

Nouvelle approche expérimentale du retrait de dessiccation des pâtes et des bétons durcis ordinaires et à très hautes performances

Véronique BAROGHEL-BOUNY
Ingénieur 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 Bétons et composites cimentaires
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

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

RÉSUMÉ

Cet article présente une étude expérimentale relative au retrait de dessiccation menée sur des échantillons de pâtes de ciment et de bétons durcis de faible épaisseur et âgés d'un an. Une pâte de ciment (respectivement un béton) ordinaire de rapport eau sur ciment de 0,34 (respectivement 0,48), ainsi qu'une pâte de ciment (respectivement un béton) à très hautes performances contenant 10 % de fumées de silice et de rapport eau sur ciment 0,19 (respectivement 0,26) ont été testés. Les déformations « à l'équilibre » ont été déterminées en fonction de l'humidité relative, au cours d'une expérience de désorption de vapeur d'eau par paliers à $T = 23 \pm 0,1$ °C. Les résultats indiquent un retrait de dessiccation plus faible pour les matériaux à très hautes performances. Une relation linéaire est également mise en évidence entre l'humidité relative et les déformations mesurées.

MOTS CLÉS : 32 - Retrait - Béton hydraulique - Teneur en eau - Béton hautes performances - Séchage - Pâte de ciment - Fumée de silice - Déformation.

Introduction : Définitions et position du problème

Au cours de la vie du béton, toute variation de quantité de l'eau contenue dans les pores du matériau et physiquement liée (adsorbée) à leur surface engendre des déformations de la matrice ciment. Les déformations libres résultant de ces variations de teneur en eau et mesurables sur des corps d'épreuve en béton peuvent être classées en deux types.

Le premier type correspond aux déformations *endogènes*. Il s'agit des déformations enregistrées au cours du temps et dès le gâchage sur des corps d'épreuve vieillissant à température ambiante constante et protégés de tout échange hydrique avec le milieu environnant. Ces déformations trouvent leur origine dans les processus physico-chimiques liés aux réactions d'hydratation du ciment. À partir d'un certain degré d'hydratation du ciment, qui est fonction de la quantité d'eau initiale et plus généralement de la formulation, le matériau subit une autodessiccation, c'est-à-dire un séchage interne, homogène et isotrope. Ceci signifie que l'humidité relative interne du matériau diminue (sans qu'il y ait perte de masse) quand celui-ci n'est pas en contact avec une source d'humidité externe. Cette autodessiccation (apparition d'une phase gazeuse dans les pores) résulte ici de la diminution de la quantité d'eau liquide par transformation en eau chimiquement liée.

Parmi les différentes composantes des déformations endogènes, le *retrait d'autodesiccation*, qui se manifeste lorsque les pores capillaires commencent à se vider de leur phase liquide, devient à partir d'un âge donné (qui dépend de la formulation du matériau) la principale composante de ces déformations endogènes, les autres composantes intervenant plutôt au jeune âge [1].

Le second type de déformations susceptibles de se manifester correspond aux déformations *exogènes*. Dans la plupart des ouvrages réels, le béton, initialement dans un état proche de la saturation, subit un séchage naturel qui débute dès qu'une surface est soumise à une humidité relative externe inférieure à celle régnant dans le réseau poreux. Le flux d'humidité, qui entraîne une évaporation de l'eau à la surface (départ d'eau vers l'extérieur), est induit par le déséquilibre d'humidité relative. Il est fonction de la différence entre ces deux humidités relatives, c'est-à-dire du gradient hydrique. Ce gradient hydrique est souvent très fort au voisinage des surfaces [2], [3].

Lorsque les variations de la quantité d'eau interne au matériau résultent exclusivement des variations hygrométriques du milieu environnant, le corps d'épreuve subit dans ce cas ce que l'on appelle des *déformations hygrométriques*. En laboratoire, de telles déformations peuvent être obtenues sur des corps d'épreuve qui sèchent ou s'humidifient « sans vieillir », c'est-à-dire lorsque l'hydratation du ciment n'évolue quasiment plus. Dans le cas du séchage (ou dessiccation), la déformation mesurée est couramment appelée *retrait de séchage* ou *retrait de dessiccation*. C'est cette dernière expression qui sera choisie ici, pour mettre l'accent sur le parallèle avec le *retrait d'autodesiccation*.

Il est important de garder à l'esprit que dans la plupart des cas des ouvrages réels et *in situ*, le béton vieillit et est soumis simultanément à une dessiccation externe ou plus exactement à des cycles de séchage-humidification. La valeur de l'humidité relative interne du béton résulte donc des deux processus qui interagissent. Ainsi, par exemple, le gradient hydrique générant le retrait de dessiccation, qui dépend de l'humidité relative interne du matériau, dépend donc de l'état d'autodesiccation à l'instant et au point considérés. D'un point de vue pratique, le découplage entre retrait d'autodesiccation et retrait de dessiccation est par conséquent artificiel.

Néanmoins, il est indispensable d'étudier séparément les deux types de déformations, afin de pouvoir identifier le (ou les) mécanisme(s) en jeu et les paramètres déterminants, et de pouvoir par la suite prévoir les déformations du béton à partir des paramètres de formulation.

Une telle approche découplée a, par exemple, permis de démontrer que retrait d'autodesiccation et retrait de dessiccation des matériaux à base de ciment résultaient tous deux de la diminution de l'humidité relative régnant dans les pores de la matrice ciment, par consommation chimique de l'eau liquide, pour l'un et par vidange des pores, pour l'autre [1]. Plus précisément, à une diminution donnée d'humidité relative interne, générée par autodesiccation ou par séchage exogène, correspond une déformation de retrait identique (de retrait d'autodesiccation ou de retrait de dessiccation, respectivement) [1].

Le séchage naturel du béton engendre donc une déformation différée résultante qui n'est pas la superposition des déformations endogène et exogène précédemment décrites. D'où la limite des approches qui consistent à déduire le retrait de dessiccation d'un matériau par différence entre retrait total et retrait endogène, plus facilement mesurables expérimentalement.

Le présent article est consacré à l'étude expérimentale du retrait de dessiccation de pâtes de ciment et de bétons durcis, ordinaires et à très hautes performances.

Lorsqu'elles sont gênées ou empêchées, ou même par le seul effet de structure, les déformations de retrait de dessiccation du béton peuvent compromettre le comