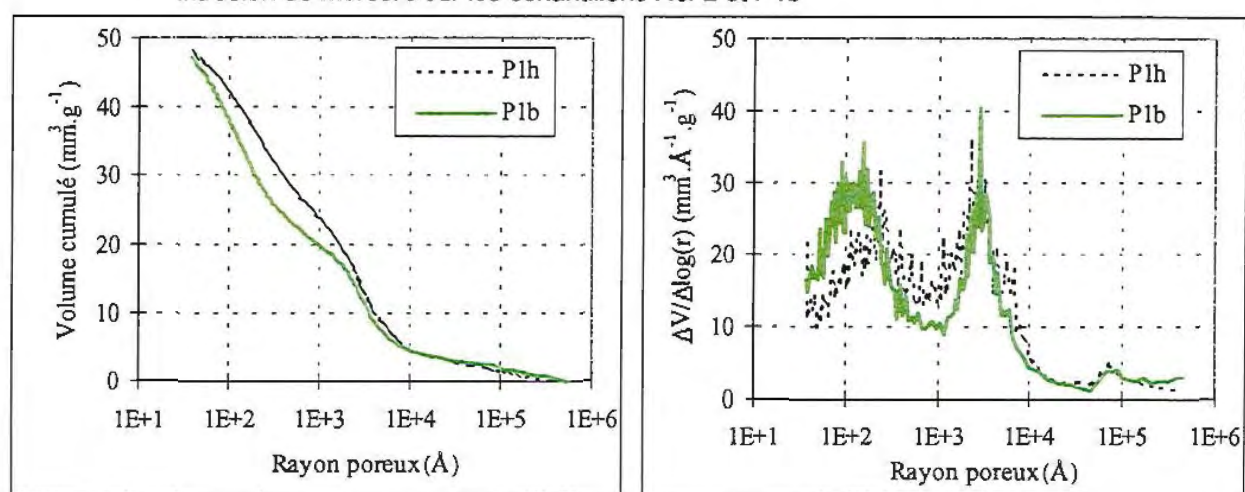


Figure 8 : Courbes de volume cumulé et distributions des tailles de pores obtenues par intrusion de mercure sur les échantillons P1h et P1b (prisme P1, en haut et en bas)

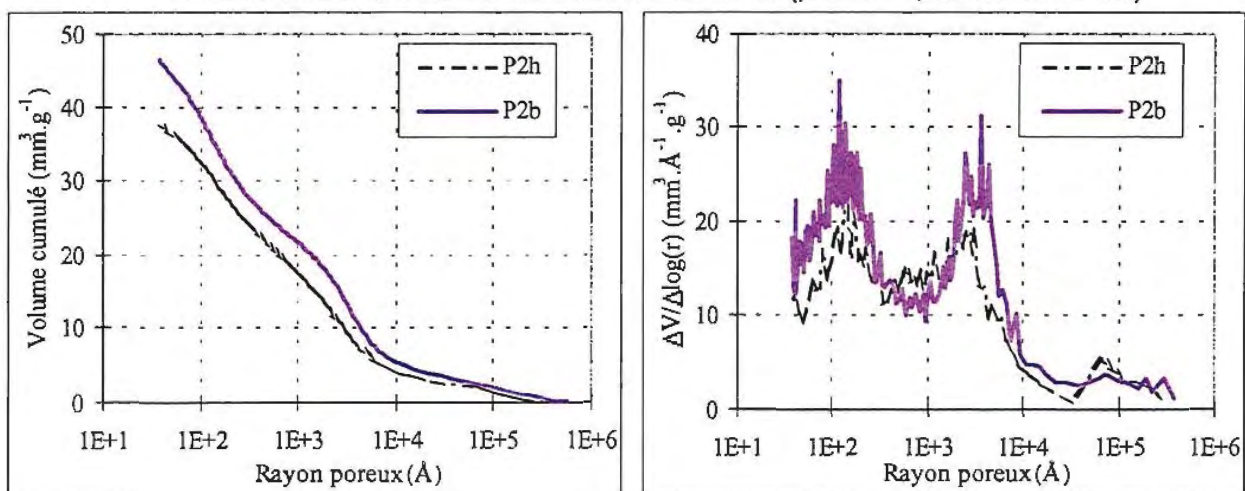


Figure 9 : Courbes de volume cumulé et distributions des tailles de pores obtenues par intrusion de mercure sur les échantillons P2h et P2b (prisme P2, en haut et en bas)

3.3.3. Suivi du préconditionnement des échantillons BOSN A, B, C et D destinés aux mesures de perméabilité aux gaz : pesées et essais de gammadensimétrie

En raison de la montée progressive en température de 35 à 80°C pendant 9 jours, le séchage est plus lent en mode AFREM' qu'en mode AFPC-AFREM durant cette période (cf. Figure 10 et Figure 11). Cependant, cette période de 9 jours contribue aussi au séchage des échantillons BOSN C et D et celui-ci est bien avancé au bout de 9 jours + 7 jours à $80 \pm 5^\circ\text{C}$.

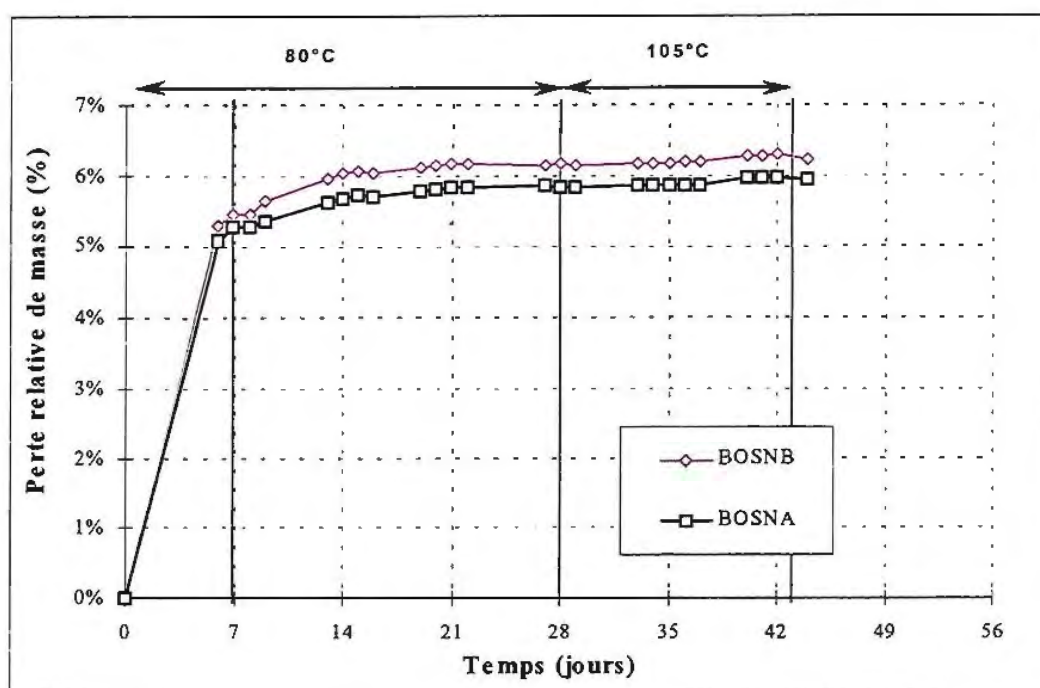


Figure 10 : Suivi de la masse au cours du préconditionnement en mode AFPC-AFREM (BOSN A et B)

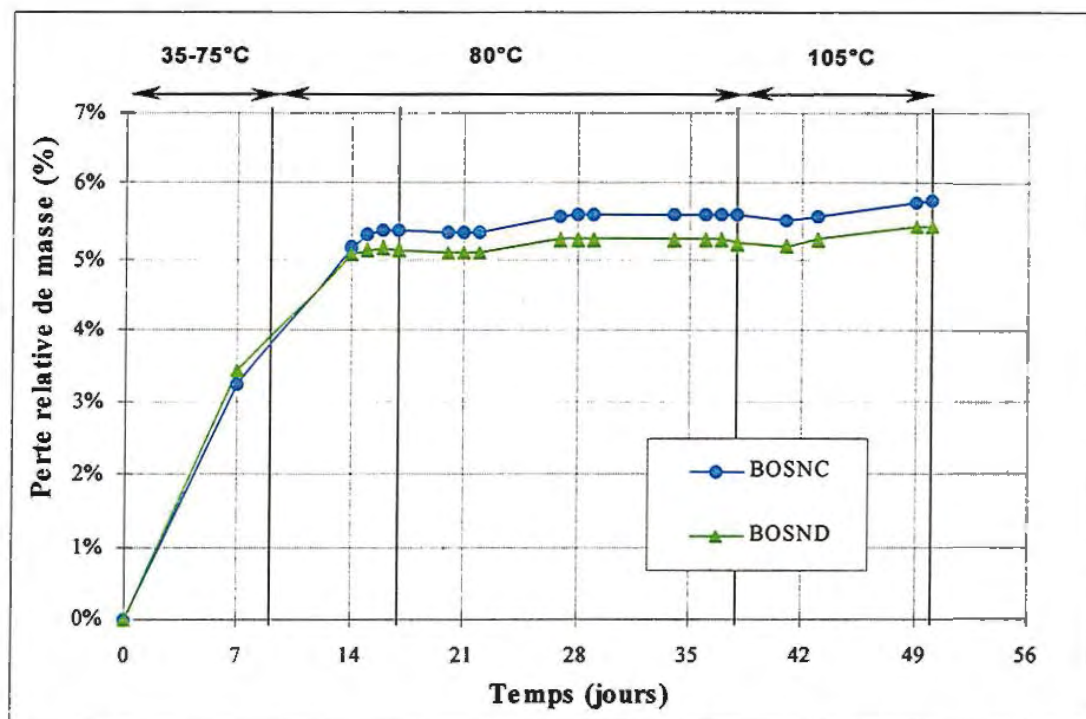


Figure 11 : Suivi de la masse au cours du préconditionnement en mode AFREM' (BOSN C et D)

Le béton étudié étant relativement poreux, son taux de saturation après 28 jours à $T = 80 \pm 5$ °C est très proche de celui obtenu après séchage à $T = 105 \pm 5$ °C et est donc très proche de l'état sec (cf. Figure 12 et Figure 13).

Le taux de saturation est très différent selon la hauteur, après 7 jours de séchage, pour l'échantillon BOSN B (préconditionnement en mode AFPC-AFREM, Figure 12) : le séchage n'est pas homogène dans l'échantillon.

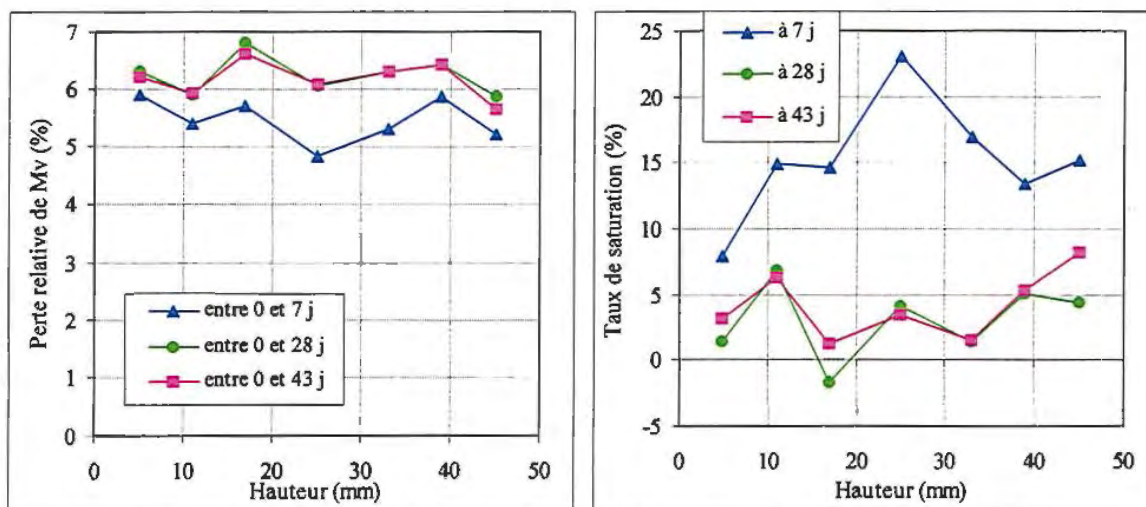


Figure 12 : Perte relative de masse volumique déterminée par gammadensimétrie selon la hauteur de l'échantillon BOSN B, au cours du préconditionnement en mode AFPC-AFREM

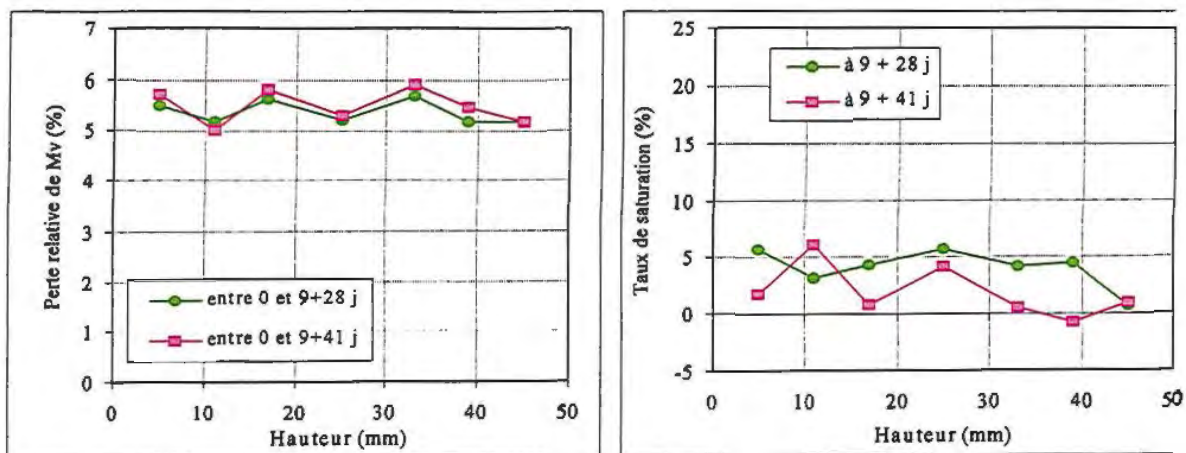


Figure 13 : Perte relative de masse volumique déterminée par gammadensimétrie selon la hauteur de l'échantillon BOSN D, au cours du préconditionnement en mode AFREM'

3.3.4. Perméabilité aux gaz

Les Figures 14 à 17 présentent les résultats de perméabilité aux gaz obtenus pour chaque échantillon et chaque échéance, ainsi que la valeur de perméabilité intrinsèque déterminée graphiquement.

On constate tout d'abord que le béton BOSN est très perméable. Il s'avère de ce fait difficile, voire impossible, de faire des mesures à forte pression (5 bars) ou lorsque le béton est « sec », car les limites de l'appareil CEMBUREAU sont atteintes. La précision des mesures réalisées sur BOSN D s'en ressent car c'est l'échantillon le plus perméable (cf. Figure 17).

On vérifie bien expérimentalement que (pour tous les échantillons testés et pour toutes les pressions de mesure) plus l'échantillon est sec, plus la perméabilité mesurée est grande.

Dans le Tableau sont regroupées les valeurs de perméabilité intrinsèque et les valeurs de perméabilité mesurée à une pression de 2 bars (recommandée dans le mode opératoire AFPC-AFREM [6]).

On observe que la perméabilité mesurée augmente quand l'éprouvette est prélevée plus haut dans le cylindre Ø150x300 mm. Ceci peut être attribué à un phénomène de ségrégation qui semble toutefois peu marqué pour l'éprouvette cylindrique, mais auquel la mesure de perméabilité aux gaz pourrait être particulièrement sensible.

Tableau 4 : Perméabilité aux gaz des échantillons BOSN A, B, C et D séchés à $T = 105 \pm 5^\circ\text{C}$

Echantillon	BOSN A	BOSN B	BOSN C	BOSN D
Perméabilité (m^2) à $P_{adm} = 2 \text{ bars}$	1870.10^{-18}	2050.10^{-18}	3000.10^{-18}	3370.10^{-18}
Perméabilité (m^2) "intrinsèque"	940.10^{-18}	1180.10^{-18}	1530.10^{-18}	1960.10^{-18}

Dans le Tableau 5 sont reportées les valeurs moyennes sur la hauteur de l'échantillon BOSN B du taux de saturation. Entre 7 et 28 jours de préconditionnement, le taux de saturation moyen diminue et la perméabilité augmente, ce qui est cohérent. Par contre, on peut se demander si le calcul de la moyenne est pertinent vu le profil de la Figure 12.

Tableau 5 : Perméabilité intrinsèque et taux de saturation moyen de l'échantillon BOSN B

BOSN B	après saturation sous vide	après 7 jours de séchage	après 28 jours de séchage	après 43 jours de séchage
Taux de saturation moyen (%)	100	15,15	3,08	0
Perméabilité "intrinsèque" (m^2)	-	910.10^{-18}	950.10^{-18}	1180.10^{-18}

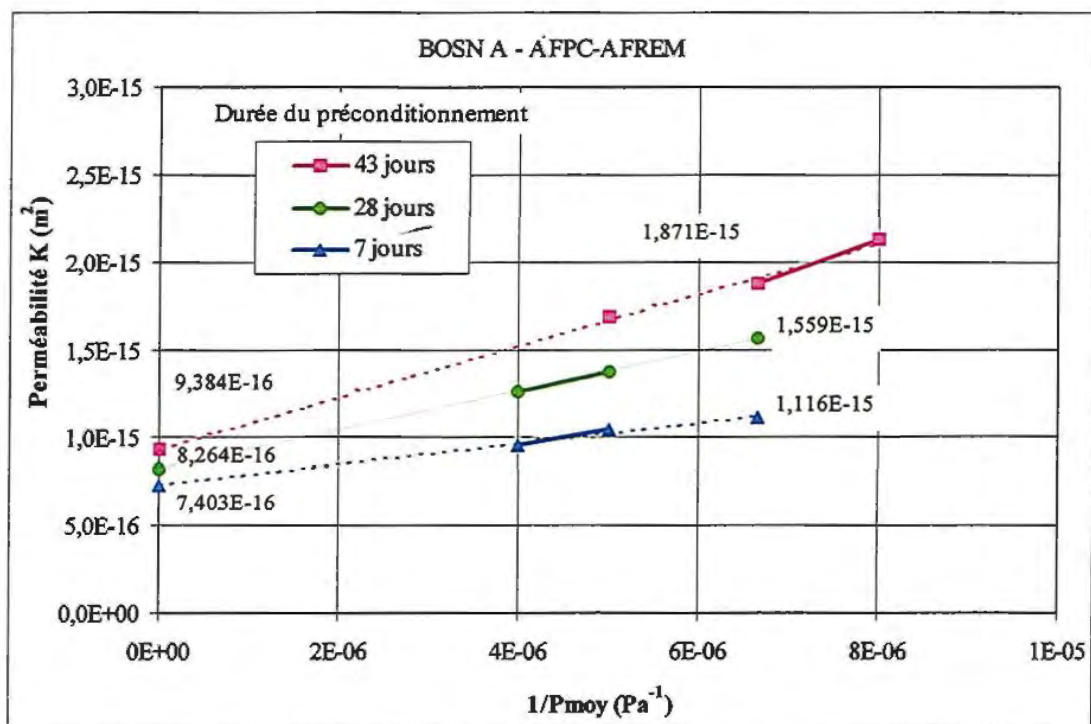


Figure 14 : Perméabilité aux gaz de l'échantillon BOSN A (préconditionnement en mode AFPC-AFREM)

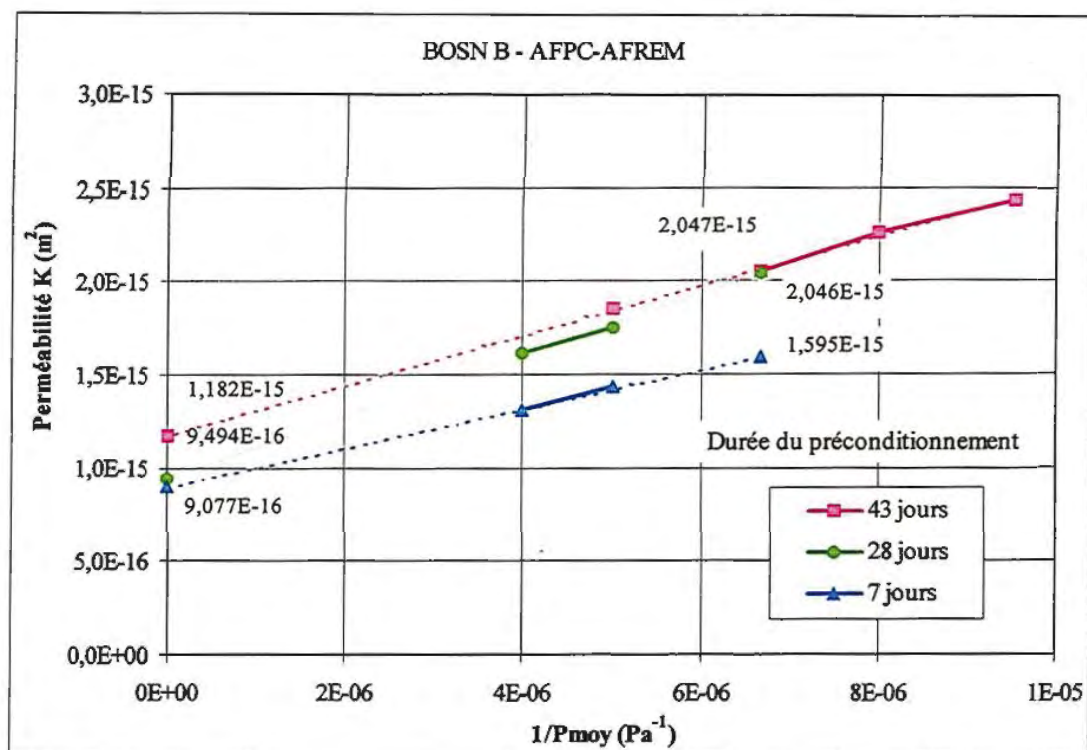


Figure 15 : Perméabilité aux gaz de l'échantillon BOSN B (préconditionnement en mode AFPC-AFREM)

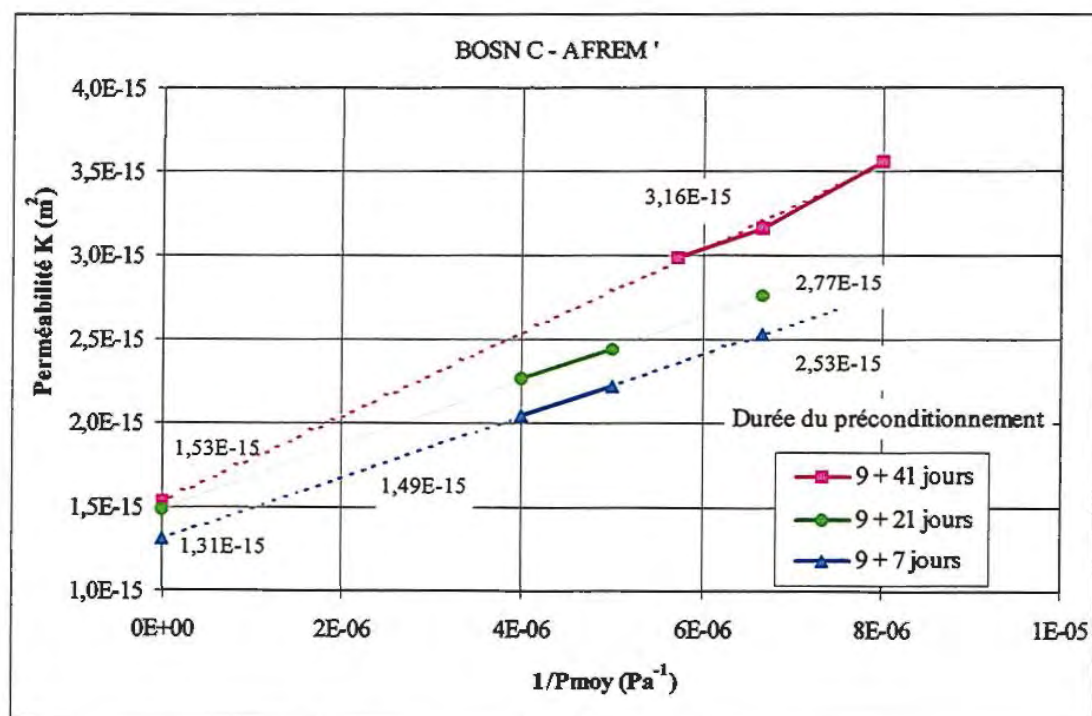


Figure 16 : Perméabilité aux gaz de l'échantillon BOSN C (préconditionnement en mode AFREM')

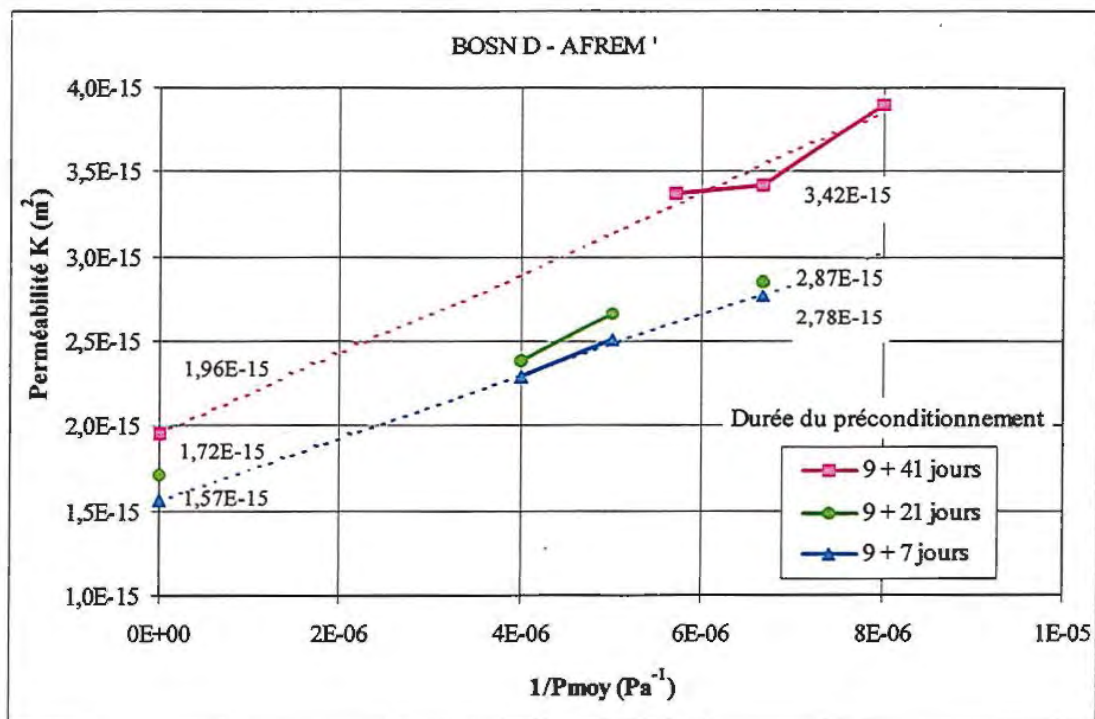


Figure 17 : Perméabilité aux gaz de l'échantillon BOSN D (préconditionnement en mode AFREM')

4. Description de l'expérience de séchage réalisée sur les dalles en béton

L'expérience de séchage s'est déroulée dans une salle dotée d'une ambiance contrôlée ($T = 20 \pm 1^\circ C$ et $HR = 50 \pm 5 \%$) à l'IUT de Saint-Nazaire. Le coulage des deux dalles de 1000×1000 mm de côté et de 160 mm d'épaisseur décrites ici s'est effectué directement dans cette salle. Les conditions aux limites adoptées sont les suivantes : la dalle est protégée contre la dessiccation sur cinq faces. Cette protection est assurée par le coffrage lui-même fabriqué en partie en PVC, en partie en bois baké. Aucune protection thermique n'a été installée. Le séchage s'effectue par la face supérieure des dalles.

4.1. Dalles

Le coffrage est présenté sur la Photo 2 et la dalle est présentée sur la Photo 3. Notons au passage la présence dans le coffrage de réservations. Ces réservations sont nécessaires à l'instrumentation qui sera décrite plus loin dans ce rapport. Les paramètres mesurés sur cette dalle sont la température d'hydratation, l'humidité relative interne, la conductivité thermique, la chaleur volumique et la diffusivité massique (hydrique).

Une deuxième dalle, de mêmes dimensions que la précédente, a également été coulée (Photo 4). Les compartiments conçus pour cette dalle servent au démoulage rapide des éprouvettes sans sciage. Les éprouvettes issues de cette dalle sont destinées à l'analyse

thermogravimétrie (ATG) et à la porosimétrie au mercure, ainsi qu'à la mesure de la teneur en eau par gammadensimétrie.



Photo 2 : Coffrage de la dalle avant coulage

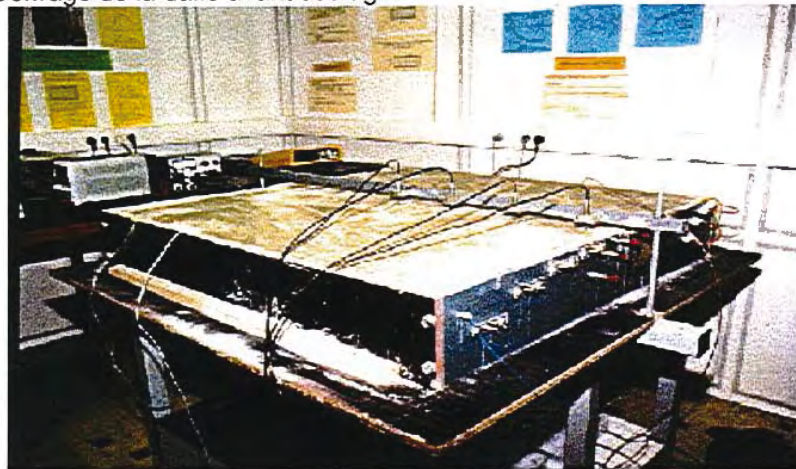


Photo 3 : Dalle pleine avec instrumentation

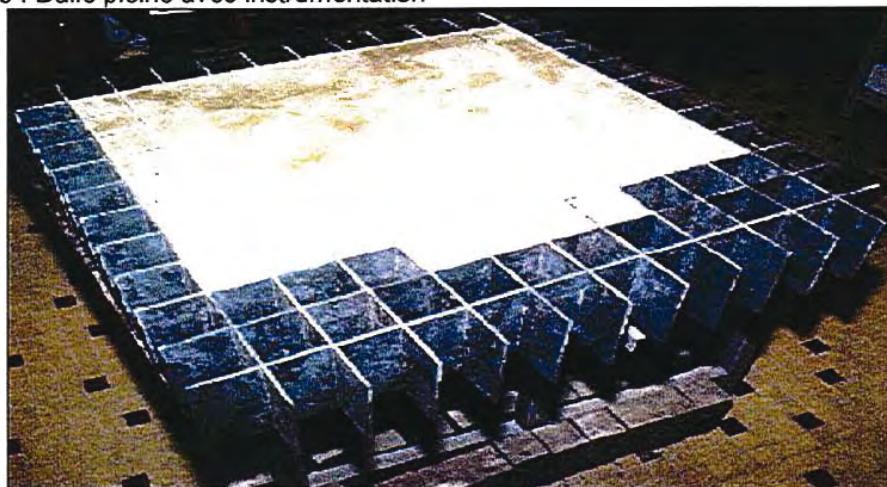


Photo 4 : Dalle compartimentée après coulage

4.2. Epreuves

Outre les dalles, des épreuves complémentaires ont été coulées :

- 1 épreuve ϕ 110 x 220 mm pour la mesure de la perméabilité et de la diffusivité à la vapeur d'eau par la méthode de la coupelle,
- 2 épreuves 40 x 40 x 160 mm destinées à la mesure du retrait endogène et total,
- 4 épreuves 100 x 100 x 100 mm pour l'étalonnage des sondes capacitives.

Par ailleurs, une gâchée supplémentaire a été réalisée pour confectionner 3 épreuves (70 x 70 x 280 mm) pour la mesure du retrait dans trois configurations (cf. § 8.1.1.).

5. Evolution des variables indépendantes en fonction de l'avancement du séchage et de l'hydratation

5.1. Evolution de la température

L'instrumentation de la dalle a été effectuée à l'aide de 6 thermocouples de type K placés comme suit : un thermocouple placé à 50 mm au dessus de la face séchant de la dalle, les autres étant situés en surface, puis à 10 mm, 20 mm, 40 mm et 80 mm en dessous de cette même surface séchant.

La mise en place des thermocouples est effectuée par un collage sur une plaque verticale de PVC, un piétement de cette même plaque étant vissé sur le fond du coffrage de la dalle. L'acquisition des résultats est effectuée par le biais d'une centrale à 120 voies AOIP et d'un micro-ordinateur. L'acquisition des résultats a démarré dès le coulage du béton.

5.1.1. Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont représentés sur la Figure 18. Un zoom entre 0 et 1,5 jours est représenté sur la Figure 19.

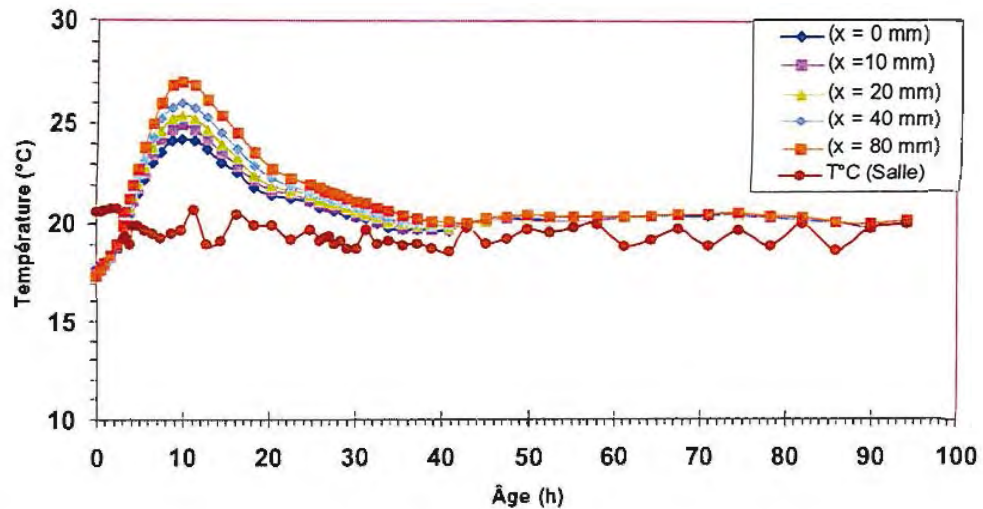


Figure 18 : Evolution de la température à différentes profondeurs de la dalle

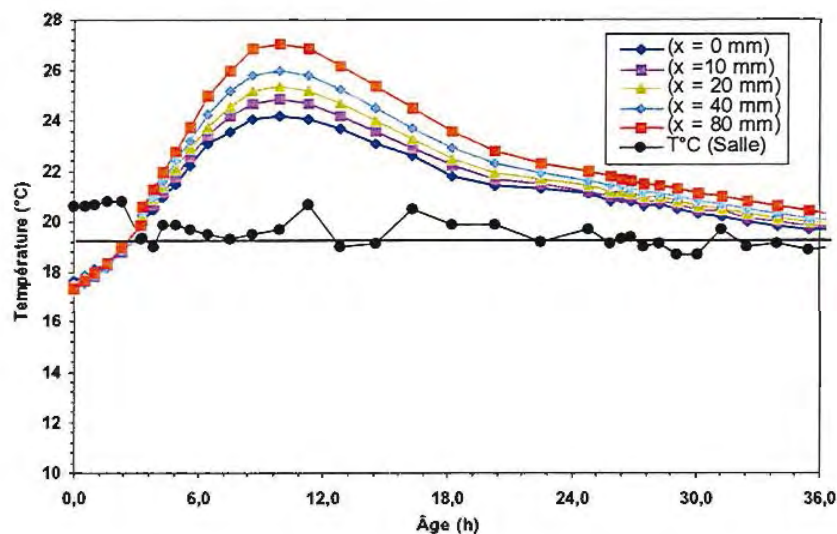


Figure 19 : Zoom au très jeune âge sur l'évolution des températures

Les remarques qu'on peut faire à ce sujet sont :

- la température de la dalle reste stable (20°C) au bout de 40 heures,
- la température dans la dalle à différentes cotes de la face exposée au séchage augmente rapidement juste après coulage et atteint, 10 heures après celui-ci, 27 °C au cœur,
- un gradient de température est nettement mis en évidence en fonction de la profondeur. Ce gradient n'est pas très prononcé à cause de la faible épaisseur de la dalle (la chaleur se dissipe rapidement). Toutefois, les courbes étant parfaitement échelonnées en fonction de la profondeur, ceci met en évidence la bonne précision des mesures.
- 90 heures après le coulage la température de la dalle reste légèrement supérieure à celle enregistrée au dessus de la dalle aux différentes cotes. Cette différence pourrait s'expliquer par la poursuite de la réaction d'hydratation.

5.2. Détermination des gradients de teneur en eau par sondes thermohygrométriques

5.2.1. Principe des mesures

Les mesures d'humidité relative sont effectuées sur la dalle placée dans une ambiance stable (à $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ et $HR = 50 \pm 5\%$) et dont la face supérieure est soumise au séchage. Des sondes thermohygrométriques, de diamètre 5 mm, sont enfoncées dans des réservations pratiquées au moment du coulage à 10, 20, 40 et 80 mm de la face séchante (Photo 5). Ces sondes fournissent la température et l'humidité relative interne qui sont imposées par le béton dans les cavités durant tout l'essai. Les sondes thermohygrométriques classiquement utilisées [9] [10] [11], sont constituées de manière générale d'un capteur de température (thermistance par exemple) et d'un capteur d'humidité relative de l'air. Le plus souvent ce capteur est de type capacitif (marques VAISALA, ROTRONIC, etc...) ou à tension de vapeur, imbibé de chlorure de lithium (marque NOVASINA). Les capteurs capacitifs présentent l'avantage de répondre très rapidement et surtout de ne pas être détériorés par des projections d'eau. Le capteur ROTRONIC utilisé dans cette étude semble celui possédant les dimensions les plus réduites du marché.

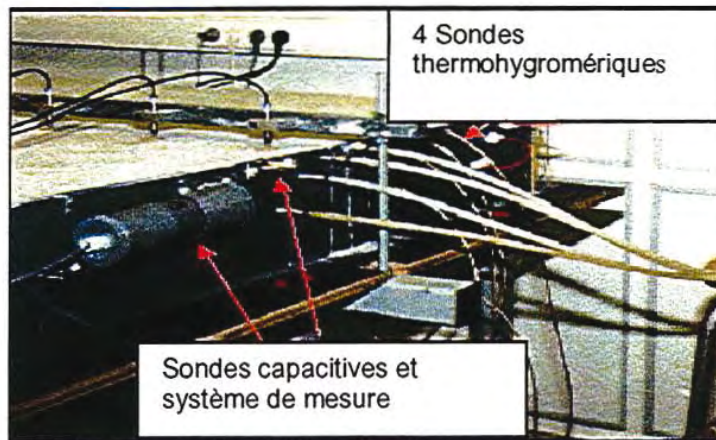


Photo 5 : Dispositif de mesure de l'humidité relative en place

5.2.2. Analyse des résultats obtenus

Les résultats obtenus sont présentés dans les Figures 20 et 21.

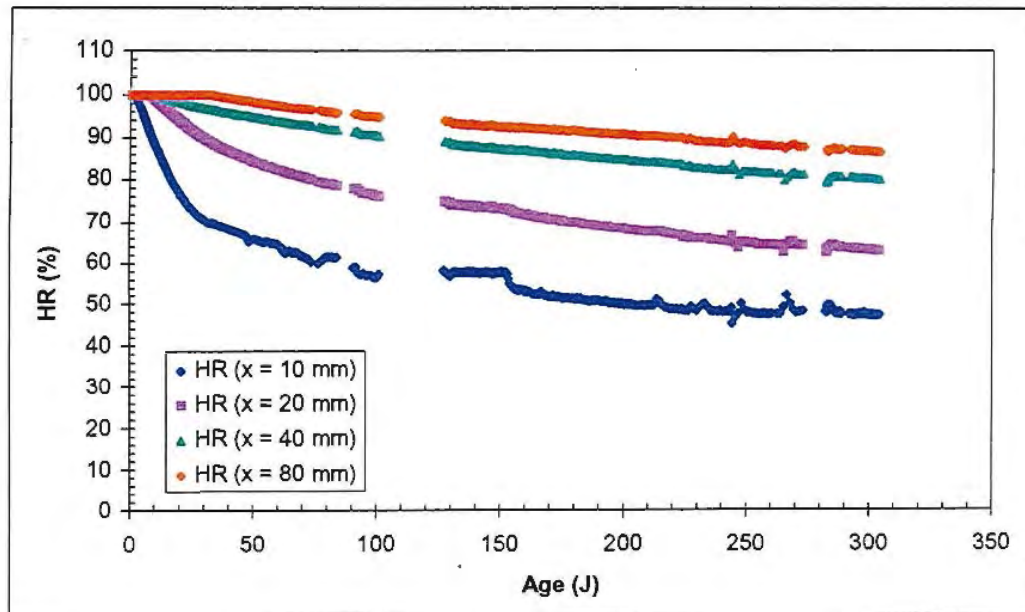


Figure 20 : Evolution de l'humidité relative (ϕ) à différentes profondeurs

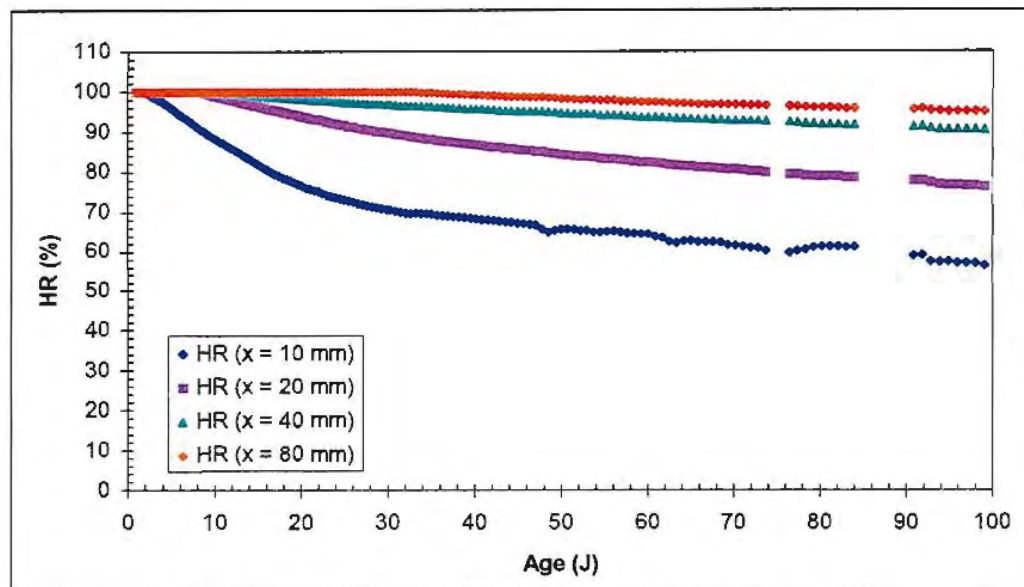


Figure 21 : Zoom sur les humidités relatives (ϕ) entre 0 et 100 jours

Les courbes présentées ici ont été obtenues après étalonnage des sondes. Les petites perturbations à la mise en place des sondes ont été éliminées en considérant que l'humidité relative initiale était de 100% et que l'indication d'une humidité supérieure à 100 % devait être ramenée à la valeur de 100% (Figure 20). Les remarques qu'on peut faire sont les suivantes :

- L'humidité relative près de la surface séchante chute rapidement, alors que dans les autres canaux elle reste très élevée. Au bout de 225 jours de séchage, l'humidité relative près de la surface atteint l'équilibre avec le milieu ambiant (c'est-à-dire 50%). Les enregistrements concernant cette cote de 10 mm peuvent apparaître perturbés : ils suivent les fluctuations du

milieu ambiant. Ceci est très visible sur la Figure 20 (il s'agit essentiellement de variations accidentelles de température dans la salle).

- Le gradient d'humidité relative est très prononcé. Au bout de 200 jours, l'humidité relative au cœur de la dalle est égale à 92%, à 40 mm de la face exposée au séchage, elle est égale à 85% et à 65% à 20 mm de la face exposée. Ce gradient d'humidité va induire un retrait différentiel entre la face exposée et le cœur. Ce retrait peut être à l'origine de la courbure de la dalle observée au cours du séchage. (cf. § 8.1.2. et 8.2.)

- La pente de la courbe donnant l'humidité relative à 10 mm de la surface séchante diminue assez rapidement au voisinage de 70 % (Figure 20). Ce changement de pente intervient 30 jours après le coulage de la dalle et peut s'expliquer, soit par le ralentissement de l'hydratation : la disparition d'eau à partir de cet instant ne se fait quasiment plus que par séchage, soit par la formation de la structure elle-même, avec une tortuosité croissante.

Pour évaluer les teneurs en eau et leur distribution dans la dalle, nous avons utilisé l'isotherme de désorption de vapeur d'eau obtenue à $T = 23 \pm 0,1^\circ\text{C}$ proposée par Baroghel-Bouny [9] pour un béton BO proche de la formulation étudiée ici (pour des humidités relatives inférieures à 100 %). Les résultats sont représentés sur la Figure 22.

Ces résultats sont approchés, compte tenu du fait que d'une part la courbe de désorption a été obtenue pour un béton de formulation un peu différente de celle du béton de la dalle, et que d'autre part, cette courbe de désorption est valable pour un matériau âgé et stabilisé du point de vue chimique (hydratation terminée). Il est certain que cette courbe n'est pas vraiment représentative du comportement de la dalle dans son ensemble. En effet, nous ne sommes pas en présence ici d'un matériau homogène du fait des gradients des propriétés (porosité, degré d'hydratation, etc...) de la dalle entre la surface séchante et le cœur.

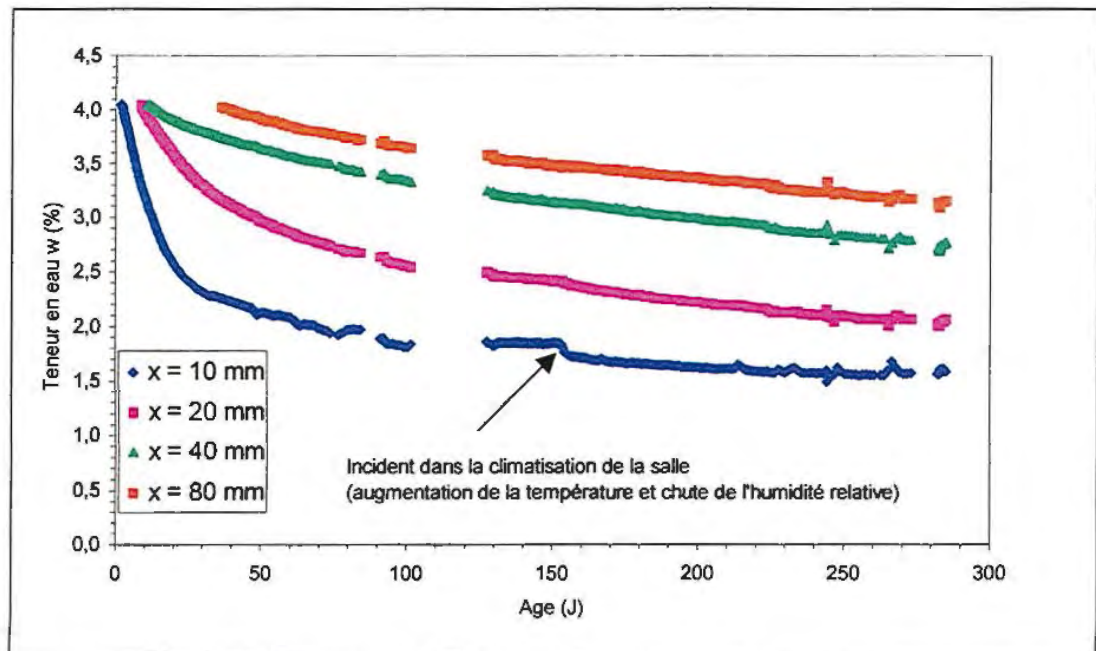


Figure 22 : Teneur en eau à différentes cotes au cours du séchage de la dalle

5.3. Détermination des gradients de teneur en eau par sondes capacitatives

5.3.1. Principe de la mesure

En implantant in situ des sondes métalliques de faible encombrement, il est possible de quantifier les variations de teneur en eau par mesure diélectrique. Cette mesure peut être réalisée environ douze heures après coulage du béton.

La mesure de la teneur en eau par sonde capacitive est fondée sur la mesure de la permittivité diélectrique apparente ϵ' d'un matériau humide. Le principe utilise une technologie voisine de celle du condensateur. Deux électrodes métalliques introduites dans le béton forment les armatures d'une capacité C dont le diélectrique est constitué par le matériau compris entre ces deux électrodes :

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon^0}{X} \quad (7)$$

Avec

ϵ^0 : permittivité du vide ($\epsilon^0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ F/mètre),

X : coefficient lié à la géométrie des électrodes.

Les électrodes mises en place dans le matériau sont reliées à un oscillateur dont la fréquence nominale est de 35 MHz. A cette fréquence, les pertes par conductivité et par polarisation sont faibles et les permittivités relatives des constituants du milieu ausculté ont les ordres de grandeur suivants :

ϵ' air = 1

ϵ' sol, béton = 2 à 7

ϵ' eau libre = 80

ϵ' glace = 4.

Une variation de la teneur en eau libre (et donc de la constante diélectrique) résultant d'un séchage exogène et/ou d'une consommation par les réactions chimiques d'hydratation se traduit par une variation de fréquence de l'oscillateur déterminée par la valeur prise par la capacité. La relation entre la fréquence F (en Hertz) et la permittivité diélectrique ϵ' du matériau est de la forme :

$$F = \frac{1}{\sqrt{\alpha \epsilon' + \beta}} \quad (8)$$

où α et β sont des coefficients liés à la géométrie des électrodes.

L'oscillateur est associé à un circuit diviseur de fréquence qui permet de ne pas transporter les hautes fréquences, les variations observées se situant alors autour de 5000 Hz.

5.3.2. Dispositif expérimental

La dalle de béton est équipée de sondes capacitives placées aux cotes 10, 20, 40, 80 mm à partir de la face soumise à évaporation.

Les sondes utilisées pour la mesure de la teneur en eau sont constituées de deux électrodes cylindriques en acier inoxydable de diamètre 5 mm, de longueur 60 mm et disposées avec un écartement entre axes de 20 mm (cf. Figure 23). Avec une telle géométrie on peut estimer que la mesure de teneur en eau est représentative d'une tranche de matériau entourant les électrodes d'une épaisseur de 50 mm.

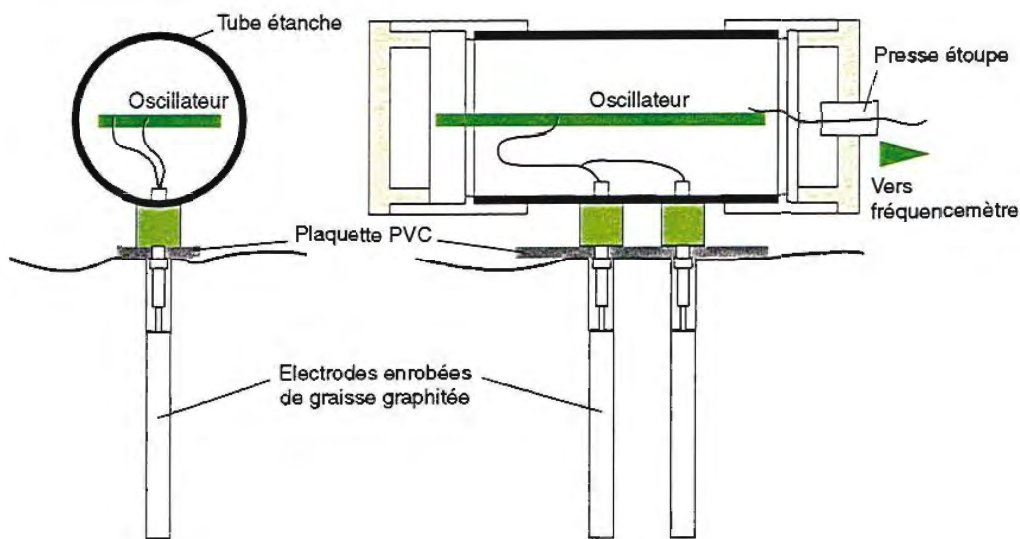


Figure 23 : Implantation d'une sonde capacitive dans le matériau

Des gabarits sont disposés dans le béton lors du coulage. Les sondes sont implantées dans ces réservations après prise du béton (environ douze heures après la coulée). Les électrodes sont enrobées d'une graisse conductrice afin de maintenir la continuité électrique entre celles-ci et le matériau. L'oscillateur est disposé sur les électrodes, le signal étant dirigé ici sur la centrale d'acquisition de mesures.

La mesure consiste à relever, à l'aide d'un fréquencemètre, la fréquence délivrée par l'oscillateur pour différentes périodes de séchage du béton. Cette fréquence est traduite soit en perte de masse d'eau libre, soit en variation de teneur en eau libre à l'aide d'un étalonnage réalisé en laboratoire.

5.3.3. Etalonnage

Un bloc de béton (100x100x100 mm) est réalisé et instrumenté avec une sonde capacitive de géométrie identique à celle utilisée pour les mesures. Lorsque l'évolution de l'hydratation est négligeable (à l'âge d'environ 100 jours), ce bloc est séché à l'étuve ($T = 45^{\circ}\text{C}$) pendant 24 h, puis placé dans une enceinte étanche pendant 72 h. La fréquence de l'oscillateur et la masse du bloc sont relevées. Ce processus est poursuivi jusqu'à séchage "complet" du bloc (perte

relative de masse d'eau libre égale à 0,05% entre deux pesées espacées de 24 h). Les différents points de mesure permettent de tracer une droite d'étalonnage par régression linéaire soit entre la fréquence et la perte relative de masse d'eau libre, soit entre la fréquence et la teneur en eau lorsque l'on connaît la masse sèche du bloc étalon (Figure 24). On obtient alors une loi de variation linéaire de la forme :

$$F = -A w + B \quad (9)$$

où

w : teneur en eau massique (%),

A : constante représentant la sensibilité de la mesure,

B : constante liée à l'oscillateur utilisé.

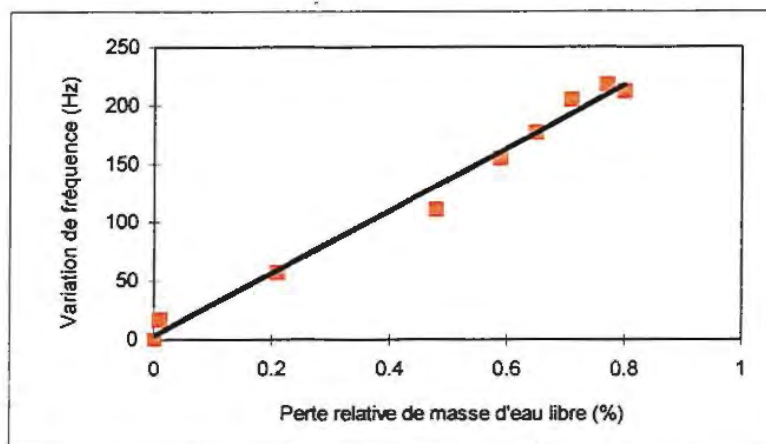


Figure 24 : Etalonnage d'une sonde capacitive

5.3.4. Résultats obtenus sur la dalle

Contrairement aux méthodes de mesure de la teneur en eau par pesée et par gammadensimétrie (§ 5.4.), la mesure à l'aide de sondes capacitatives englobe les pertes d'eau libre par séchage exogène et celles résultant de l'hydratation du ciment.

Pendant les 30 premiers jours, on observe une perte d'eau importante, celle-ci résultant à la fois du séchage de la dalle de béton et de l'hydratation du ciment (cf. Figure 25)

La cinétique de séchage et les valeurs de perte relative de masse d'eau libre sont identiques aux cotes 40 et 80 mm à partir de la surface libre (cf. Figures 25 à 27). Ces mêmes figures mettent nettement en évidence un gradient suivant la profondeur dans la dalle.

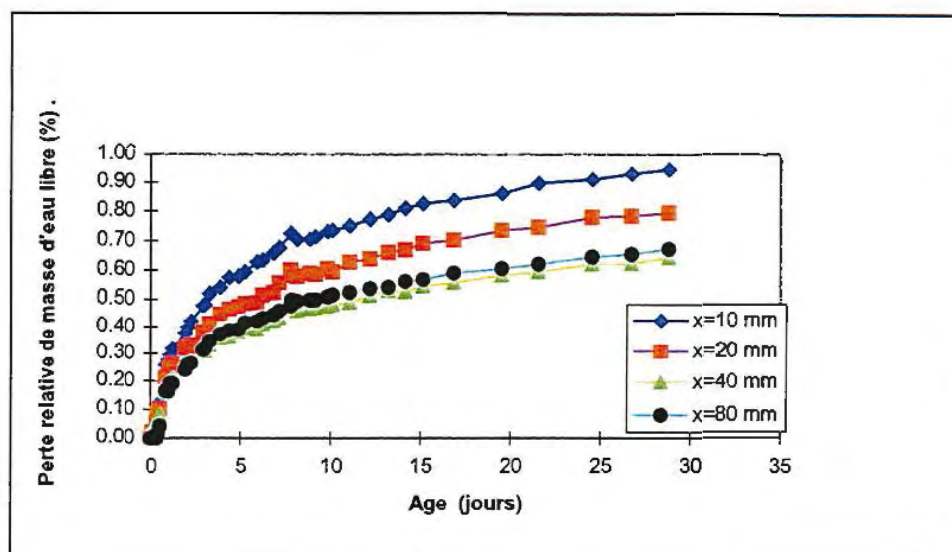
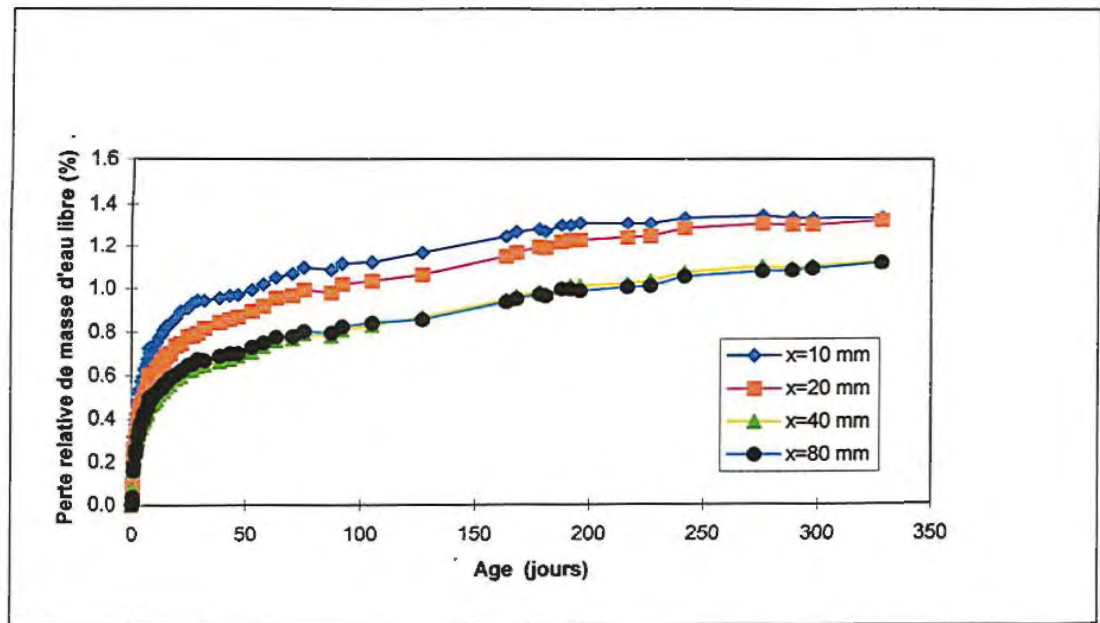
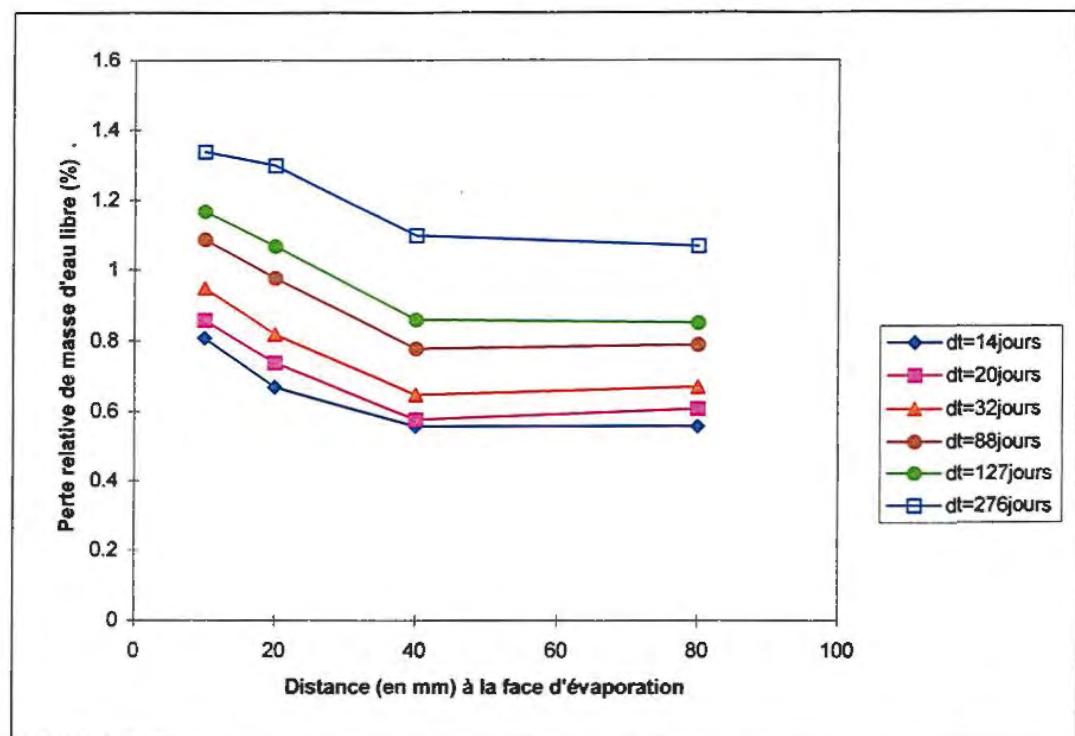


Figure 25 : Cinétique de séchage par une face du béton de la dalle suivant la profondeur de mesure pendant les 30 premiers jours



a)



b)

Figure 26 : Perte relative de masse d'eau libre du béton de la dalle mesurée par sondes capacitatives au cours du séchage par une face :

a) en fonction de l'âge

b) en fonction de la profondeur

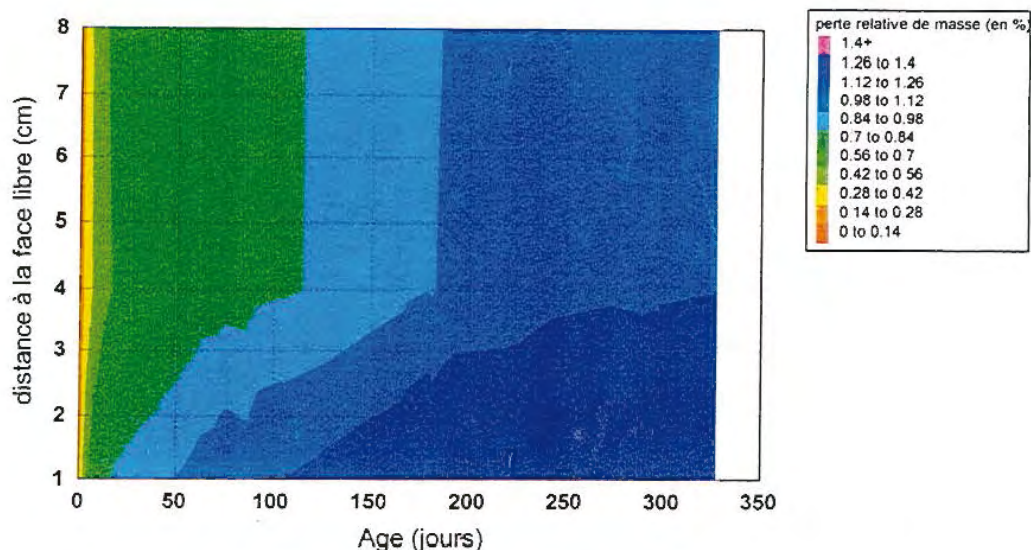


Figure 27 : Profil de séchage par une face du béton de la dalle (schématisation)

5.3.5. Etude de la phase d'hydratation sur éprouvettes

Un bloc de béton (E3) (100x100x100 mm) est équipé d'une sonde capacitive implantée en son centre. Ce bloc est étanché sur cinq faces, la sixième étant soumise à une humidité relative constante égale à $50 \pm 5\%$. On suit l'évolution du séchage par pesée (perte d'eau due au séchage seul) et par variation de la valeur de la constante diélectrique (perte d'eau due à l'hydratation et au séchage).

Pendant les cent premiers jours (contribution notable du processus d'hydratation), on note une différence significative entre les deux méthodes de mesure, la mesure par pesée ne mettant en évidence que la perte d'eau résultant du séchage exogène (cf. Figure 28).

Quand l'hydratation devient négligeable, les deux méthodes fournissent des résultats similaires représentatifs du séchage seul (cf. Figure 28).

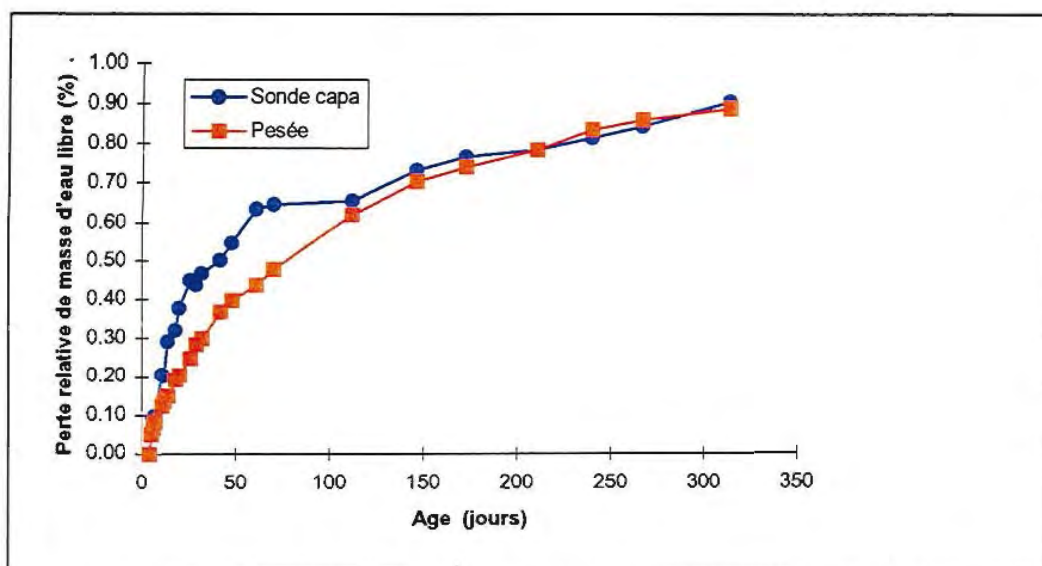


Figure 28 : Perte relative de masse d'eau libre au centre d'une éprouvette de béton BOSN soumise à un séchage à $HR = 50 \pm 5\%$ par une face. Comparaison des mesures par pesée (perte d'eau par séchage) et par sonde capacitive (diminution de la teneur en eau libre due à l'hydratation et au séchage)

Un second bloc de béton (E4) (100x100x100 mm) est équipé d'une sonde capacitive implantée en son centre. Ce bloc est étanché sur toutes ses faces. L'évolution de la teneur en eau est relevée par mesure de la variation de la constante diélectrique du béton. Une pesée systématique de ce bloc permet de contrôler le fait que la masse de ce bloc reste constante (aucun séchage apparent).

Bien que les pesées du bloc mettent en évidence une absence de séchage du béton, une diminution de teneur en eau libre est enregistrée par la méthode capacitive. Cette eau est celle utilisée par l'hydratation. La perte d'eau libre due à l'hydratation est importante pendant les 30 premiers jours et elle évolue faiblement pendant les 350 jours suivants (cf. Figure 29).

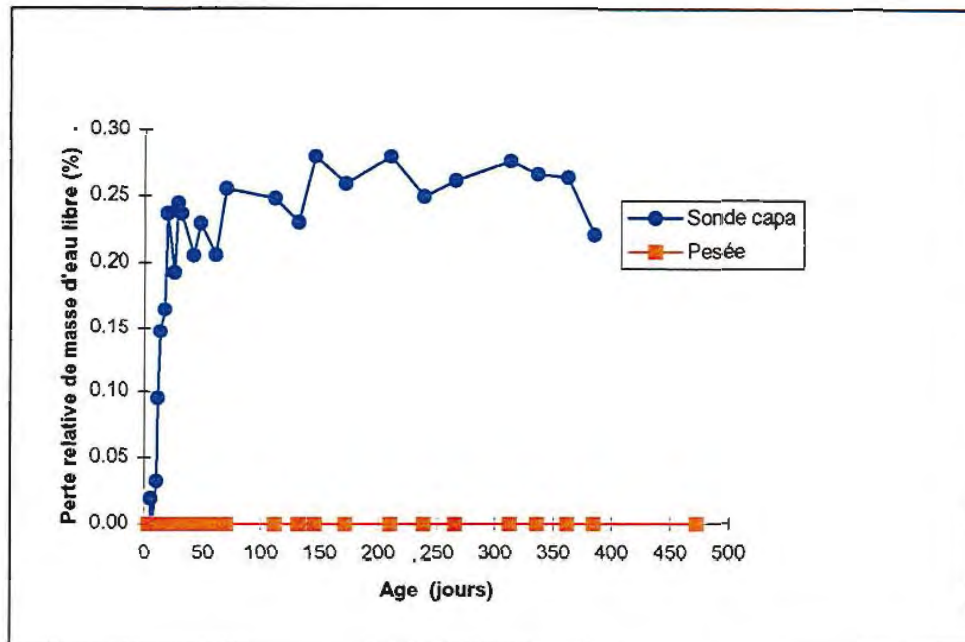


Figure 29 : Perte relative de masse d'eau libre d'un béton étanché sur toutes ses faces. Mesure de la diminution de teneur en eau par sonde capacitive

5.4. Détermination des gradients de teneur en eau par gammadensimétrie

5.4.1. Principe de la mesure

Les mesures de masse volumique réalisées par gammadensimétrie permettent de suivre l'évolution et la répartition de la teneur en eau. La méthode de mesure est fondée sur l'atténuation par la matière de photons gamma émis par une source radioactive de Césium 137, d'énergie 0,662 MeV, après traversée d'une épaisseur x de matériau.

Le nombre N_0 de photons incidents et le nombre N de photons recueillis après traversée du matériau sont liés par la loi de Lambert :

$$N = N_0 \exp(-Z \cdot \mu' \cdot \gamma \cdot x) \quad (10)$$

où μ' est le coefficient d'absorption massique du matériau, pour l'énergie du rayonnement considéré (m^2/kg), ρ la masse volumique (kg/m^3) et Z un coefficient de correction dû à la géométrie de l'appareil.

La connaissance de Z et de μ' et la mesure de l'épaisseur x de matériau permettent donc de calculer la masse volumique ρ du matériau :

$$\rho = \frac{-1}{Z \cdot \mu' \cdot x} \cdot \ln \frac{N}{N_0} \quad (11)$$

Si $\rho(t_0)$ est la masse volumique à l'instant initial t_0 et $\rho(t)$ celle à l'instant t , au même point de mesure, la variation de masse volumique est reliée à la variation de teneur en eau massique (w) par la relation :

$$w(t_0) - w(t) = [\rho(t_0) - \rho(t)] \frac{\text{Volume}}{\text{Masse sèche}} \quad (12)$$

où $w(t_0)$ est la teneur en eau massique au temps t_0 .

5.4.2. Dispositif expérimental

Les mesures par gammadensimétrie sont réalisées ici sur un banc gamma vertical (cf. Photo 6). Ce banc est composé de l'émetteur (source radioactive de Cs 137) et du récepteur (scintillateur), placés de part et d'autre de l'éprouvette à étudier (cf. Figure 30). Le scintillateur permet de convertir les photons gamma en impulsions électriques qui sont comptées pendant un temps donné, fournissant ainsi un taux de comptage (c/s). L'auscultation se fait point par point, à l'aide des dispositifs de déplacement de l'éprouvette.

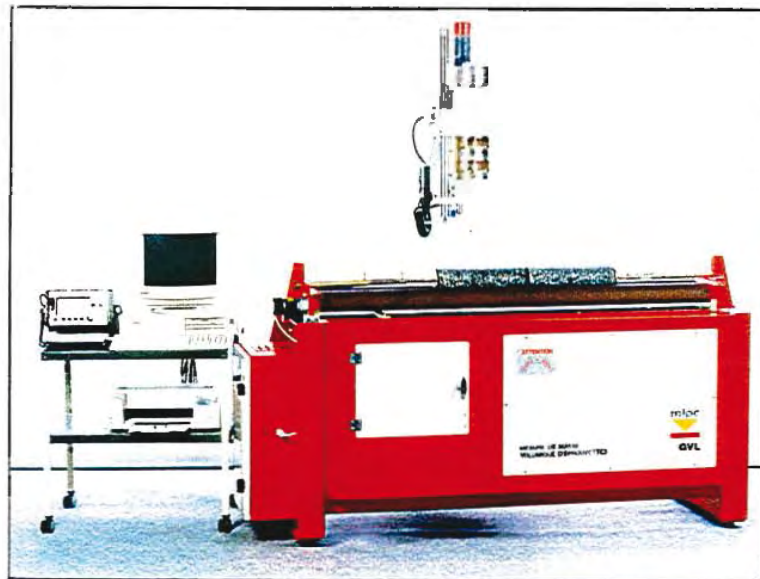


Photo 6 : Vue d'ensemble du banc d'essai gammamétrique vertical

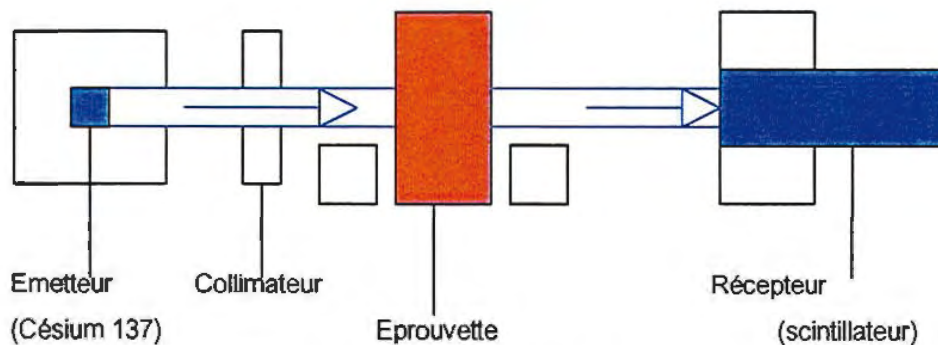


Figure 30 : Schéma de principe de la gammadensimétrie

5.4.3. Méthodologie et précision de la mesure

Pour une éprouvette parallélépipédique le volume de matériau intéressé par la mesure correspond à celui d'un cylindre ayant pour hauteur l'épaisseur de matériau traversé et comme base celle d'un cercle de 10 mm de diamètre (diamètre de la collimation du faisceau de photons). Les temps de comptage nécessaires à la détermination de N_0 et N sont choisis en fonction de la précision recherchée sur la masse volumique. Ils dépendent de l'activité de la source radioactive, de l'épaisseur du matériau traversé et sont donnés par des abaques. A la fin de l'essai, la masse volumique est calculée à partir des taux de comptage N_0 et N recueillis et des valeurs de x , Z et μ' .

Un second passage, effectué à un temps $t + \Delta t$ sur la même éprouvette avec le même protocole expérimental, permet de déceler une variation éventuelle de masse volumique qui, si elle existe, traduit, dans le cas qui nous intéresse, une variation de la teneur en eau. La variation de masse volumique au cours du temps est reliée à la variation de teneur en eau massique par la relation (12).

La précision de la mesure de masse volumique est donnée par :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta Z}{Z} + \frac{\Delta \mu'}{\mu'} + \frac{\Delta x}{x} + \sqrt{\left(\frac{2}{N_0 \cdot t_0} + \frac{2}{N \cdot t} \right)} \quad (13)$$

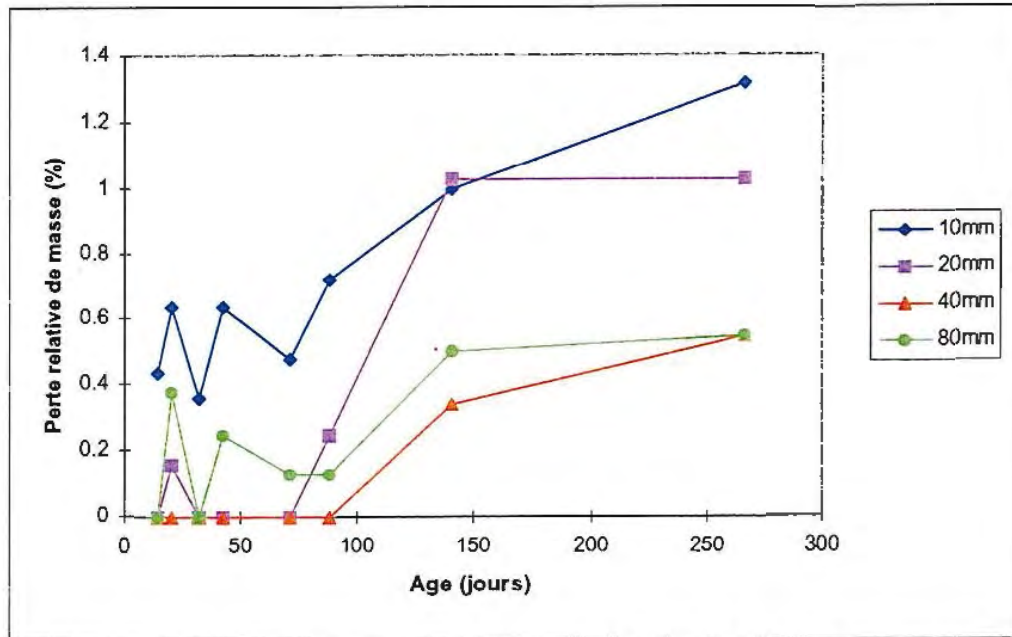
Les erreurs sur Z et μ' sont négligeables devant celle commise sur x , qui reste faible (de l'ordre de 0.001 pour une épaisseur voisine de 100 mm). La plus grande partie de l'erreur provient des temps de comptage choisis pour la détermination de N_0 et de N . A titre d'exemple pour un échantillon de béton de 100 mm d'épaisseur, les taux de comptage N_0 et N étant respectivement de 6500 et 1400 c/s (coups par seconde), des temps de comptage de 500 et 100 secondes donnent une précision sur la masse volumique de 0.30 %. Dans ces conditions, une variation de teneur en eau inférieure à 0.60 % ne peut pas être décelée.

5.4.4. Résultats

Une éprouvette de béton (160x80x80 mm) a été prélevée dans la dalle compartimentée 24 heures après le coulage. Cette éprouvette, étanchée sur cinq faces et mise dans une enceinte à humidité relative et à température contrôlées constantes (54%, 20°C), a été auscultée au banc gammamétrique. Les quinze points de mesure étaient répartis suivant une génératrice, le premier situé à 10mm de la face d'évaporation, les suivants espacés de 10 mm.

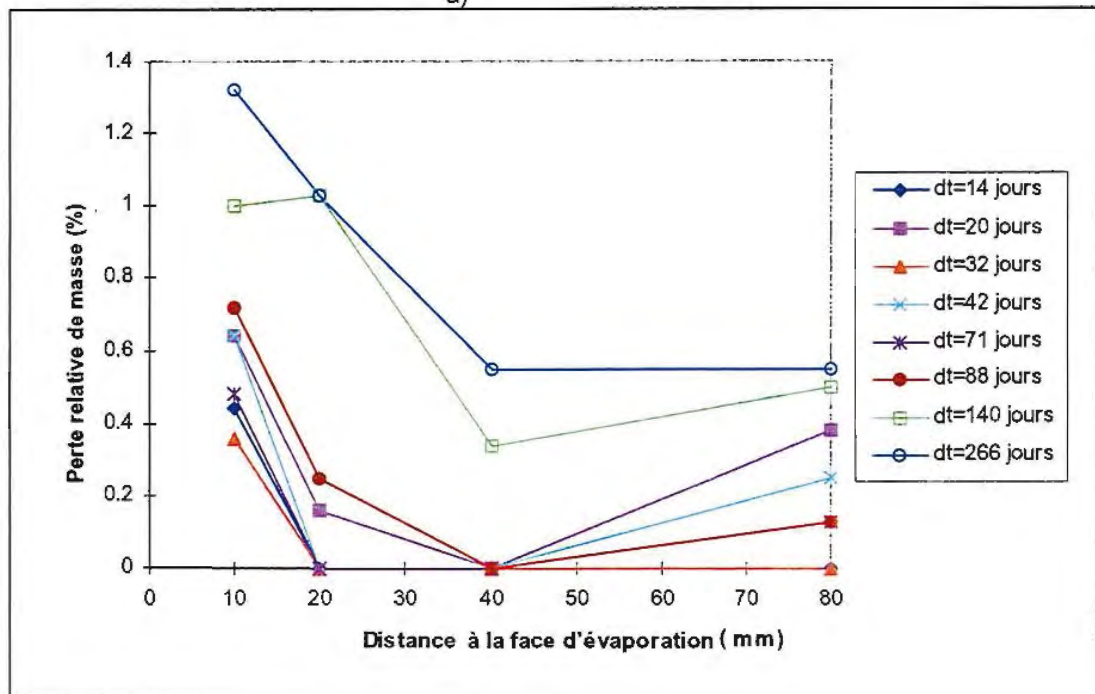
Les résultats mettent en évidence les variations de masse volumique de l'éprouvette au cours du temps. Ces variations sont représentatives des pertes d'eau dues au séchage uniquement car la mesure ne prend pas en compte les variations de teneur en eau libre résultant des réactions d'hydratation.

On observe un séchage progressif de l'éprouvette par la face soumise à évaporation, principalement sur les deux premiers centimètres pendant les 100 premiers jours. Ensuite, le séchage se poursuit plus profondément au cœur de l'éprouvette (cf. Figure 31).



(dt=0 correspond au premier passage de l'éprouvette au banc, soit 5 jours après coulage)

a)



b)

Figure 31 : Perte relative de masse mesurée par gammadensimétrie au cours du séchage de l'éprouvette par une face

a) en fonction de l'âge

b) en fonction de la profondeur

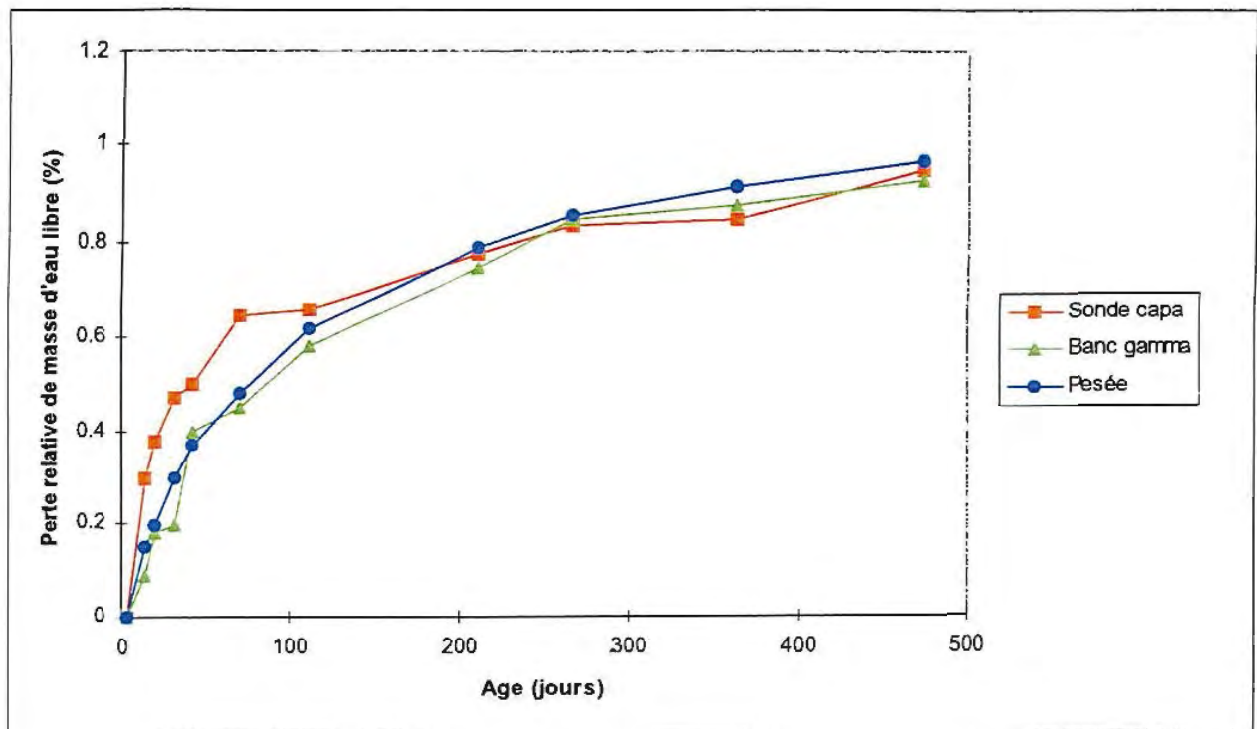
5.5. Comparaison des différentes méthodes de mesure des gradients de teneur en eau

Nous avons exposé trois méthodes de mesure des gradients de teneur en eau. La méthode qui consiste en la mesure de l'humidité relative, associée à la détermination de l'isotherme de désorption de vapeur d'eau présente l'inconvénient de ne pas donner la teneur en eau à saturation mais uniquement les teneurs inférieures à la teneur en eau critique (les courbes de désorption présentent souvent une asymptote verticale au voisinage de $\phi \approx 100\%$). La variation de teneur en eau inclut l'eau consommée par hydratation et évaporée par séchage si l'on considère la mesure d'HR par sonde hygrométrique. L'isotherme de désorption correspond toutefois aux variations de teneur en eau physiquement liée d'un matériau stabilisé d'un point de vue chimique (hydratation). Cette courbe n'est donc valide que dans le cas d'un séchage "exogène".

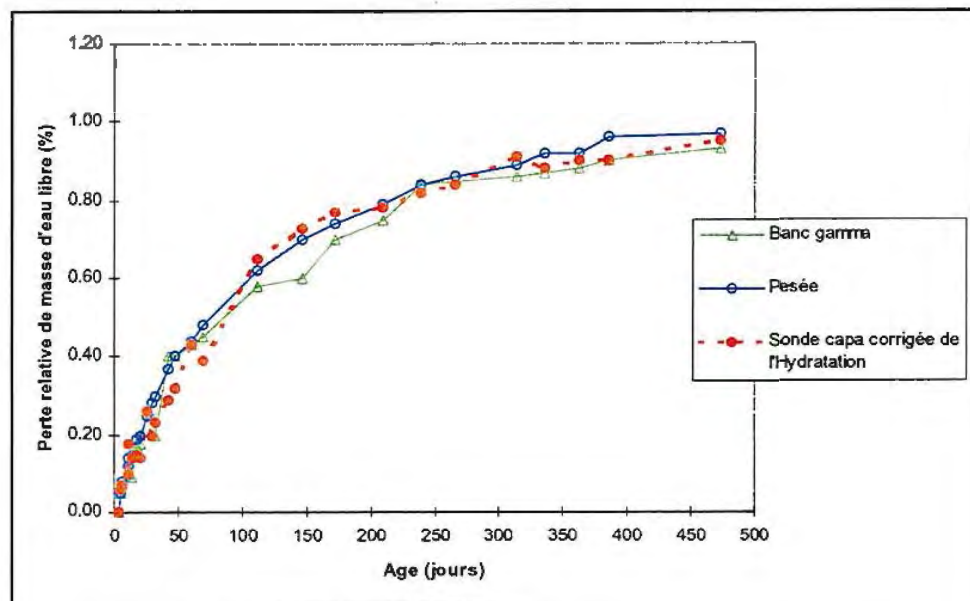
La méthode des sondes capacitives présente l'avantage de fournir des teneurs en eau dans toute la gamme (de l'état sec à la saturation). Elle présente aussi l'avantage d'être une méthode facile à mettre en œuvre *in situ*. Le matériel utilisé n'est en outre pas coûteux. Son inconvénient réside dans l'étalonnage. En effet, pour obtenir un étalonnage entre fréquence et teneur en eau, il faut attendre un séchage complet de l'échantillon, qui demande un temps excessivement long et qui peut devenir impossible à réaliser quand les dimensions de l'éprouvette sont trop importantes.

La méthode du banc gamma présente l'avantage d'être non destructive, mais elle nécessite par contre un matériel coûteux et ne peut être utilisée *in situ*. Cette méthode donne les variations de masse volumique dues uniquement au séchage exogène. Pour accéder aux teneurs en eau, il est nécessaire de disposer des masses volumiques à l'état "sec" et à l'état saturé de l'éprouvette testée.

Les variations relatives de teneur en eau dues à un séchage "exogène", obtenues avec les sondes capacitives d'une part et le banc gamma d'autre part, sont très proches. En comparant les variations de teneurs en eau données par gammadensimétrie ou pesée (séchage "exogène") avec les variations données par les sondes capacitives ou thermohygrométriques, il est possible d'évaluer la contribution de l'hydratation aux variations totales de teneur en eau et d'évaluer à partir de quel âge cette contribution devient négligeable (cf. Figure 32).



a)



b)

Figure 32 : Perte relative de masse d'eau libre au centre d'une éprouvette de béton BOSN soumise à un séchage à $HR = 50 \pm 5\%$ par une face

- a) Comparaison des mesures par pesée, sonde capacitive et gammadensimétrie,
- b) Comparaison des mesures par pesée, sonde capacitive et gammadensimétrie, après déduction pour la sonde capacitive, de la contribution de l'hydratation entre 4 et 112 jours (à partir des résultats figurant en Figure 29).

6. Mesure des propriétés thermophysiques

6.1. Présentation

La justification théorique de ces mesures est donnée en Annexe 2.

La détermination des caractéristiques thermophysiques d'un béton pose un certain nombre de difficultés :

- la pratique des prélèvements d'échantillons, outre son coût, soulève des problèmes de représentativité et présente de nombreux artefacts ;
- l'évolution de certaines propriétés nécessite la rapidité des mesures ;
- ces mêmes mesures doivent aussi perturber le moins possible le matériau et notamment éviter d'une part, des migrations d'humidité et d'autre part des dégagements de chaleur superposés à ceux résultant de l'hydratation ;
- l'hétérogénéité du matériau impose d'effectuer non pas une mesure locale mais une mesure intégrée dans l'espace, sur une longueur représentative souvent difficile à évaluer.

Ces contraintes nous ont conduits à faire le choix d'une méthode dynamique déjà utilisée par Bastian et Khelidj [10] [12] [13]. La méthode du fil chauffant [13] que l'on a retenue est celle proposée par Bastian [10] dans la variante où la température du fil est déduite de sa résistance électrique. La description complète du comportement thermophysique d'un matériau nécessite la connaissance de deux grandeurs parmi les trois ci-après :

- conductivité thermique : λ (W/m.K)

- chaleur volumique : $\rho_0 c$ (J/m³K)

avec ρ_0 : masse volumique du matériau à l'état sec
 c : capacité thermique massique de l'ensemble (matériau sec + eau)

- diffusivité thermique : $a = \frac{\lambda}{\rho_0 c}$ (m²/s)

L'analyse de l'évolution de la température d'un fil rectiligne pendant ou après chauffage de celui-ci permet d'accéder à la conductivité du matériau environnant. L'analyse de l'évolution de la température d'un second fil parallèle au premier et non chauffé permettra de déterminer la chaleur volumique du matériau environnant. Il faut remarquer que la méthode que l'on va exposer plus en détail suppose les propriétés thermophysiques identiques en tout point d'un milieu infini. Ces hypothèses ne sont en fait pas remplies ici puisque l'on cherche précisément à mettre en évidence un gradient. On peut néanmoins supposer ces propriétés constantes sur une petite zone ($r < 5$ mm par exemple) entourant un fil. Pour la même raison, fil chauffant et fil non chauffant devront être disposés à la même cote. Enfin, il y aura lieu de tenir compte éventuellement, en effectuant des calculs correctifs, des faits suivants :

- le milieu sera supposé semi-infini avec des fils proches de la surface d'où un 'effet miroir' éventuel ;
- des interactions peuvent exister si l'on dispose des paires de fils trop proches les unes des autres.

Des calculs ont été effectués sur la base des équations exposées en Annexe 2 en vue de préciser les domaines de validité des mesures.

6.2. Montage expérimental

Le montage expérimental de base est présenté sur la Photo 7 avant le coulage du béton. 4 couples de fils d'acier inoxydable de 0,5 mm de diamètre sont tendus parallèlement à des profondeurs de 10, 20, 40, 80 mm de la surface séchant de la dalle. Le système de tension des fils prend appui sur le bord du coffrage en PVC (Photo 8). L'écartement entre fils d'un couple est de 15 mm. L'alimentation électrique des fils chauffants est représentée en Figure 33. Les fils chauffants sont alimentés en tension secteur par l'intermédiaire d'un stabilisateur de tension et d'un autotransformateur. Un rhéostat est ajusté de manière à ce que sa résistance soit égale à celle des 4 fils chauffants alimentés en série. Un calcul classique montre qu'alors la puissance injectée dans les fils demeure sensiblement constante, même si la résistance de ceux-ci varie avec la température.

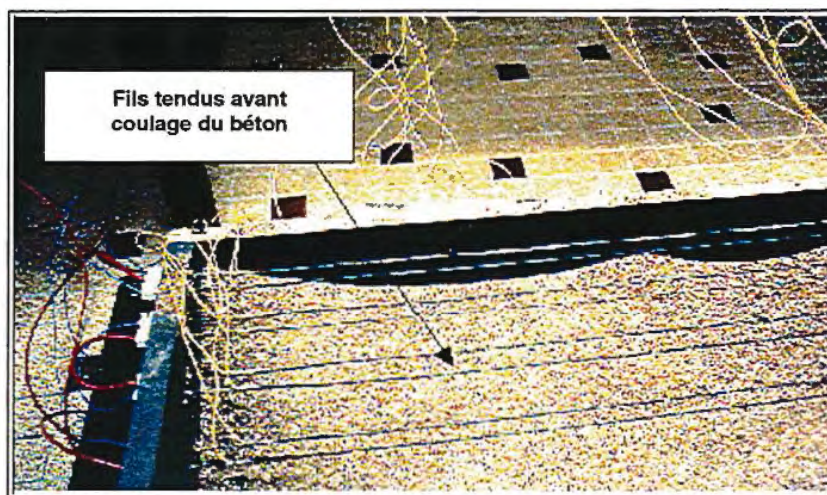


Photo 7 : Disposition des fils pour la mesure de la conductivité thermique et de la chaleur volumique



Photo 8 : Dalle après coulage avec les 4 couples de fils chauffants et non chauffants

La Figure 34 présente le schéma électrique de prise alternée des tensions aux bornes des fils chauffants (C) lorsque ceux-ci ne sont plus chauffés et aux bornes des fils non chauffants (NC) lors des phases de chauffage des fils chauffants.

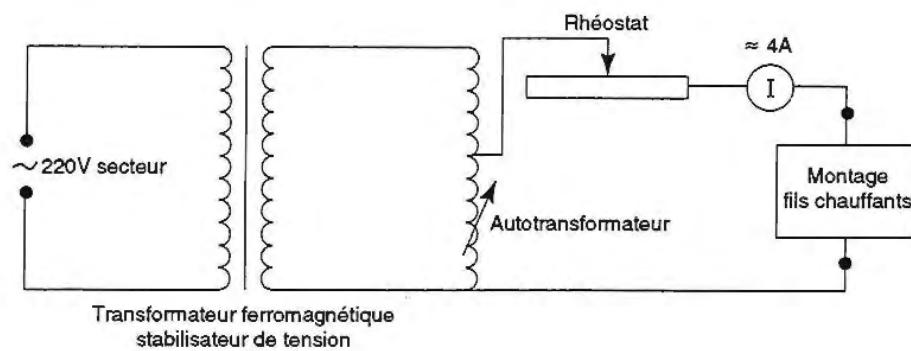


Figure 33 : Alimentation électrique des fils chauffants (C)

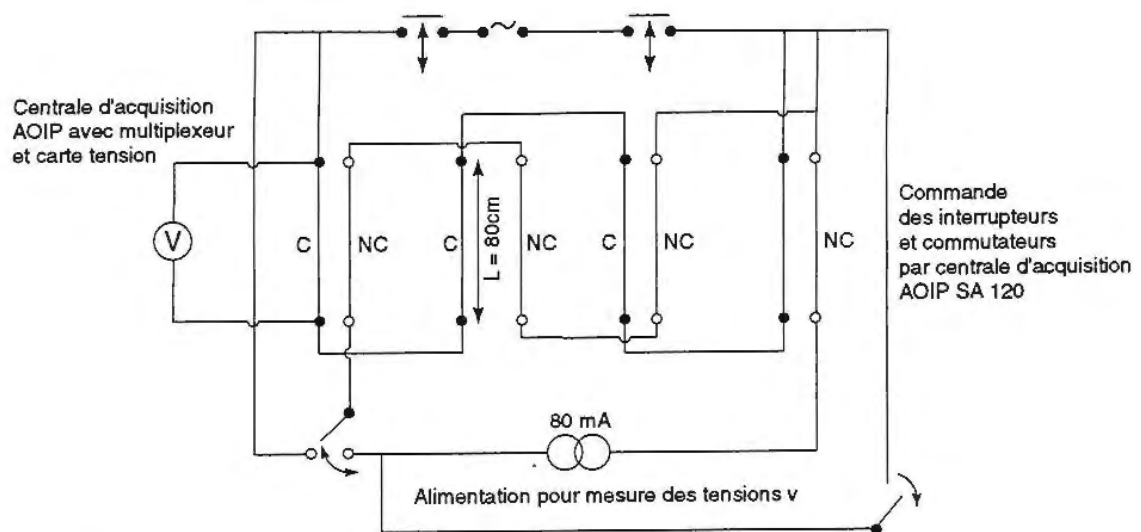


Figure 34 : Montage électrique des fils chauffants (C) et non-chauffants (NC)

6.3. Résultats expérimentaux

L'expérimentation s'est déroulée dans une salle à température et à humidité relative contrôlée ($T = 20 \pm 1$ °C et $HR = 50 \pm 5\%$). Les acquisitions des données sont effectuées aussitôt après le coulage de la dalle et à des échéances définies par une loi en t^2 . Un exemple d'enregistrement des tensions dans les fils non chauffants est montré sur la Figure 35. L'exploitation des résultats a été effectuée pour un nombre suffisamment significatif de mesures.

Les résultats obtenus sont représentés sur les Figures 36 et Figures 37.

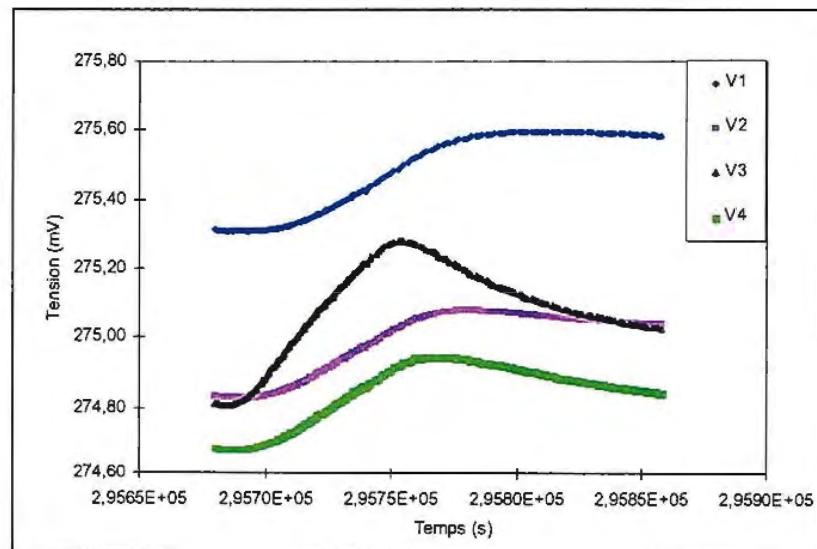


Figure 35 : Exemple d'enregistrement de tension aux bornes des fils non chauffants

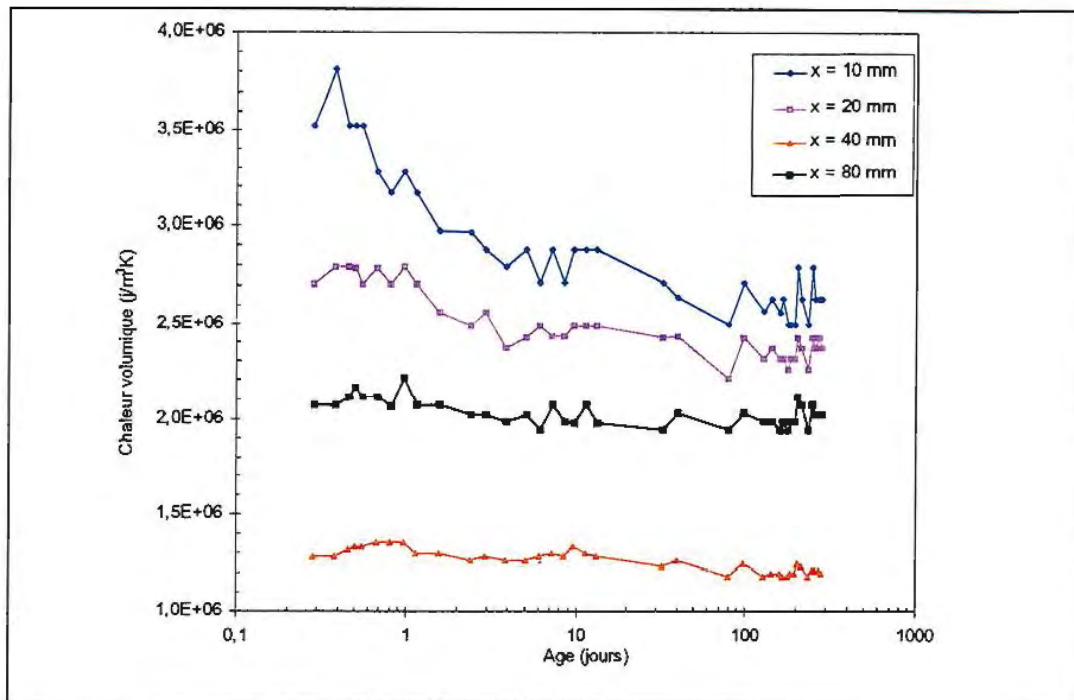


Figure 36 : Evolution des chaleurs volumiques à différentes profondeurs

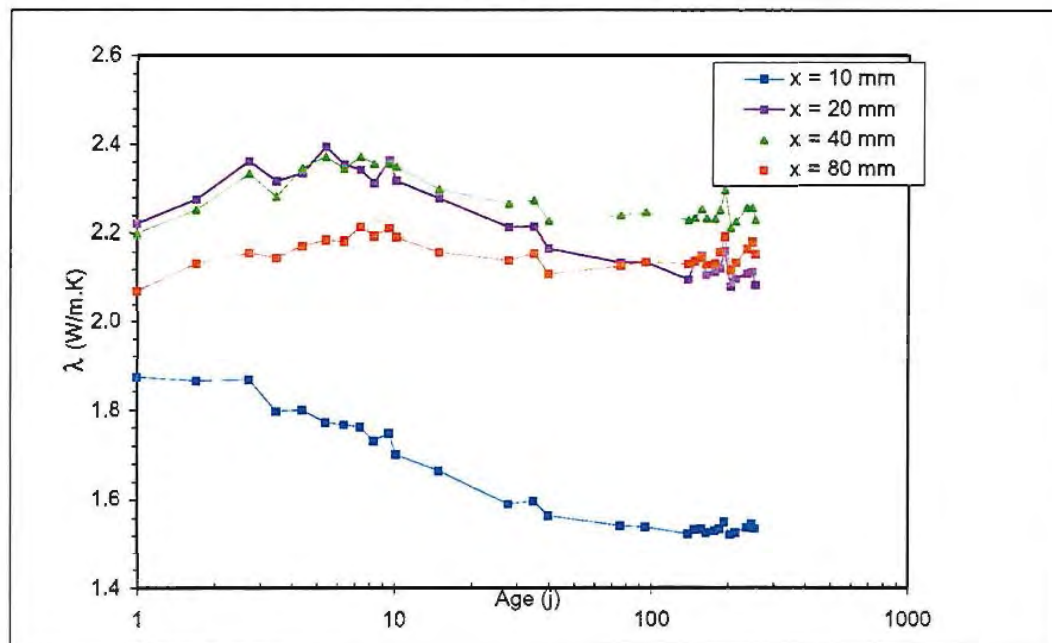


Figure 37 : Evolution des conductivités thermiques à différentes profondeurs

Si les variations temporelles relatives des chaleurs volumiques et conductivités thermiques semblent tout à fait convaincantes, les valeurs dans l'absolu notamment à 10, 20 et 40 mm sont très probablement entachées d'erreurs. Nous avons effectué un calage des résultats à ces trois profondeurs par rapport à ceux relatifs à 80 mm en considérant que les quatre conductivités et les quatre chaleurs volumiques étaient respectivement égales au début de l'essai, le matériau étant alors homogène. Les résultats obtenus sont regroupés en Figures 38 et 39.

Il faut noter que deux causes au moins peuvent expliquer ces incertitudes :

- différence de tension mécanique d'un fil à l'autre modifiant la résistance électrique,
- incertitude sur l'écartement exact entre deux fils d'une paire. L'écartement pourrait en effet être modifié lors du coulage (taille des gravillons très importante par rapport à l'écartement des fils). Un calcul d'erreur élémentaire montre la très grande sensibilité des résultats à cette dernière perturbation.

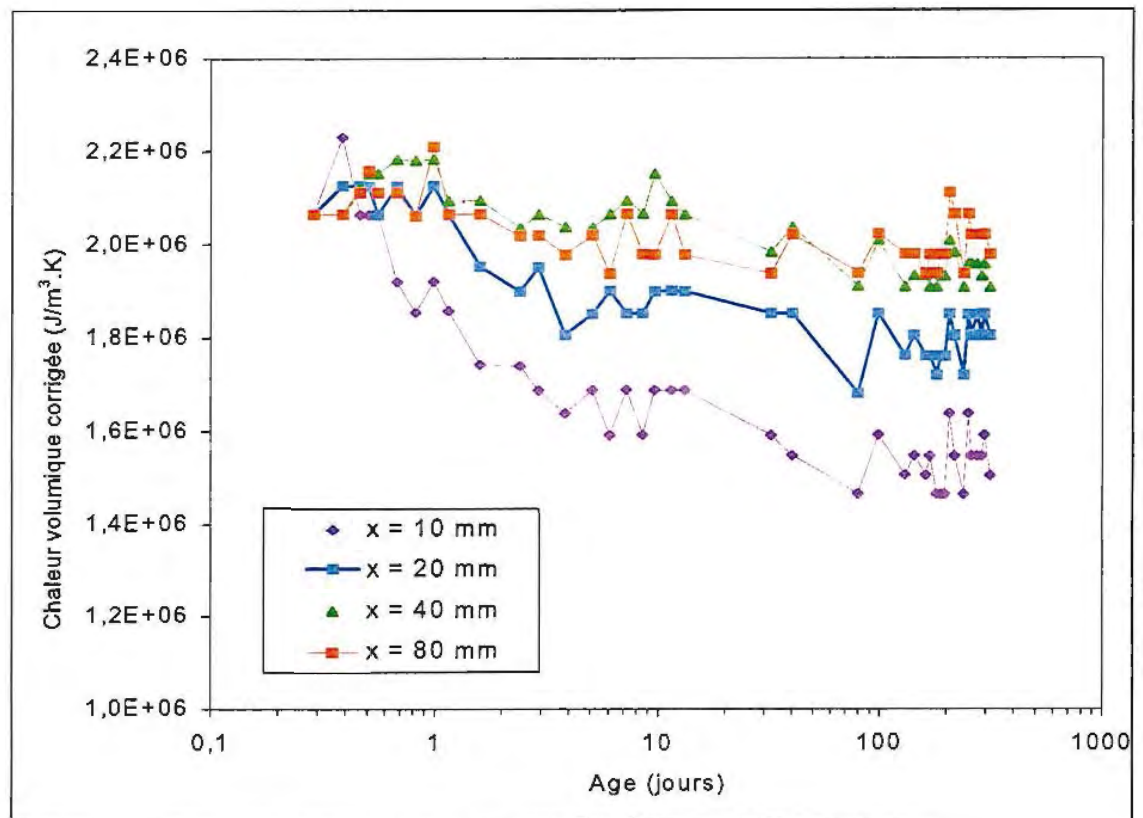


Figure 38 : Evolution des chaleurs volumiques corrigées

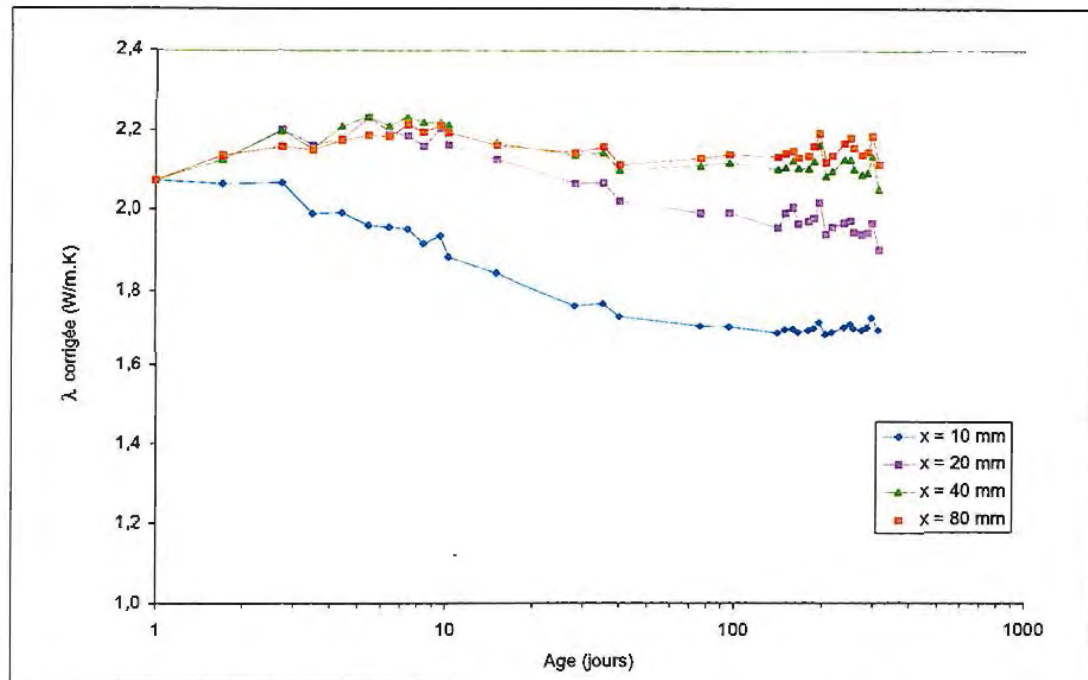


Figure 39 : Evolution des conductivités thermiques corrigées

6.4. Analyse et discussion

L'analyse des résultats expérimentaux nous conduit à faire différentes remarques :

Les valeurs des conductivités thermiques et chaleurs volumiques obtenues sont conformes aux valeurs données dans la littérature.

Les chaleurs volumiques et les conductivités thermiques locales du béton croissent sur une faible période de temps (2 jours) et par la suite décroissent progressivement. Ces variations sont valables pour les mesures effectuées aux quatre profondeurs. L'augmentation initiale pourrait être attribuée à l'élévation de la température durant l'hydratation. Cette explication n'est que partiellement suffisante puisque les valeurs de ces grandeurs continuent de croître alors que la température revient à l'équilibre (voir Figure 19). Une autre explication serait la formation du squelette solide, ou encore la coexistence des deux (température et formation du squelette solide).

La variation après deux jours peut être attribuée à la coexistence des deux phénomènes hydratation et séchage (l'effet de la température devient négligeable). A la cote 10 mm près de la face séchante, la chute de la conductivité thermique et de la chaleur volumique est très prononcée, on peut supposer qu'à cette cote l'hydratation est ralentie et que c'est uniquement le séchage qui est à l'origine de cette décroissance. Par contre, aux autres cotes, la conductivité reste élevée et ceci à cause de la forte teneur en eau.

La variation des conductivités thermiques et chaleurs volumiques est donc attribuée au moins à trois paramètres : la température, le degré d'hydratation et la teneur en eau du matériau.

Des gradients de conductivité thermique et de chaleur volumique sont clairement observés. Ces gradients sont très prononcés entre la profondeur $x = 10$ mm et les autres profondeurs ; en effet, le séchage s'effectue rapidement à cette profondeur de 10 mm (cf. Figure 20).

Enfin, il est important de souligner l'intérêt de cette méthode de mesure dynamique qui est non destructive et faiblement perturbatrice de l'état du matériau.

7. Paramètres du transfert hydrique

7.1. Mesure de la diffusivité massique (hydrique) isotherme sur la dalle (méthode dynamique)

7.1.1. Présentation

La mesure de la diffusivité massique (hydrique) locale pose les mêmes problèmes que celle des propriétés thermophysiques, à savoir le problème de prélèvement et celui de la mesure en continu de ce coefficient sans modification du matériau. A notre connaissance aucun travail n'a été fait dans ce sens. Nous avons utilisé la méthode développée par Bastian [10] et Al Sheikh Hassan et Bastian [14] [15] [16] dont le principe est rappelé en Annexe 2.

7.1.2. Montage expérimental

L'instrumentation de la dalle a été effectuée par la mise en place avant coulage du béton de 4 tiges en acier Stub de diamètre 6 mm vissées sur le coffrage latéral de la dalle. Ces tiges sont positionnées à 10, 20, 40 et 80 mm de la face séchant de la dalle et traversent toute la longueur de la dalle. Aucune graisse n'a été employée pour éviter l'adhérence du béton sur les tiges (il y avait risque de réduire les transferts hydriques en surface des canaux). 24 heures après le coulage du béton, les tiges ont été retirées de leur emplacement, et les trous ont été rebouchés aussitôt avec un bouchon spécial s'adaptant parfaitement aux écrous laissés sur le coffrage.

Les différentes mesures ont commencé 6 jours plus tard. La méthode utilisée est celle décrite en Annexe 2. Un séchage léger est pratiqué en envoyant de l'air comprimé puis détendu et partiellement humidifié en parallèle dans les 4 canaux pendant 5 heures (Photo 9). L'acquisition des humidités relatives s'effectue, dès l'arrêt du dispositif de séchage, à l'aide des sondes thermohygrométriques de diamètre 5 mm enfoncées au milieu de la dalle (Figure 40). L'acquisition s'effectue sur une durée de l'ordre de 20 heures. Un résultat type est présenté sur la Figure 41.

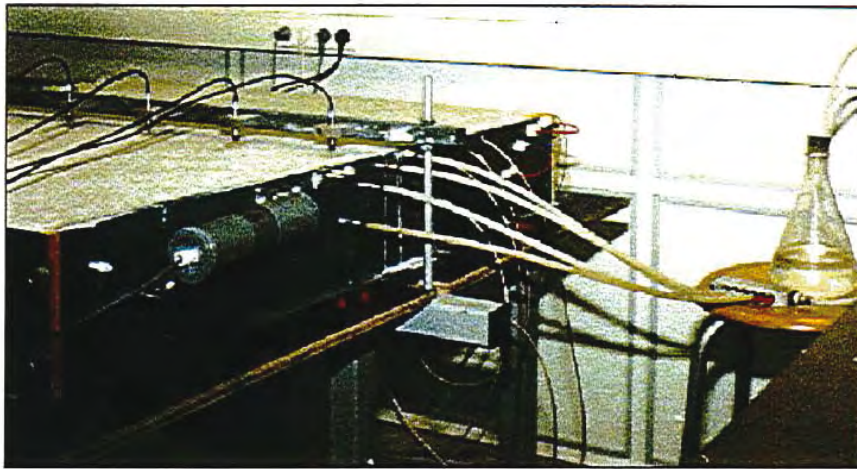


Photo 9 : Alimentation en air régulé en humidité pour la mesure des diffusivités massiques (hydriques)

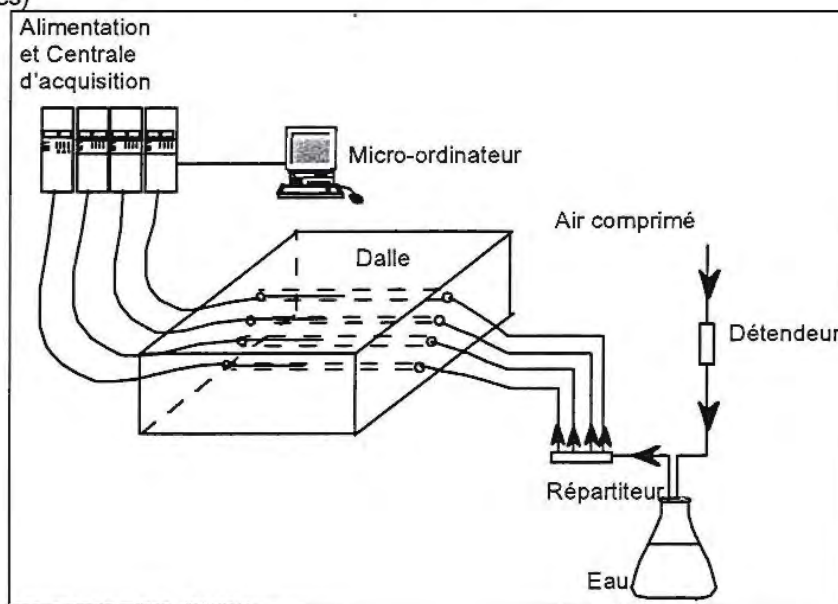


Figure 40 : Schéma du montage pour la mesure de la diffusivité massique (hydrique)

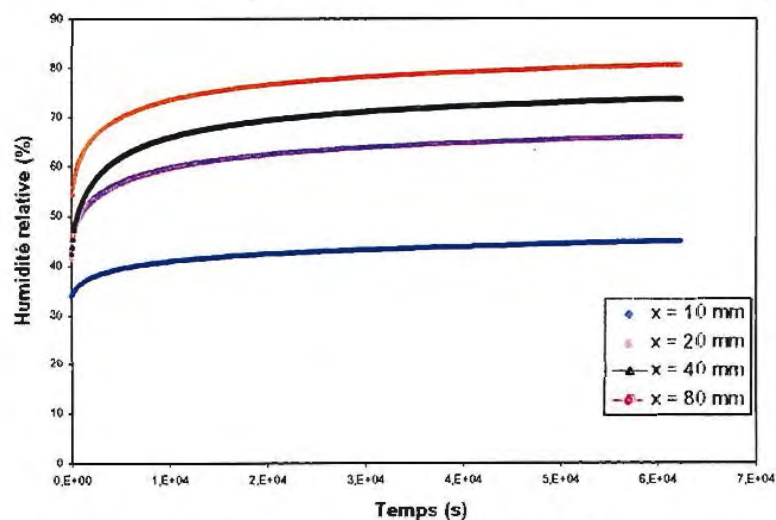


Figure 41 : Humidité relative enregistrée dans les canaux après coupure du séchage

7.1.3. Résultats

Les résultats après exploitation des mesures sont présentés sur la Figure 42, la diffusivité massique hydrique varie entre 10^{-9} et 10^{-8} m^2/s . Une discontinuité apparaît dans la représentation graphique. Elle résulte du fonctionnement capricieux de l'une des 4 sondes. Nous avons alors préféré déplacer les sondes d'un canal à un autre à chaque mesure afin d'obtenir la diffusivité massique pour toutes les cotes. Les ordres de grandeur obtenus sont en concordance avec ceux obtenus par Al Sheikh Hassan et Bastian [14] [15] [16] et Daïan [17] par des méthodes expérimentales semblables à celles utilisées dans ce travail. Par contre, ils sont différents de ceux obtenus avec la méthode de la coupelle par exemple (voir § 7.2.). Une proposition d'explication de cette différence est présentée plus loin.

On peut également remarquer que les diffusivités massiques décroissent globalement avec le temps sur une période de 28 jours et par la suite se stabilisent. On peut penser que l'imprécision relative des mesures n'a pas permis de mettre en évidence un gradient entre la surface séchante et le cœur de la dalle.

Enfin, on peut souligner l'intérêt de cette méthode dynamique de mesure locale sur un matériau en cours d'hydratation et de séchage.

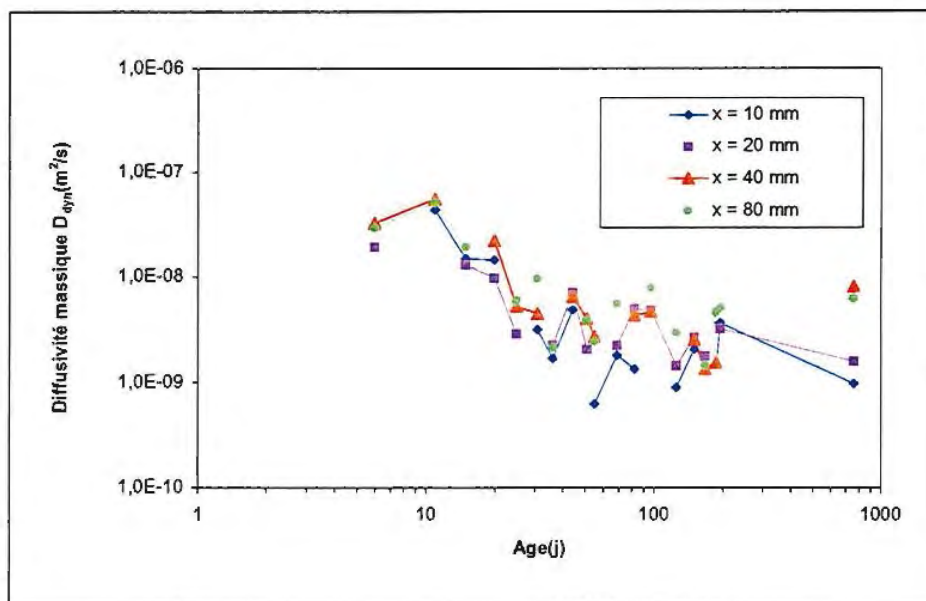


Figure 42 : Variation de la diffusivité massique (hydrique) en fonction du temps à différentes profondeurs

7.2. Détermination de la diffusivité massique (hydrique) sur éprouvette par la méthode de la coupelle

7.2.1. Principe de la mesure

La méthode expérimentale dite de la coupelle a été développée par le CSTB [18].

Cet essai de laboratoire permet de caractériser un matériau en mesurant expérimentalement le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau, et de la diffusivité massique (hydrique) lorsque l'on connaît l'isotherme de désorption de ce matériau.

Lorsqu'un matériau poreux d'épaisseur x est placé, à température constante, entre deux ambiances soumises à des pressions de vapeur différentes (p_{v1} , p_{v2}), celui-ci est traversé par un flux massique de vapeur d'eau j_v (kg/s.m^2) du milieu 2 vers le milieu 1 si $p_{v1} > p_{v2}$ (cf. Figure 43).

Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau π (en kg/s.m.Pa) est la quantité de vapeur d'eau passant par unité de temps (secondes) et de surface (m^2) à travers une épaisseur de 1 mètre de matériau soumis à une différence de pression de vapeur de 1 Pa en régime stationnaire et à température constante :

$$\pi = \frac{j_v \cdot x}{p_{v1} - p_{v2}} \quad (14)$$

où :

j_v : densité de flux massique (vapeur) en kg/s.m^2

x : épaisseur de matériau en mètre

p_{v1} : pression de vapeur du milieu 1 en Pascal

p_{v2} : pression de vapeur du milieu 2 en Pascal

Le coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau peut également s'exprimer en m/s . Il est alors noté k et est obtenu en traduisant les pressions de vapeur p_{v1} et p_{v2} en hauteur d'eau.

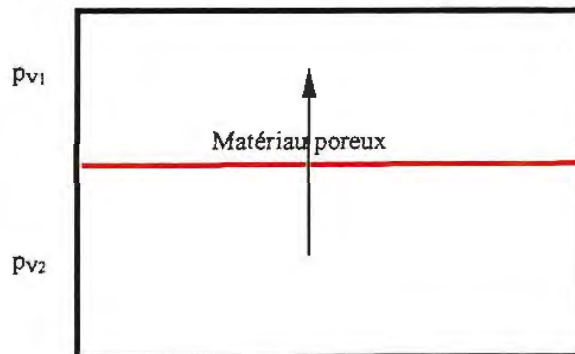


Figure 43 : Principe de la méthode de la coupelle

7.2.2. Dispositif expérimental et méthodologie

Le dispositif expérimental utilisé ici, composé d'éléments en PVC, est constitué d'un cylindre C fermé par deux bouchons filetés A et E. L'échantillon de matériau circulaire, placé au centre du cylindre, sépare hermétiquement deux compartiments où sont maintenues les ambiances 1 et 2 imposées par des solutions salines saturées (cf. Figure 44).

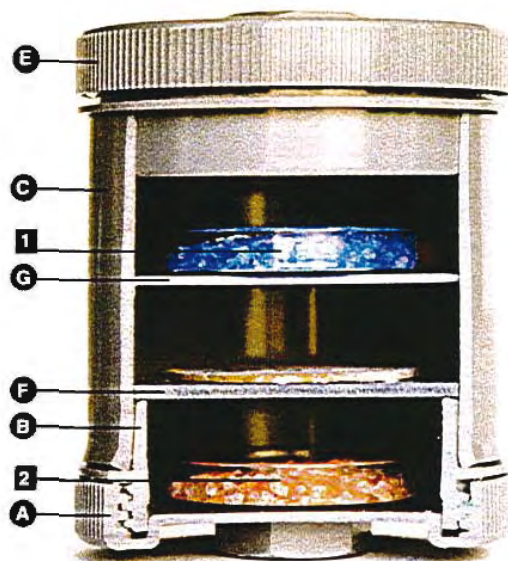


Figure 44 : Dispositif expérimental de la « coupelle »

Des exemples de solutions salines utilisées pour obtenir différentes humidités relatives dans l'ensemble de la gamme [0-100%] (à une température de 20°C) sont donnés ci-dessous :

<u>Sel utilisé</u>	<u>Humidité relative (%)</u>
Chlorure de Lithium	12%
Acétate de Potassium	22,8%
Chlorure de Magnésium	33%
Carbonate de Potassium	44%
Nitrate de Magnésium	53,5%
Nitrate d'Ammonium	63,2%
Chlorure de Strontium	71,5%
Sulfate d'Ammonium	80,1%
Chlorure de Baryum	90,4%
Sulfate de Potassium	97%

Les échantillons (disques de diamètre 110 mm et de 3 mm d'épaisseur) de béton BOSN âgé de 3 mois ont été stockés en atmosphère saturée, puis mis sous vide d'air à pression de vapeur saturante dans un dessiccateur. Ils ont ensuite été immergés dans de l'eau pour les saturer. Ils ont enfin été placés jusqu'à équilibre (perte relative de masse inférieure ou égale à 0,05% entre deux pesées espacées de 24 h) à la pression de vapeur fixée par la solution saline.

L'échantillon est placé à l'intérieur du cylindre sur la couronne F, l'étanchéité étant assurée par un joint au silicone. La coupelle 2, contenant la solution saline 2, est placée sur le bouchon A. Le cylindre C est vissé sur A, l'étanchéité étant réalisée par un joint de caoutchouc. La coupelle

1, contenant la solution saline 1, est pesée (balance à 0,001g) et placée sur le croisillon G, au dessus de l'échantillon. Le bouchon E, fermant l'ensemble, est vissé sur la partie supérieure du cylindre C (cf. Figure 44).

7.2.3. Résultats expérimentaux

La masse de la coupelle 1 est suivie au cours du temps. Lorsque les variations de masse sont linéaires, le régime permanent est atteint. On calcule alors la quantité de vapeur d'eau traversant l'échantillon et le débit de masse à partir de la surface de celui-ci.

Le coefficient de perméabilité est alors déterminé à partir des pressions de vapeur p_{v1} et p_{v2} (ou des humidités relatives ϕ_1 et ϕ_2) et correspond à la valeur moyenne de l'intervalle $p_{v2}-p_{v1}$ et donc à $\left(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}\right)$. L'essai est reproduit pour d'autres valeurs de pression de vapeur en

changeant les solutions salines. Les couples d'humidité relative ϕ_1 - ϕ_2 qui ont été testés sont dans l'ordre : (85%-100%), (76%-90%), (65%-85%), (55%-76%), (44%-65%) et (35%-55%).

7.2.3.1. Coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau

Les résultats obtenus sur le béton BOSN sont présentés dans les Figures 45 et 46.

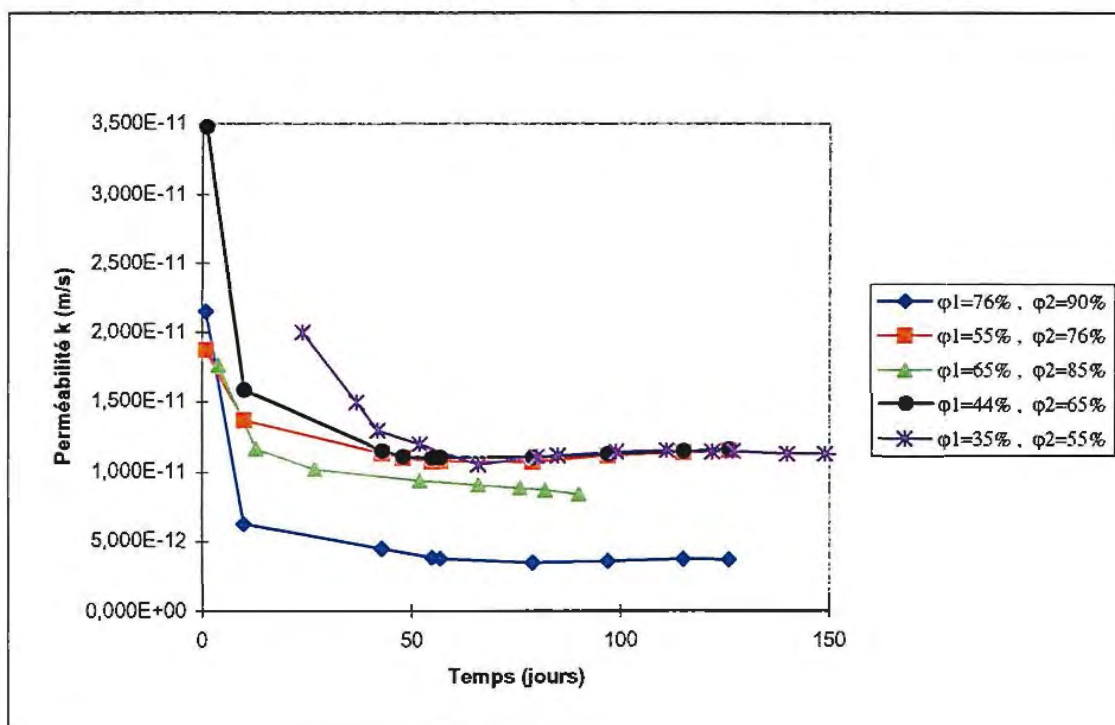


Figure 45 : Evolution du coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau en fonction du temps pour un échantillon de béton BOSN placé entre deux ambiances d'humidités relatives différentes

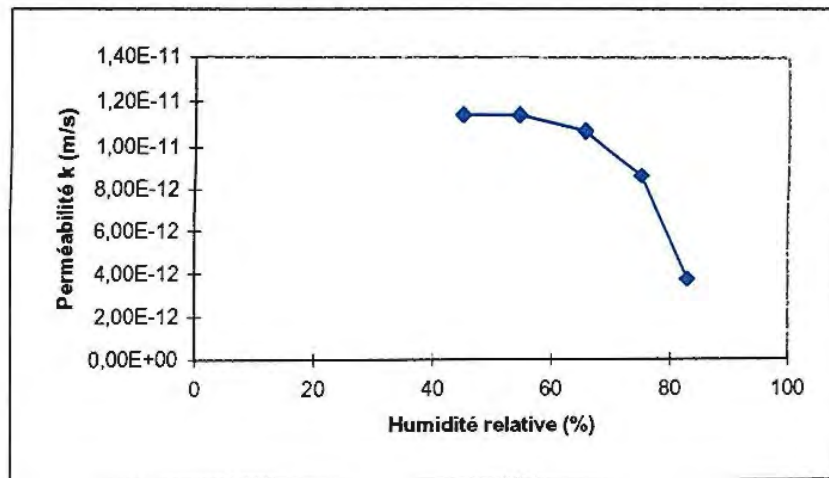


Figure 46 : Variation du coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau du béton BOSN en fonction de l'humidité relative moyenne du milieu ($\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$)

Ces résultats mettent en évidence les variations du coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité relative. Pour une variation de l'humidité relative, moyenne de 80% à 55%, la valeur du coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau varie d'un facteur 30. Pour les faibles humidités relatives, il semble que ce coefficient se stabilise, ce qui reste à confirmer par des essais pratiqués à des humidités relatives plus faibles.

7.2.3.2. Diffusivité massique (hydrique) mesurée en régime permanent (D_{stat})

A partir du coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau déterminé expérimentalement, il est possible de calculer la diffusivité massique (hydrique) D_{stat} (en m^2/s) par l'expression suivante :

$$D_{stat} = \pi \frac{p_{vs}}{\rho_0 \frac{dw}{d\phi}} \quad (15)$$

où :

p_{vs} : pression de vapeur saturante (2300 Pascal à 20°C)

ρ_0 : masse volumique apparente du matériau à l'état sec (2400 kg/m^3)

$\frac{dw}{d\phi}$: pente de l'isotherme de désorption de vapeur d'eau du matériau dans la gamme d'humidités relatives où a été mesuré π [9].

Les résultats obtenus pour le béton BOSN âgé de trois mois au démarrage de l'expérience sont donnés dans le Tableau 6 et la Figure 47. Les valeurs obtenues sur la plage d'humidités relatives testées (83% - 45%) varient entre 7 et 29.10⁻¹² m^2/s .

Tableau 6 : Coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau et diffusivité massique (hydrique) mesurés sur le béton BOSN âgé de trois mois au démarrage de l'expérience

ϕ (en %)	k (en 10^{-12} m/s)	π (en 10^{-12} kg/m.s.Pa)	D_{stat} (en 10^{-12} m ² /s)
83,0	3,79	0,38	6,90
75,0	8,71	0,88	18,10
65,5	10,80	1,10	21,40
54,5	11,50	1,17	22,80
45,0	11,50	1,17	28,60

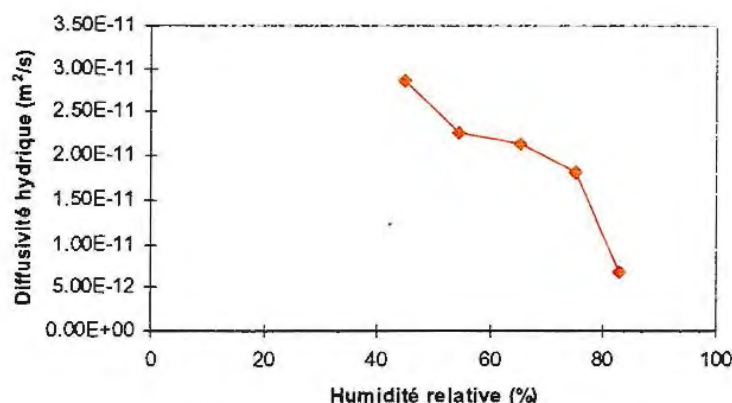


Figure 47 : Variations de la diffusivité massique (hydrique) en fonction de l'humidité relative

7.3. Comparaison des deux méthodes de mesure de la diffusivité hydrique

On a présenté en § 7.1 et § 7.2 les résultats expérimentaux relatifs à la diffusivité massique (hydrique) D_{dyn} et D_{stat} (voir notamment Figure 42 et Figure 47). Ces résultats apparaissent divergents. On observe en effet un rapport de 1 à 100 entre les seconds et premiers. Il est certain que l'histoire et l'âge du béton sont différents d'une méthode à l'autre au moment des mesures : dans un cas, les mesures ont été effectuées sur la dalle en phase d'hydratation, dans l'autre cas, les mesures ont été effectuées sur des disques minces âgés de trois mois, séchés puis partiellement saturés.

De plus, la méthode de mesure est très différente d'un cas à l'autre. Dans un cas, la méthode est dynamique (perturbation hydrique du matériau et enregistrement de sa réponse), dans l'autre cas, la méthode peut être qualifiée de statique (la mesure est effectuée en régime permanent).

7.3.1. Approche dynamique

L'approche développée en Annexe 2 (§ 1.2.2.3.) est de type dynamique. Par ailleurs, elle n'est possible que lorsque le matériau est en état hygroscopique. Rappelons ici les grandes lignes théoriques de cette méthode.

Si l'on décide de ne pas prendre en compte les phénomènes d'hystérésis et si l'on néglige les effets de la pesanteur devant ceux de la succion, une équation de transfert isotherme d'humidité peut s'écrire :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left(D_{dyn} \vec{\nabla} w \right) \quad (16)$$

Utilisant la variable humidité relative ϕ au lieu de la teneur en eau w , on a alors :

$$\left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T \frac{\partial \phi}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot \left(D_{dyn} \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T \vec{\nabla} \phi \right) \quad (17)$$

Cette équation est linéarisable pour de faibles variations de l'humidité, d'où :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D_{dyn} \Delta \phi \quad (18)$$

équation qu'on peut encore écrire :

$$\rho_0 c_m \frac{\partial \phi}{\partial t} = \lambda_m \nabla^2 \phi \quad (19)$$

Il s'agit d'une équation formellement identique à celle de la chaleur et ayant les mêmes solutions, sous réserve de pouvoir formuler des conditions aux limites analogues.

Si l'on exprime ϕ en %, $\lambda_m = D_{dyn} \rho_0 \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T$ s'exprimera en kg/m.s.% et $c_m = \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T$ en

kg/kg.%. c_m apparaît comme une capacité d'absorption d'humidité. $\left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T$ est la pente pour une humidité relative donnée d'une isotherme d'adsorption ou de désorption.

Des méthodes ont été élaborées pour mesurer λ_m et $b_m = \sqrt{(\lambda_m \rho_0 c_m)}$ par Bastian et Al Sheikh Hassan [10], [15]. On s'est limité dans le présent travail à la détermination de $D_{dyn} = (\lambda_m / b_m)^2$, détermination plus aisée que celle de λ_m ou b_m car elle ne nécessite pas de bilan hydrique entre air entrant et air sortant de la dalle (ce bilan disparaît par formation du rapport (λ_m / b_m)).

7.3.2. Approche statique

L'approche du § 7.2 peut être qualifiée de statique. On établit un flux constant d'humidité à travers une plaque mince de béton. L'expression de la densité de flux est :

$$\vec{j}_m = -D_{stat} \rho_0 \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T \vec{\nabla} \phi \quad (20)$$

Le coefficient de perméabilité à la vapeur π en kg/m.s.Pa entre deux ambiances dont la pression de vapeur diffère de Δp_v et séparées par une épaisseur x de béton est défini par :

$$j_v = -\pi \frac{\Delta p_v}{x} \quad (21)$$

Le flux j_m n'est pas observable directement ; on observe de l'extérieur seulement un flux de vapeur j_v que l'on identifie au flux j_m interne.

avec $p_v = \phi p_{vs}$ (ou bien $p_v = \frac{\phi}{100} p_{vs}$ si ϕ est exprimé en %).

Si l'on identifie les deux expressions de j_m , on obtient alors :

$$D_{stat} = \pi \frac{p_{vs}}{\rho_0 \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T} \quad (22)$$

On doit avoir également $\lambda_m = \pi p_{vs}$ (ou bien $\pi \frac{p_{vs}}{100}$ si ϕ en %).

7.3.3. Confrontation des deux approches

Dans les travaux cités précédemment ([10] [15] [16]), on a constaté un bon accord entre la conductivité dynamique λ_m et π pour des matériaux de type béton courant avec les ordres de grandeur suivants :

$$\pi = 6,6 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m.s.Pa [10]}$$

soit comme $p_{vs} = 2300 \text{ Pa}$ à $T = 20^\circ\text{C}$,

$$\lambda_m (\text{statique}) = 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m.s.\%}.$$

Par mesure directe de λ_m dynamique pour un mortier de ciment, on a trouvé constamment et en fonction de la teneur en eau des valeurs comprises entre 1 et $3 \cdot 10^{-10} \text{ kg/m.s.\%}$. Dans ces mêmes travaux, [10] [15] et [16] la diffusivité massique (hydrique) D_{dyn} obtenue dynamiquement soit directement, soit à partir de λ_m et b_m était également en bon accord avec celle obtenue par des procédés également dynamiques (imbibition) par d'autres auteurs [17] [19] avec les ordres de grandeur suivants, fonction de la teneur en eau : 1 à $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Par contre, il a été observé [16] une assez forte divergence entre capacités c_m obtenues à partir

de λ_m et b_m (on a $c_m = \frac{b_m}{\rho_0 \sqrt{D_{dyn}}} = \frac{b_m^2}{\rho_0 \lambda_m}$) et capacités c_m obtenues à partir d'isothermes d'

adsorption-désorption ($c_m = \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T$).

Al Sheikh Hassan [16] propose l'explication suivante : lors d'une perturbation brève (méthode dynamique), l'évolution de la teneur en eau ne se ferait pas selon l'isotherme correspondant à des évolutions très lentes mais suivant une pente beaucoup plus faible (cf. Figure 8). Une analyse physique des phénomènes au niveau microscopique s'avérerait nécessaire.

Perrin, Baroghel-Bouny et Chembloul [19] ont observé de semblables divergences entre diffusivités D_{dyn} obtenues par imbibition et par la méthode de la coupelle. Ils proposent des éléments d'explication.

Il y a là semble-t-il une voie de recherche qui n'est que partiellement explorée.

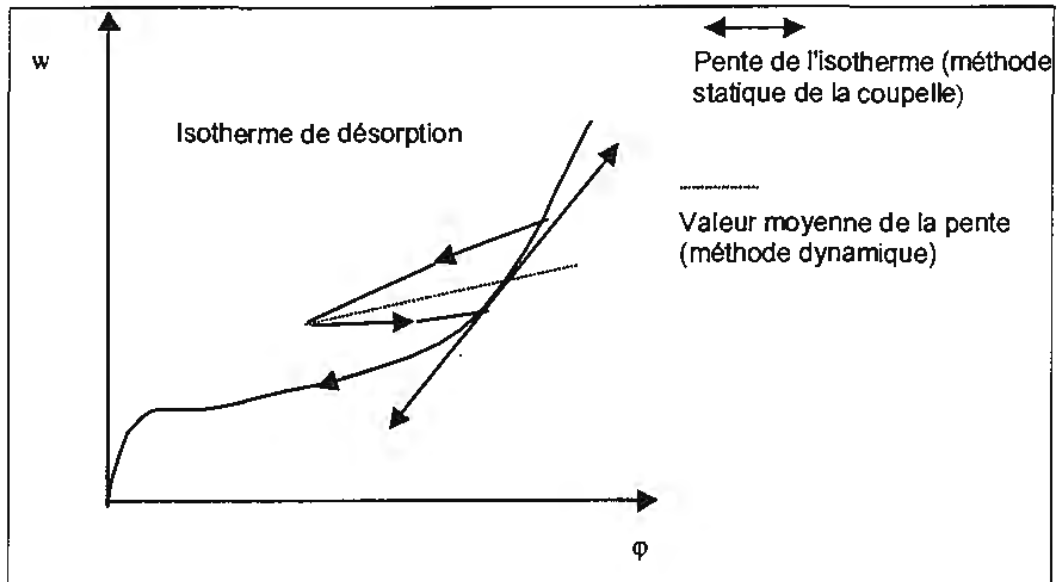


Figure 48 : Schéma d'explication des différences entre diffusivités massiques (hydriques) statique et dynamique

8. Etude des déformations : de l'éprouvette à la structure

8.1. Description des expériences réalisées et présentation des résultats

Les déformations de retrait ont été mesurées sur des éprouvettes 70x70x280 mm en trois configurations (endogène, séchage par une face et séchage par toutes les faces, cf. Figure 49). Par ailleurs, les déflexions sur la dalle en cours de séchage ont été mesurées. Des rapprochements entre le retrait observé sur les éprouvettes et les déflexions de la dalle ont été établis.

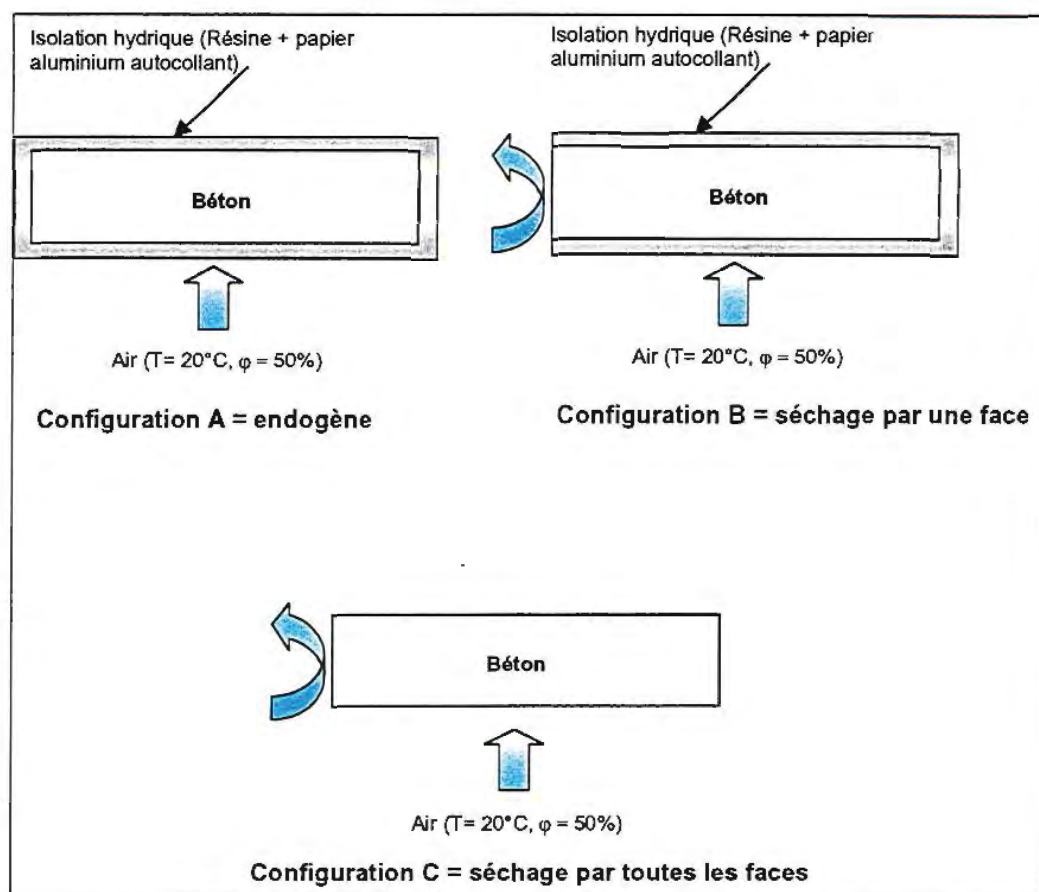


Figure 49 : Epreuves et conditions aux limites (configuration A : endogène, configuration B : éprouvette séchant par une face, Configuration C : éprouvette séchant par toutes les faces)

8.1.1. Résultats obtenus sur éprouvettes

Trois éprouvettes 70 x 70 x 280 mm munies de deux plots aux extrémités ont été coulées dans les mêmes conditions que la gâchée qui a servi pour la confection des deux dalles. La mise en œuvre du béton dans les éprouvettes a été effectuée suivant la norme NF EN 196-1. Par la suite, les éprouvettes ont été stockées dans la salle à $\phi = 50 \pm 5\%$ et $T = 20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ près de la dalle. Le décoffrage des éprouvettes a été effectué 24 h après le coulage et sitôt après, les éprouvettes ont été pesées et protégées contre la dessiccation suivant les trois configurations A, B et C (cf. Figure 49). La protection est effectuée par l'application successive d'une couche de résine Sikafloor d'une feuille d'aluminium (de cuisine) et d'une feuille d'aluminium autocollante. Cette technique a montré son efficacité (Khelidj et al. [2]). Une mesure de longueur au rétractomètre (au micron), et une mesure de masse avec une balance au $1/100^{\text{ième}}$ de gramme ont été effectuées. La mesure du retrait par cette technique en configuration C est sujette à discussion (Wittmann [20]), (Acker et al. [21]). En effet, le séchage s'effectue dans ce cas par toutes les faces de l'éprouvette, ce qui induit un retrait différentiel. De ce fait, les surfaces sur lesquelles sont collés les plots ne demeurent pas planes. Les résultats obtenus sont représentés sur les Figure 50, Figure 51 et Figure 52 (notons qu'en abscisse le temps 0 correspond à 24 heures après le coulage).

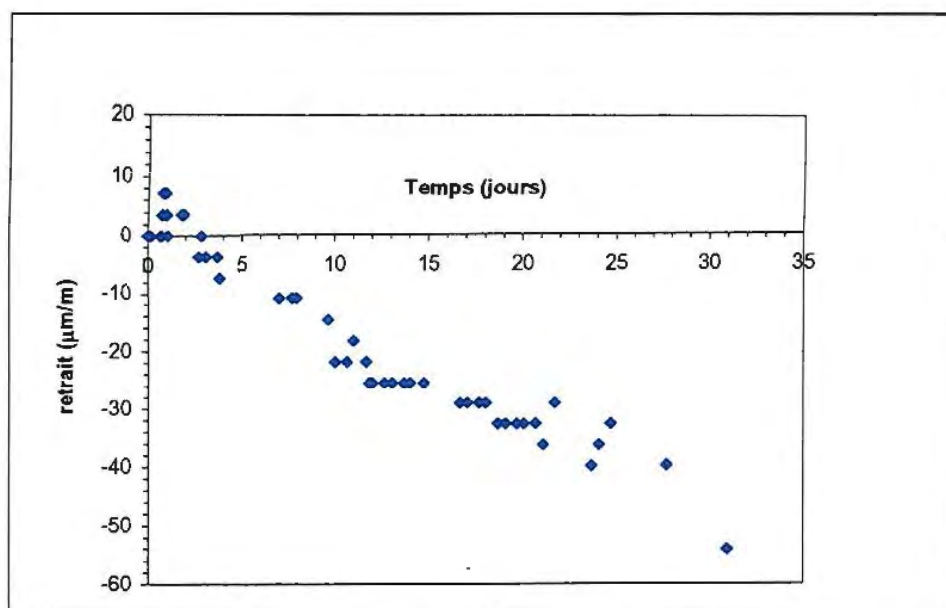


Figure 50 : Evolution du retrait endogène (éprouvette 70x70x280 mm protégée)

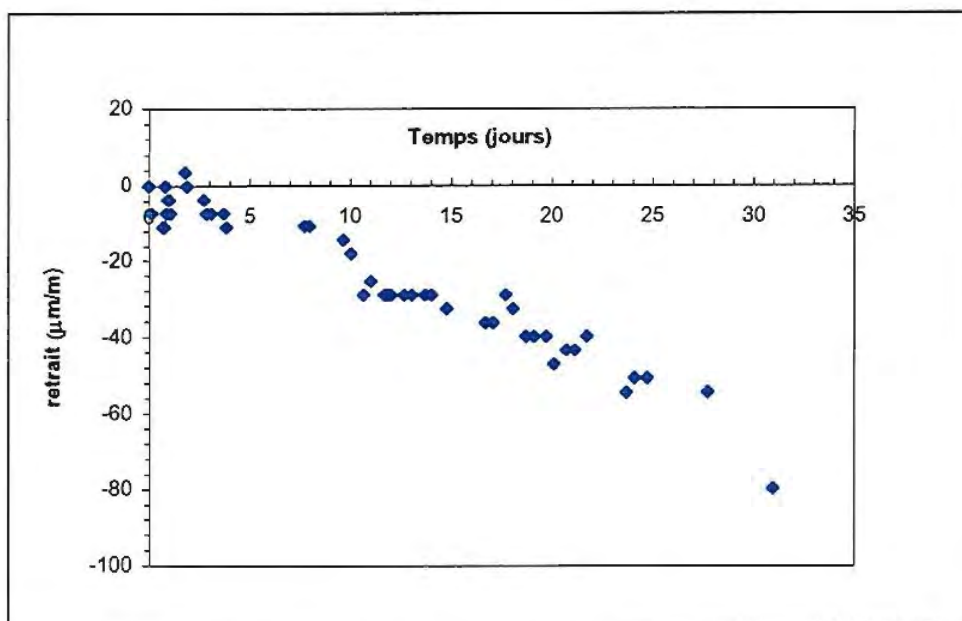


Figure 51 : Evolution du retrait total (éprouvette 70x70x280 mm séchant par une face)

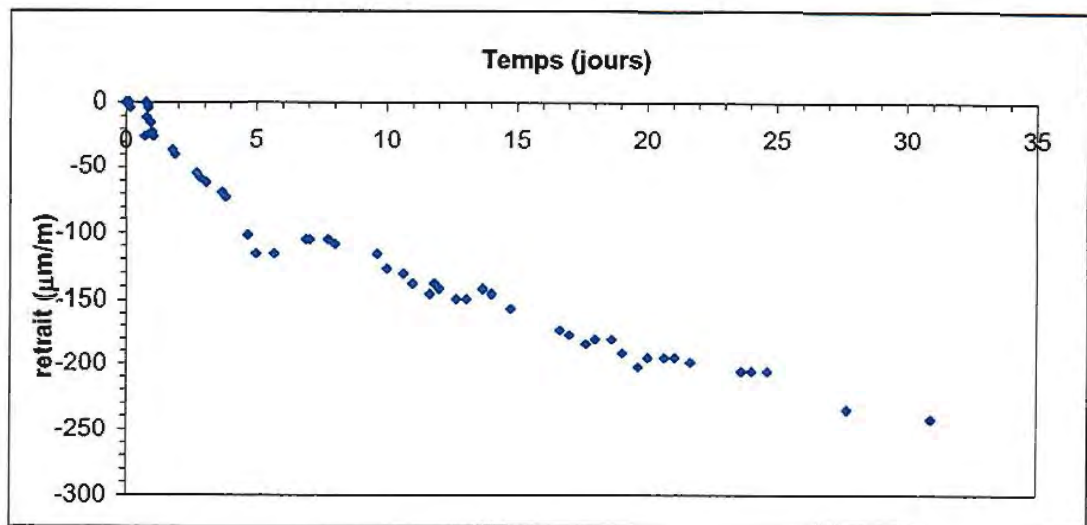


Figure 52 : Evolution du retrait total (épreuve 70x70x280 mm séchant par toutes les faces)

Les pertes relatives de masse des éprouvettes sont présentées en Figure 53.

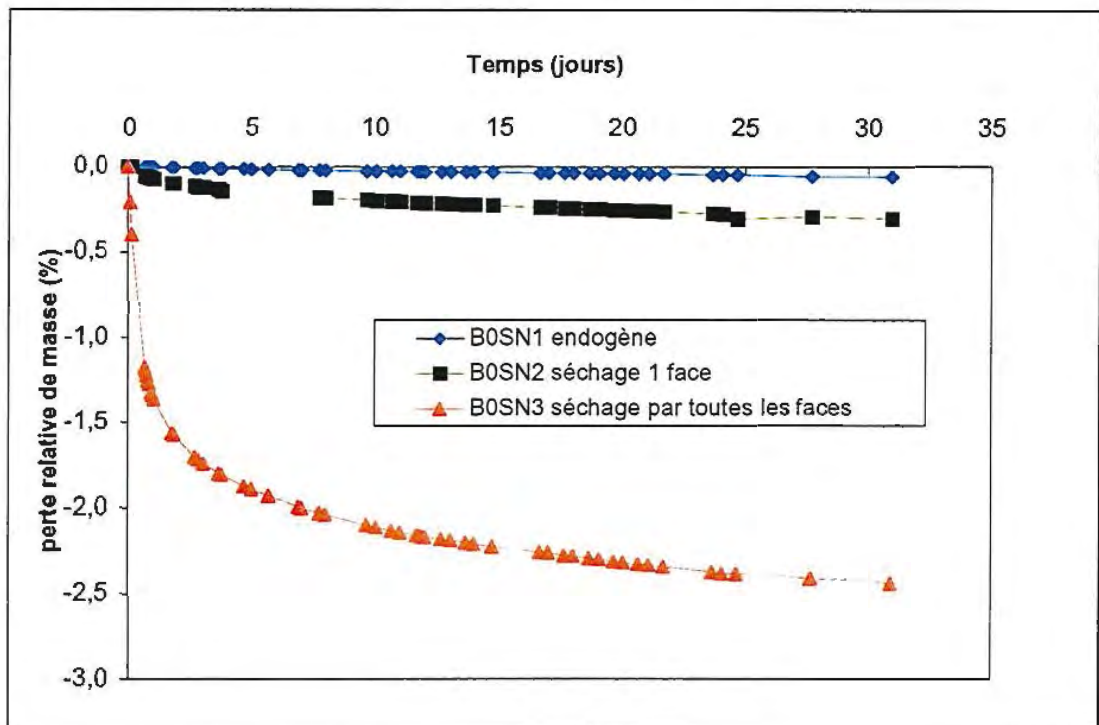


Figure 53 : Evolution des pertes relatives de masse des éprouvettes 70x70x280 mm (configurations A, B, C)

8.1.2. Résultats obtenus sur la dalle

Au niveau de la dalle, 24 h après le coulage, 4 capteurs de déplacement LVDT (course $\pm 0,5$ mm, précision = 1 micron) ont été installés pour mesurer la déflexion de la dalle. Le contact entre la surface exposée au séchage de la dalle et les capteurs a été assuré par le collage de petites pastilles rectangulaires en Plexiglas à l'aide d'Araldite (Photo 10).

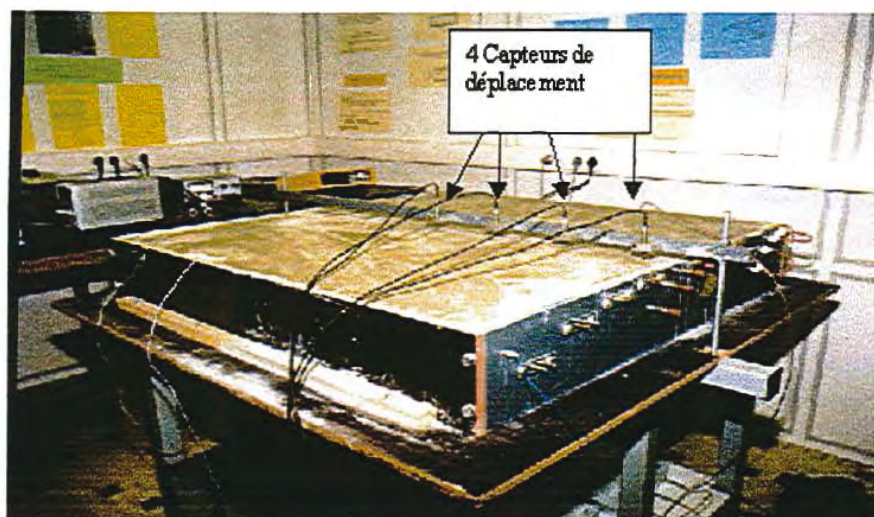


Photo 10 : Dalle après coulage avec la présence de 4 capteurs de déplacement sur la face séchante

Afin de préciser la position des capteurs de déplacement, signalons que le capteur à $x = 500$ mm est au centre de la dalle, que le capteur à $x = 20$ mm est au bord et que les deux autres sont placés entre.

Les résultats obtenus sur la dalle sont présentés sur la Figure 54, un zoom au jeune âge est représenté en Figure 55.

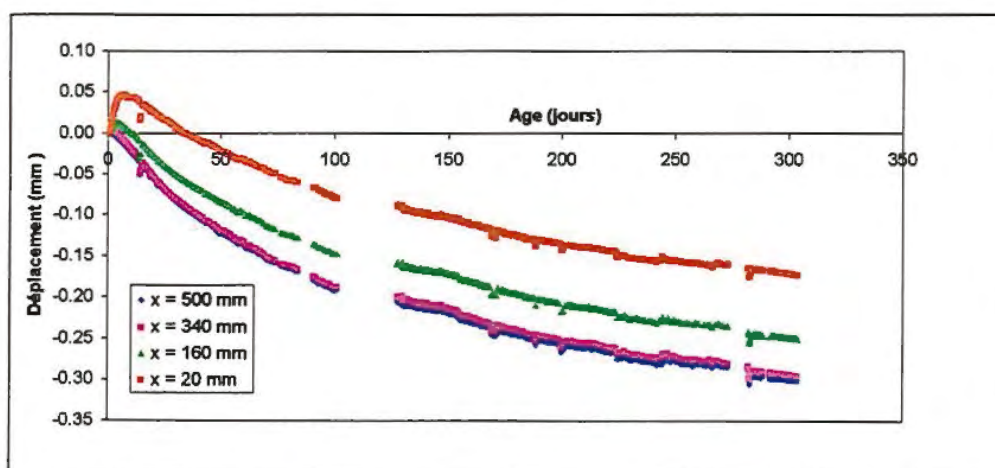


Figure 54 : Variation des déplacements de la dalle au cours du séchage

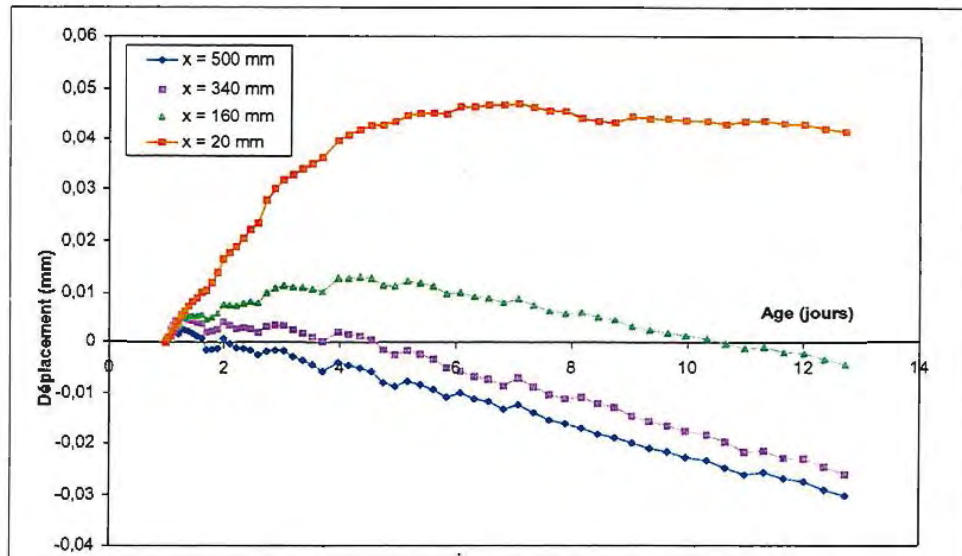


Figure 55 : Zoom de la Figure 54 sur les déplacements entre 0 et 12 jours

8.2. Analyse des résultats

On peut remarquer tout d'abord l'efficacité de la protection contre la dessiccation obtenue avec la résine et deux couches d'aluminium (Figure 53).

Concernant la déflexion observée sur la dalle, on peut remarquer un gonflement très prononcé près du coffrage ; ce gonflement est pratiquement inexistant au centre de la dalle. Il s'agit sans doute d'un effet de structure. Le séchage se développant uniquement par la face supérieure, donc d'une façon non symétrique, il se crée alors un retrait différentiel qui à son tour induit une compression dans la fibre supérieure de la dalle. On assiste alors à un voilement de la dalle et à une courbure schématisée par la Figure 56 (Wittmann [20]).

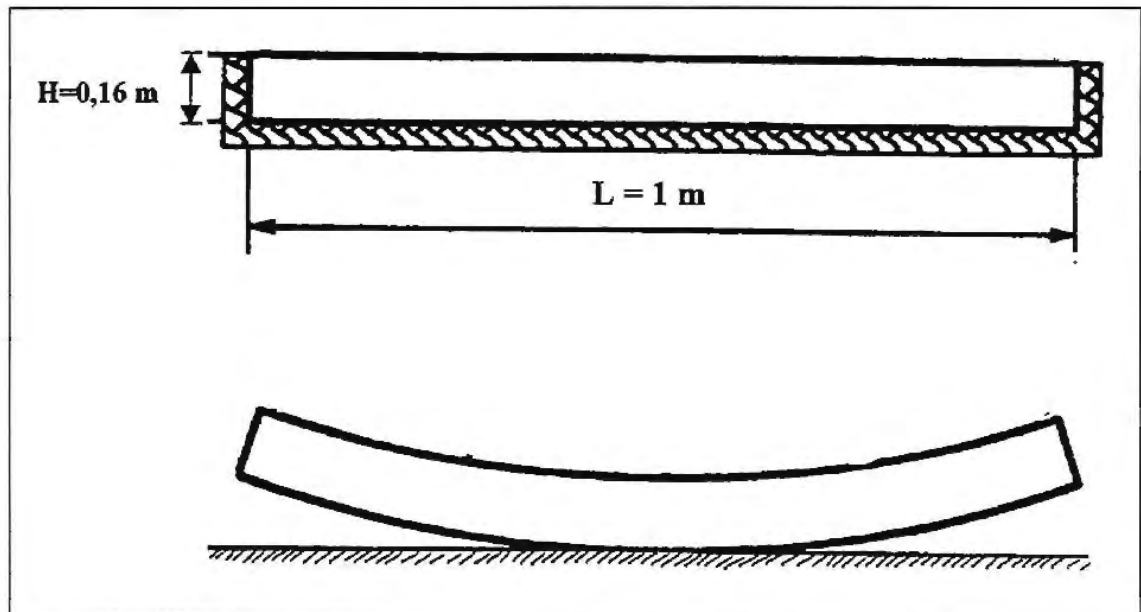


Figure 56 : Schéma du voilement de la dalle

Le gonflement en configuration endogène observé sur les éprouvettes (cf. Figure 50) ne peut pas à notre avis expliquer à lui tout seul le voilement de la dalle pour plusieurs raisons :

- Le temps de gonflement observé sur la dalle est plus grand que celui observé sur les éprouvettes,
- Si on attribue la courbure observée sur la dalle uniquement à l'effet du gonflement du matériau mesuré sur l'éprouvette en conditions endogènes, alors cette courbure devrait être dirigée vers le haut du fait d'une gêne probable du coffrage latéral de la dalle. Or, c'est tout à fait le contraire qu'on observe ici (cf. Figure 56)

Par contre, on remarque sur la dalle (Figure 55), tout à fait au début et quelle que soit la position du capteur, un léger gonflement similaire à celui enregistré sur les éprouvettes endogènes. Ce gonflement peut être attribué à un phénomène chimique, à savoir le développement de cristaux massifs de portlandite et d'ettringite primaire dans un matériau à moyen ou fort E/C [22].

9. Synthèse et mise en évidence des interactions entre hydratation et séchage

L'interaction entre l'hydratation et le séchage a été mise en évidence dans cette étude à partir des différentes mesures effectuées.

La distribution et la taille des pores obtenues par porosimétrie au mercure a montré que le pic de la zone 100-200 Å est d'amplitude plus faible dans la partie haute des éprouvettes que celui obtenu à 8 cm de la face séchante. Ceci témoigne d'une hydratation gênée par le séchage dans la zone proche de la surface. Il aurait été souhaitable de confirmer ce résultat par la mesure du degré d'hydratation à différentes cotes, cependant cette mesure n'a pas été concluante.

Les mesures par sondes capacitatives ont montré qu'au delà de 100 jours la réaction d'hydratation devenait négligeable devant les effets du séchage.

Les mesures par sondes thermohygrométriques ont montré qu'à 10 mm de la face séchante l'humidité relative chutait rapidement. Si l'on considère que l'hydratation est très ralentie au dessous d'une humidité relative de 70%, on peut conclure d'après la Figure 20 qu'un gradient d'hydratation peut apparaître entre la surface séchante et les autres profondeurs. La chute de l'humidité relative à cette cote (10 mm) est plus prononcée qu'aux autres cotes.

Les courbes donnant la conductivité thermique et la chaleur volumique témoignent de l'existence d'un gradient de teneur en eau et de la compétition entre séchage et hydratation près de la surface. La conductivité thermique et la chaleur volumique dans cette zone demeurent très différentes de celles obtenues aux autres cotes. En fait, cette différence peut être attribuable non seulement à la différence de teneur en eau, mais aussi à la formation du squelette solide par hydratation du ciment anhydre.

La mesure de l'humidité relative a montré que la courbe à 10 mm de la surface séchant changeait de pente 30 jours après la mise en place du béton, au voisinage de $HR = 70\%$. La première partie de la courbe peut résulter d'un effet cumulé de l'hydratation et du séchage, alors que dans la deuxième partie l'hydratation devient très faible et négligeable devant le séchage pur.

10. Conclusions et perspectives

Une étude expérimentale visant à mesurer les gradients de différentes propriétés dans une structure (dalle en l'occurrence) soumise à un séchage dès le jeune âge a été réalisée. Les gradients sont pour la plupart considérés comme une conséquence de l'interaction entre les phénomènes d'hydratation et de séchage. A cet effet, une métrologie complète a été mise au point. Celle-ci consiste en la mesure et le traitement des résultats sur deux corps d'épreuve : une dalle pleine de $1 \times 1 \times 0,16$ m et des éprouvettes issues, soit d'une dalle de même nature que la première et compartimentée de façon à extraire les différentes éprouvettes sans altération, soit coulées à part dans des moules. Cette métrologie a été concertée et menée en collaboration par trois laboratoires (LCPC Paris, LGCNSN IUT de Saint-Nazaire et LRPC Angers).

On a cherché tout d'abord à caractériser le matériau vis-à-vis de ses propriétés de transfert (perméabilité aux gaz, à la vapeur d'eau, diffusivités thermique et hydrique ...). Un suivi en continu de certains paramètres a également été effectué durant plus de 9 mois. L'exploitation des mesures a montré que des gradients de teneur en eau, de température, de conductivité thermique, de chaleur volumique, de porosité s'établissaient entre la face séchant et le cœur de la dalle. Ces gradients sont générateurs eux-mêmes de certains effets souvent néfastes pour les structures en béton. On citera la déflexion de la dalle générée par le retrait différentiel qui peut conduire à la fissuration de celle-ci. C'est ainsi que peut être compromise la durabilité d'un ouvrage, si des précautions spécifiques ne sont pas prises (cure adéquate).

Concernant les gradients de conductivité thermique et de chaleur massique, ils ne sont jamais pris en compte dans les modèles de calcul établis en vue de prévoir l'évolution de la température dans les ouvrages au jeune âge. La non prise en compte de ces gradients dans les structures dites minces ne pose pas à notre avis de gros problèmes. Ce n'est pas le cas pour des structures massives, où les effets thermiques conditionnent en partie la durabilité des ouvrages. L'introduction de ces paramètres thermophysiques comme paramètres variant avec le temps dans un modèle de calcul permet d'affiner le calcul des températures et leurs gradients éventuels dans de telles structures.

Cette recherche a apporté des résultats marquants sur la connaissance du matériau et des processus physico-chimiques relatifs aux interactions hydratation-séchage ainsi que sur la détermination expérimentale des coefficients de transfert qui conditionnent la durabilité des structures en béton.

La confrontation de différentes méthodes d'investigation a également permis de recueillir des éléments nouveaux et utiles pour le développement de techniques expérimentales pertinentes en la matière.

En outre, le présent document de synthèse illustre tout l'intérêt et la réussite d'une démarche en collaboration, permettant de bénéficier des compétences scientifiques et techniques de différents laboratoires, et plus généralement des "interactions" de leurs potentialités et savoir-faire respectifs dans le domaine de la durabilité du béton.

11. Bibliographie

- [1] Aïtcin P.C., Neville A., Acker P., (1998), 'Les différents types de retrait du béton', Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 215, mai-juin 1998.
- [2] Khelidj A., Loukili A., Bastian G. (1998), 'Etude expérimentale du couplage hydro-chimique dans les bétons en cours de maturation : incidence sur les retraits', Matériaux and Structures, Vol. 31, novembre 1998.
- [3] Baroghel-Bouny, V., (1994) 'Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons. Méthodes, analyse interprétations', Édition LCPC, Paris. (1994).
- [4] Spinner E., Tefft W.E. 'A method for determining mechanical resonance frequencies and for calculating moduli from these frequencies', Proceeding ASTM, Vol 1.
- [5] Loukili, A., (1996) 'Etude du retrait et du fluage des bétons à Ultra-Hautes Performances', Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, (1996).
- [6] 'Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité', Compte-rendu des Journées Techniques AFPC-AFREM "Durabilité des Bétons", 11-12 déc. 1997, Toulouse, France, (LMDC, 1998).
- [7] Kollek, J.J. (1989), 'The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method, a Recommendation', Materials and structures, vol. 22, 1989, pp 225-230.
- [8] Abbas, A., Carcasses, M. and Ollivier, J.P. (1999), 'Gas permeability of concrete in relation to its degree of saturation', Materials and structures, vol. 32, 1999, pp 3-8.
- [9] Baroghel-Bouny V., Mainguy M., Lassabatère T., Coussy O. (1999), 'Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high performance cementitious materials', Cement and concrete research, vol. 29, 1999, pp 1225-1238.
- [10] Bastian G. (1989), 'Détermination dynamique des paramètres des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein d'un mortier en régime hygroscopique', thèse d'état, Nantes (1989).
- [11] Aouaïssia - Abdallah, N., (1997) 'Mesure dynamique des paramètres du transfert isotherme d'humidité dans un mortier', Thèse de Doctorat de l'Université et de l'Ecole Centrale de Nantes, IUT de Saint-Nazaire, 1997.
- [12] Bastian G, Khelidj A., (1995), 'Propriétés thermophysiques d'un béton fraîchement coulé', Bulletin de Liaison Labo. P. et Ch. 200, nov-déc 1995.
- [13] Bastian G., (1982), 'Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction par une méthode transitoire type sonde cylindrique', Revue Phys. Appl., 17, 1982.
- [14] Bastian G., Al Sheikh Hassan N, (1993), 'Détermination instantanée de l'effusivité massique d'humidité', Int. J. of Heat and mass transfer, 36, 743-754, (1993).
- [15] Al Sheikh Hassan N., Bastian G., (1993), 'Réponse d'une paroi de mortier à un échelon hygrothermique prolongé', Revue Générale de Thermique Fr., N° 374, Février 93.
- [16] Al Sheikh Hassan N., (1992), 'Réponse de parois épaisses de mortier à des chocs hygrothermiques prolongés', thèse de doctorat, Université de Nantes et ECN, 1992.
- [17] Daïan J.F. (1986), 'Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux - Etude expérimentale du mortier de ciment', Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- [18] Delcelier P., (1989), 'Transferts de vapeur', Cahiers du CSTB, livraison 298, Cahier 2322, pp 1-18.
- [19] Perrin B., Baroghel Bouny V. Chemloul L. (1998), 'Méthodes de détermination de la diffusivité hydrique de pâtes de ciments durcies', Matériaux et constructions RILEM N°208, 1998.
- [20] Wittmann, F. H., (1997) 'Le séchage et le retrait de dessiccation du béton', XV^e Rencontres universitaires de Genie Civil, EC'97 (Strasbourg, 1997).
- [21] Acker, P., Boulay, C., Rossi, P., (1987), 'On the importance of initial stresses in concrete and of the resulting mechanical effects', *Cement Conc. Res.* 17 (1987).
- [22] Baroghel-Bouny V., Kheirbek A., 'Effect of mix-parameters on autogenous deformations of cement pastes - Microstructural interpretations', Proceedings of the International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete "Shrinkage 2000", October 16-17, 2000, Paris (Edited by V. Baroghel-Bouny and P.C. Aïtcin, RILEM, 2000).

- [23] Moyne C., (1987), 'Transferts couplés chaleur-masse lors du séchage : prise en compte du mouvement de la phase gazeuse', Thèse d'Etat, Nancy (1987).
- [24] Martinet J. (1989), 'Eléments de thermocinétique', (Tech. et Doc., Lavoisier, Paris).
- [25] Abramowitz M., Stegun I.A. (1972), 'Handbook of mathematical functions', (Dover Pub. Inc., N. Y.).
- [26] Blackwell J. H. (1954), 'A transient flow method for determination of thermal constants', J. Appl. Phys., 25 p.
- [27] Luikov A.V., (1966), 'Heat and mass transfer in capillary porous bodies', Pergamon Press, London (1966).
- [28] Carslaw H.S., Jaeger J.C., (1959) 'Conduction of heat in solids', Oxford Clarendon Press, London (1959).

12. Annexes

12.1. Annexe 1 : Composition chimique et minéralogique du ciment

Tableau 7 : Composition chimique du ciment utilisé
CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2 "HTS" du Teil (Lafarge)

Constituant	Teneur (en %)
SiO ₂	22,84
Al ₂ O ₃	2,70
TiO ₂	0,15
Fe ₂ O ₃	1,84
CaO	67,41
MgO	0,81
Na ₂ O	0,14
K ₂ O	0,23
SO ₃	2,23
Cl ⁻	0
S ²⁻	0
RI	0,23
PAF	1,72
MnO	0
CO ₂	1,22
H ₂ O	0
CaO _i	0,47
Total	100,30

Tableau 8 : Composition minéralogique potentielle du ciment
(calculée par la formule de Bogue)

Constituant	Teneur (en %)
C ₃ S	65,55
C ₂ S	16,02
C ₃ A	4,04
C ₄ AF	5,59
CaCO ₃	2,77
CaO _i	0,47
Total	99,24

12.2. Annexe 2 : Détermination expérimentale des coefficients de transfert de chaleur et d'humidité

12.2.1. Modélisation des transferts

En l'absence de gradient de pression gazeuse et lorsque les effets gravitaires sont négligeables par rapport aux effets de succion (Bastian [10]) le système d'équations de transferts couplés de chaleur et d'humidité dans un matériau capillaro-poreux pourra s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} \rho_0 c & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} T \\ w \end{pmatrix} = \nabla \left[\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} \nabla \begin{pmatrix} T \\ w \end{pmatrix} \right] \quad (23)$$

avec ρ_0 masse volumique du matériau sec, c capacité thermique massique du matériau humide, T température et w teneur en eau massique. Les expressions des coefficients k_i sont données par Moyne [23]

Si le matériau est en outre hygroscopique, on peut écrire une relation du même type (avec ϕ : humidité relative d'équilibre)

$$\begin{pmatrix} \rho_0 c & 0 \\ \left(\frac{\partial w}{\partial T} \right)_\phi & \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} T \\ \phi \end{pmatrix} = \nabla \left[\begin{pmatrix} k_{11} + k_{12} \left(\frac{\partial w}{\partial T} \right)_\phi & k_{12} \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T \\ k_{21} + k_{22} \left(\frac{\partial w}{\partial T} \right)_\phi & k_{22} \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T \end{pmatrix} \nabla \begin{pmatrix} T \\ \phi \end{pmatrix} \right] \quad (24)$$

La résolution de (23) ou (24) par l'analyse, moyennant des hypothèses simplificatrices, est pratiquée dans ce qui suit pour la détermination de certains coefficients k_i .

12.2.2. Transfert de chaleur à teneur en eau constante

La diffusion de l'humidité étant beaucoup plus lente que celle de la chaleur pour les matériaux qui nous concernent, on peut concevoir des mesures dynamiques rapides ne perturbant pas les teneurs en eau. Le système (23) se réduit à :

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k_{11}) \nabla T \quad (25)$$

système qu'on peut linéariser dans le cas de perturbations thermiques de faibles amplitudes. On retrouve alors l'équation classique de diffusion de la chaleur :

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (26)$$

Le coefficient k_{11} s'identifie à λ conductivité thermique dite 'apparente' : outre le strict phénomène conductif, cette conductivité apparente décrit aussi le phénomène de vaporisation - liquéfaction dû à la diffusion de vapeur.

La détermination de λ , de $\rho_0 c$ et de leur rapport $a = \frac{\lambda}{\rho_0 c}$ (diffusivité thermique) s'effectuera en concevant une expérimentation de géométrie simple, de conditions aux limites également simples – par exemple échelon ou créneau de flux thermique – en résolvant analytiquement l'équation de la chaleur et en rapprochant résultats expérimentaux et solution théorique. On utilisera ici la méthode du fil chaud.

Soit un conducteur électrique infiniment fin, dissipant, à partir de l'instant $t = 0$, la puissance constante P/L (en W / m) dans un milieu infini, initialement isotherme, et caractérisé par λ et a . La résolution de l'équation de la chaleur nous fournit, en coordonnées cylindriques, l'expression de $T(r, t)$ température à la distance r du fil à l'instant t .

Utilisant d'emblée une formulation adimensionnelle, on pose :

$$T^* = \frac{4\pi\lambda L T}{P}, \quad t^* = \frac{4at}{r^2} \quad (27)$$

La solution s'écrit alors :

$$T^* = E_1\left(\frac{1}{t^*}\right) \quad (28)$$

avec

$$E_1\left(\frac{1}{t^*}\right) = \int_{1/t^*}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (29)$$

C'est cette expression qui sera exploitée, tant pour le fil chauffant lui-même (question discutée par Martinet [24] : r est alors le rayon du fil, si petit soit-il), que pour un fil parallèle à la distance r du premier.

Dans le cas du fil chauffé, l'approximation " t^* grand" sera valable dès les toutes premières secondes du chauffage, on aura alors :

$$E_1\left(\frac{1}{t^*}\right) = -\gamma + \ln t^* + \frac{1}{t^*} - \frac{1}{4t^{*2}} + \frac{1}{18t^{*3}} - \dots \quad (\gamma : \text{constante d'Euler}) \quad (30)$$

Pour le fil non chauffé, vu la distance r choisie ($r = 15,0$ mm) et vu l'ordre de grandeur de a ($a \approx 10^{-6}$ m²/s), on sera amené, suivant le cas, à utiliser le développement précédent de $E_1(1/t^*)$ ou un développement valable pour t^* petit (Abramowitz et al. [25]).

$$E_1\left(\frac{1}{t^*}\right) \approx \frac{t^*}{e} \left(\frac{1 + A_1 t^* + A_2 t^{*2}}{1 + B_1 t^* + B_2 t^{*2}} \right) \quad (31)$$

Le cas d'un créneau de chauffage de durée t_c (soit encore $t_c^* = 4at_c / r^2$) se traite par superposition des densités de flux $+(P / L)$ à partir de $t = 0$ et $-(P / L)$ à partir de $t = t_c$. D'où, pour $t^* > t_c^*$:

$$T^* = E_1\left(\frac{1}{t^*}\right) - E_1\left(\frac{1}{t^* - t_c^*}\right) \quad (32)$$

Si t^* et $(t^* - t_c^*)$ sont grands, cette relation devient (cf. Figure 57) :

$$T^* = \ln \frac{t^*}{t^* - t_c^*} + \frac{1}{t^*} - \left(\frac{1}{t^* - t_c^*} \right) + \dots \quad (33)$$

Pour le fil chauffé, on a vu que la modélisation était applicable à la température du fil lui-même. L'observation du retour à l'équilibre ($t > t_c$) est plus favorable à la précision de la mesure de la résistance électrique du fil. On mesure la chute de tension à ses bornes quand un courant, suffisamment faible pour ne pas provoquer d'échauffement, et imposé par un générateur de courant, le traverse.

Un modèle plus affiné peut aussi être utilisé (Blackwell [26]) : un fil de longueur infinie parfaitement conducteur séparé du milieu par une résistance de contact. Le modèle n'est malheureusement pas utilisable pour des temps intermédiaires (ni courts, ni longs) (Bastian [10]) ; il offre par contre l'avantage de mettre en évidence le fait que, si on se place en phase de retour à l'équilibre, l'influence d'une résistance de contact éventuelle disparaît pratiquement.

Pour des temps t^* et $t^* - t_c^*$ suffisants, on a (cf. Figure 58) :

$$T^* = \ln \frac{t^*}{t^* - t_c^*}$$

soit encore :

$$T = \frac{P}{4\pi\lambda L} \ln \frac{t}{t - t_c} \quad (34)$$

Et par suite, en notant Δ une variation :

$$\lambda = \frac{P}{4\pi L} \frac{\Delta \left| \ln \frac{t}{t - t_c} \right|}{\Delta T} \quad (35)$$

avec $P = V.I$ supposé sensiblement constant ; V : d.d.p. aux bornes du fil et I : courant de chauffage traversant le fil.

Dans le cas du fil non chauffé, l'évolution $T^* = f(t^*)$ de la température du fil est décrite par :

$$T^* = E_1(1/t^*) \text{ pour } t^* < t_c^*$$

$$T^* = E_1(1/t^*) - E_1(1/(t^* - t_c^*)) \text{ pour } t^* > t_c^*$$

On exploite les propriétés mathématiques de la fonction E_1 (Figure 59) :

existence d'un point d'inflexion l pour $t^* = 1$, soit :

$$l = \frac{4at_1}{r^2} \quad \text{d'où} \quad a = \frac{r^2}{4t_1} \quad (36)$$

expression de la pente de la tangente en $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{t_1}$ d'où :

$$\rho_0 c = \frac{P}{e\pi L r^2} \left| \frac{\Delta t}{\Delta T} \right|_{t_1} \quad (37)$$

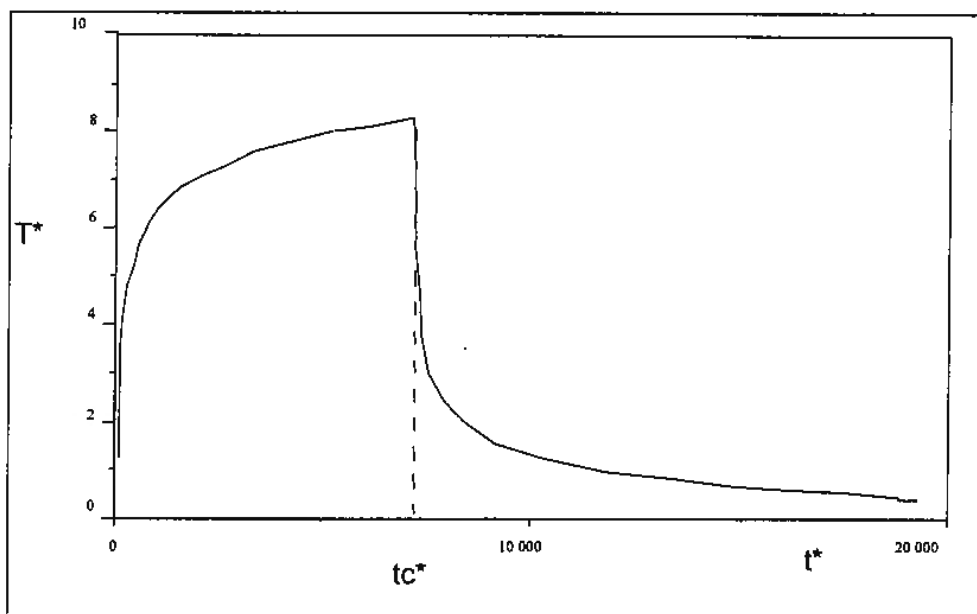


Figure 57 : Exemple de réponse d'un fil chauffé à un créneau de chauffage de durée $t^*c = 7\,200$ Température et temps adimensionnels (représentation en fonction de t^*)

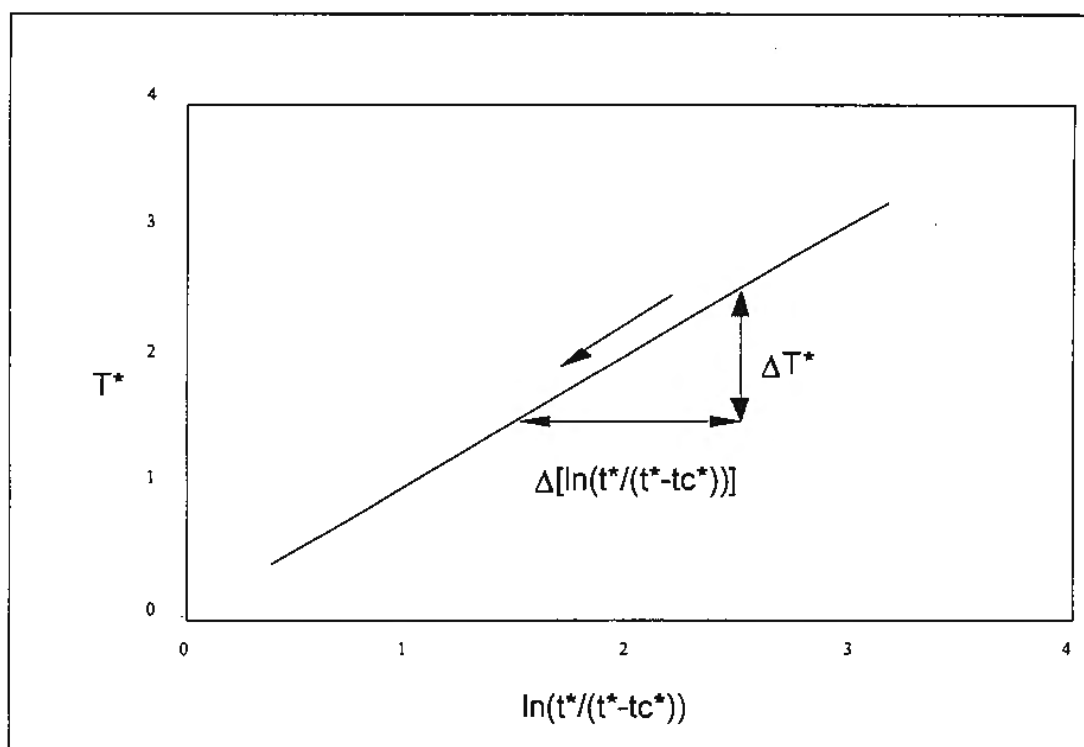


Figure 58 : Exemple de réponse d'un fil chauffé à un créneau de chauffage de durée $t^*c = 7\,200$. Température et temps adimensionnels (représentation en fonction de $\ln t^*/(t^*-t^*c)$).

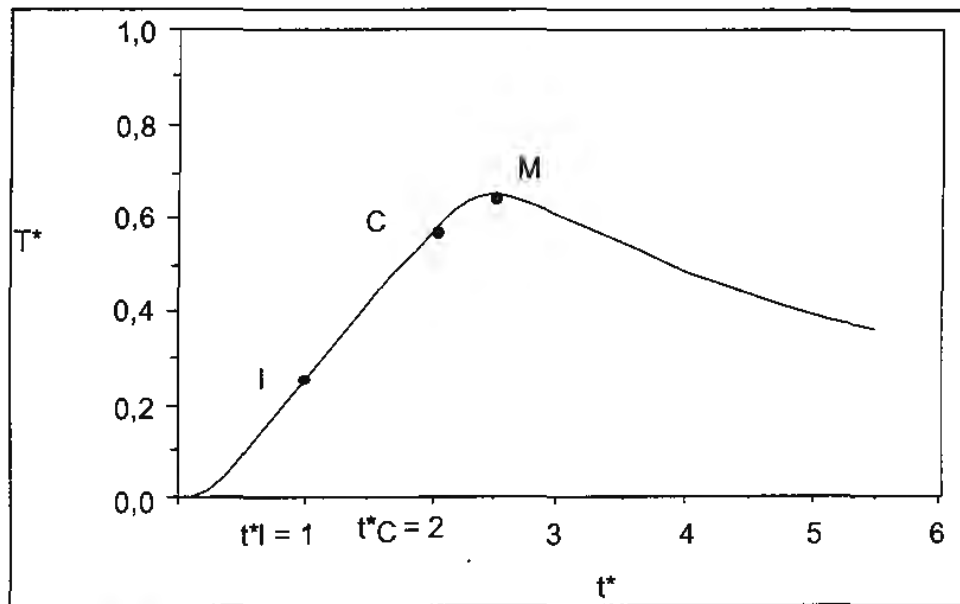


Figure 59 : Exemple de réponse à un créneau de chauffage de durée $t^*c = 2$ d'un fil parallèle au fil chauffé. Température et temps adimensionnels

12.2.3. Transfert d'humidité isotherme

En utilisant comme potentiel de transfert de masse l'humidité relative de l'air d'une cavité au sein du matériau, dans la mesure où celui-ci est hygroscopique, et maintenu isotherme, et où les écarts par rapport à l'équilibre hydrique sont faibles, une équation analogue à celle de la chaleur et déduite du système (24) décrit la diffusion d'humidité isotherme.

$$\rho_0 c_m \frac{\partial \phi}{\partial t} = \lambda_m \nabla^2 \phi \quad (38)$$

avec $T(x, y, z, t) = \text{Cte}$, λ_m qui apparaît comme une conductivité d'humidité et c_m comme une capacité d'absorption d'humidité [10].

Les notions de conductivité et de capacité d'absorption d'humidité ont été introduites par Luikov [27] et reliées à une grandeur plus classique, la diffusivité d'humidité D_{dyn} , que l'on identifie selon [10] au coefficient k_{ω} de (23).

On a $D_{dyn} = \frac{\lambda_m}{\rho_0 c_m}$, et l'on posera par ailleurs l'effusivité massique d'humidité égale à :

$b_m = \sqrt{(\lambda_m \rho_0 c_m)}$ par analogie avec l'effusivité thermique. Enfin, toujours d'après

Luikov [27] on doit avoir, si l'on utilise ϕ comme potentiel de transfert de masse $c_m = \left(\frac{\partial w}{\partial \phi} \right)_T$.

c_m apparaît alors comme la pente d'une isotherme de désorption $w(\phi)$ du matériau considéré.

En faisant circuler à débit $\dot{V}$ constant dans un canal de rayon r de l'air d'humidité différente de celle imposée initialement par le béton environnant, on provoque au sein de celui-ci un transfert d'humidité décrit par l'équation (38). Il a été montré en [14] que le transfert de masse à la surface du canal pouvait être convenablement stylisé comme suit : densité de flux d'humidité

par unité de longueur de canal variant linéairement entre deux points distants de L , de valeur moyenne J_L constante dans le temps et égale à la densité de flux à l'abscisse $L/2$. Le schéma de principe est donné en Figure 60.

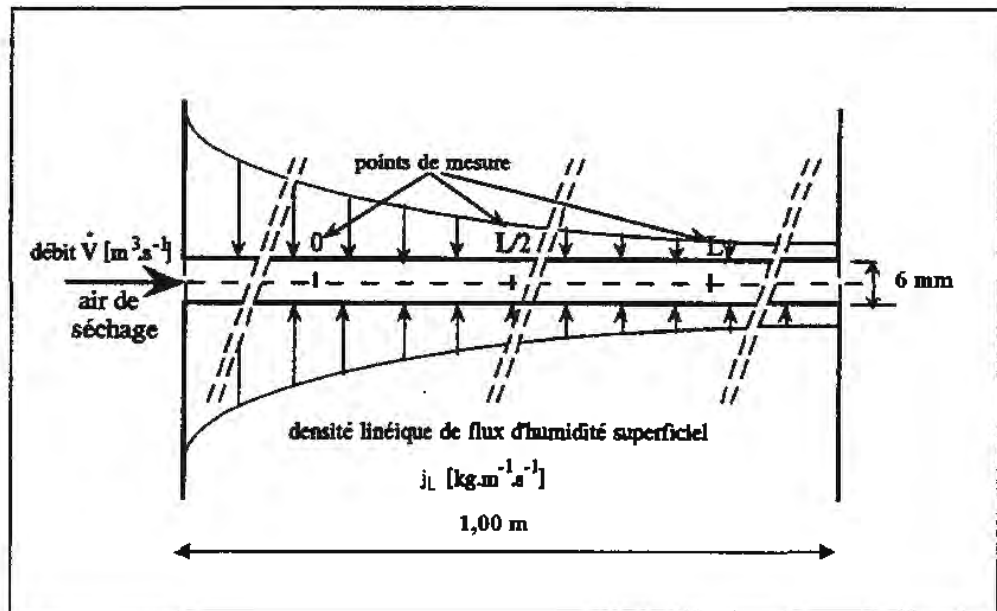


Figure 60 : Mesure des paramètres du transfert de masse

Si ρ_a est la masse volumique de l'air et w_{a0} et w_{aL} son humidité absolue aux abscisses 0 et L , un bilan hydrique mène à :

$$J_L = \frac{\dot{V} \rho_a (w_{aL} - w_{a0})}{L} \quad (39)$$

en convenant de noter positivement une opération de séchage ($w_{aL} > w_{a0}$) : air circulant dans le canal plus sec que l'air initialement enclos et extrayant de l'humidité du mortier ou béton.

L'humidité absolue de l'air est donnée par :

$$w_a = \frac{18}{29} \frac{\phi}{\frac{100 P_0}{\rho_{vs}(T)} - \phi} \quad (40)$$

où w_a est l'humidité absolue de l'air en (kg/kg air sec)

avec P_0 : pression atmosphérique et $p_{vs}(T)$: pression de vapeur saturante à la température T

L'équation (38) à laquelle on adjoint la condition de type échelon de densité de flux d'humidité en surface du canal est résolue à l'aide de la transformation de Laplace ; il s'agit d'un problème classique (Carslaw et Jeager [28]), voisin de celui du fil chaud dont on a donné la solution auparavant : on obtient l'évolution $\phi(t)$ de l'humidité relative dans le canal à l'abscisse $L/2$ à partir de sa transformée.

$$\bar{\varphi} = \int_0^{\infty} e^{-pt} \varphi(t) dt \quad (41)$$

$$\bar{\varphi} = - \frac{J_L K_0(qr)}{2\pi r K_{12}(qr)} \quad (42)$$

(Avec K_0 et K_1 fonctions de Bessel et $q = \sqrt{p/D_{dyn}}$, $\bar{\varphi}$ étant développée en puissances de p ou de $1/p$ selon que l'on s'intéresse aux temps courts ou longs, on obtient :

$$\text{Temps courts : } \varphi \approx \frac{J_L \sqrt{t}}{\pi^{3/2} r b_m} \quad (43)$$

$$\text{Temps longs : } \varphi \approx \frac{J_L}{4\pi r \lambda_m} \ln \frac{4D_{dyn} t}{r^2 e^\gamma} \quad (44)$$

avec γ constante d'Euler (0,577 215).

Pour des raisons pratiques - difficulté à obtenir une circulation d'air parfaitement stable en débit et humidité - on préfère considérer l'évolution de l'humidité consécutive à un créneau de séchage de durée t_s donc pour des temps $t > t_s$ plutôt que l'évolution de l'humidité pendant le séchage ($t < t_s$). En écrivant que pour $t > t_s$ tout se passe comme s'il y avait superposition de deux densités de flux d'humidité J_L et $-J_L$, on aboutit ainsi pour un temps de séchage important (t_s grand) à :

$$b_m = \frac{J_L}{\pi^{3/2} r} \frac{\Delta(\sqrt{t-t_s})}{\Delta\varphi} \quad (45)$$

pour $(t-t_s) \ll t_s$, c'est-à-dire quand la mesure est effectuée immédiatement après l'arrêt du séchage et à :

$$\lambda_m = \frac{J_L}{4\pi} \frac{\Delta\left(\ln \frac{t}{t-t_s}\right)}{\Delta\varphi} \quad \text{pour } (t-t_s) \text{ et } t_s \text{ du même ordre. On en déduit à partir de}$$

$$D_{dyn} = (\lambda_m / b_m)^2$$

$$D_{dyn} = \frac{\pi r^2}{16} \frac{\Delta\left(\ln \frac{t}{t-t_s}\right)}{\Delta\varphi} \left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta(\sqrt{t-t_s})} \right)^2 \quad (46)$$

On notera que D_{dyn} est indépendant de la mesure de J_L . Les Figure 61, Figure 62 et Figure 63 donnent des évolutions types de φ en milieu de canal en fonction de t , $(t-t_s)^{1/2}$ et $\ln[t/(t-t_s)]$. On constate sur la Figure 62 que φ varie linéairement comme $(t-t_s)^{1/2}$ pour des valeurs petites de $(t-t_s)$ et sur la Figure 63, comme $\ln[t/(t-t_s)]$ pour des valeurs élevées de $(t-t_s)$.

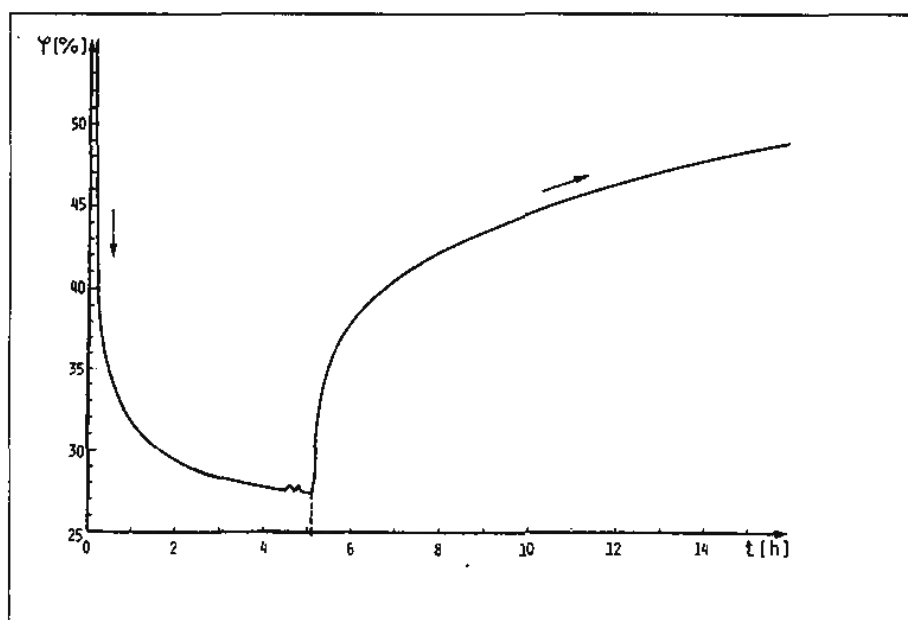


Figure 61 : Evolution type de l'humidité ϕ dans un canal en fonction du temps

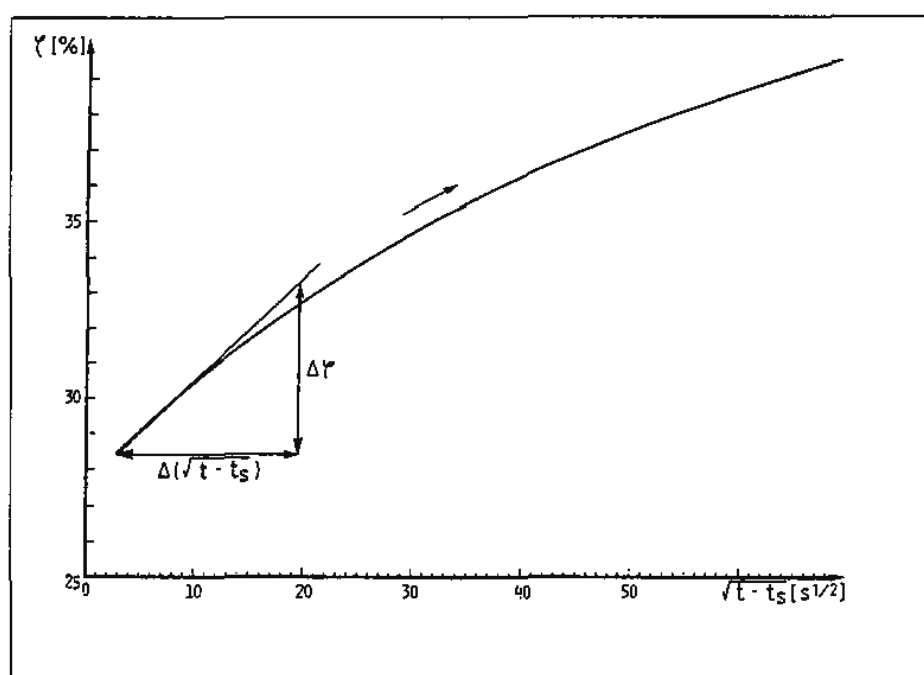


Figure 62 : Evolution type de l'humidité ϕ dans un canal en fonction de $(t-t_s)^{1/2}$

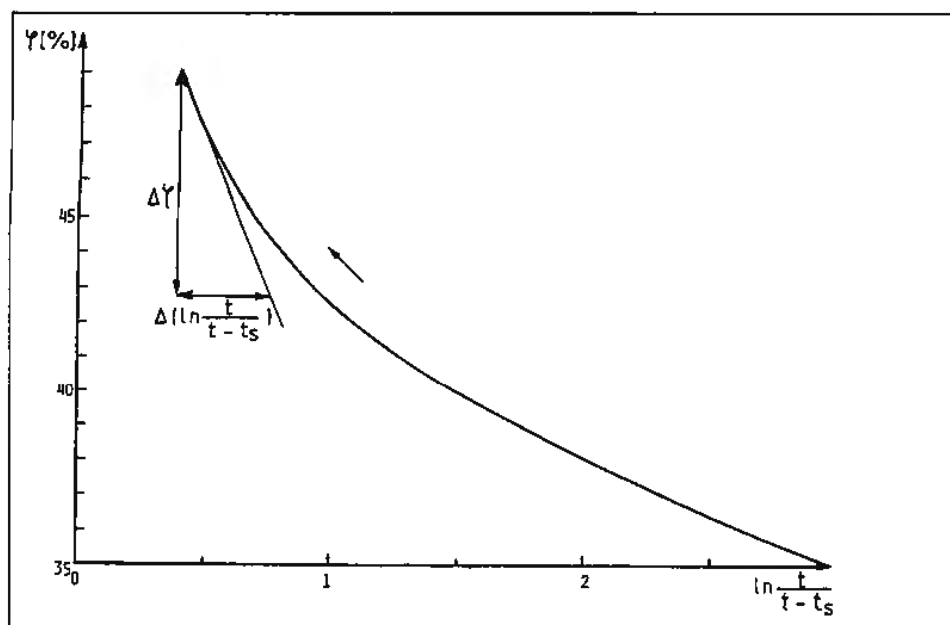


Figure 63 : Evolution type de l'humidité φ dans un canal en fonction de $\ln[t/(t-t_s)]$

Résumé

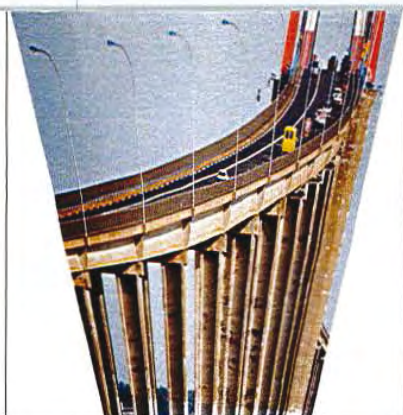
Détermination expérimentale des gradients résultant d'une interaction hydratation-séchage dans une dalle en béton

Ce rapport synthétise les résultats obtenus au laboratoire de génie civil de Nantes-Saint-Nazaire (LGCNSN-IUT de Saint-Nazaire) ; au LCPC et au LRPC d'Angers, et relatifs à une expérimentation de grande ampleur sur deux dalles et des éprouvettes en béton au cours de leur séchage. Pour cela, un ensemble très complet de méthodes d'investigation a été mis en œuvre. Outre les déformations, un grand nombre de paramètres (microstructuraux, thermiques, hydriques etc.) ont été mesurés et leur évolution a été suivie au cours du temps dès le jeune âge et pendant plusieurs mois. D'importants gradients de ces propriétés résultant d'une interaction hydratation-séchage ont pu être mis en évidence et quantifiés entre le cœur de la dalle et sa surface exposée au séchage.

Abstract

Experimental determination of the gradients resulting from a hydration-drying interaction occurring in a concrete slab

This report summarizes the results obtained at the Nantes/Saint-Nazaire Civil engineering laboratory (LGCNSN-IUT of Saint-Nazaire), the Ponts et Chaussées research centre and the regional Ponts et Chaussées facility in Angers, with respect to a large-scale experimental programme on the drying of two concrete slabs and various concrete specimens. This programme required the implementation of a broad range of investigation methods. In addition to the deformations, a large number of other parameters (microstructural, thermal, hygral, etc.) were measured and their evolution monitored from early age and over a period of several months. Significant gradients of these properties, as the result of an hydration-drying interaction, have been pointed out between the core of the slab and its drying surface.



A. Khelidj, V. Baroghel-Bouny, G. Bastian, J. Godin, G. Villain

Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages

**Détermination expérimentale des gradients
résultant d'une interaction hydratation-séchage
dans une dalle en béton**

Ce rapport synthétise les résultats obtenus au Laboratoire de génie civil de Nantes-Saint-Nazaire (LGCNSN - IUT de Saint-Nazaire), au LCPC et au LRPC d'Angers, et relatifs à une expérimentation de grande ampleur sur deux dalles et des éprouvettes en béton au cours de leur séchage. Pour cela, un ensemble très complet de méthodes d'investigation a été mis en œuvre. Outre les déformations, un grand nombre de paramètres (microstructuraux, thermiques, hydriques ...) ont été mesurés et leur évolution a été suivie au cours du temps dès le jeune âge et pendant plusieurs mois. D'importants gradients de ces propriétés résultant d'une interaction hydratation-séchage ont pu être mis en évidence et quantifiés entre le cœur de la dalle et sa surface exposée au séchage.

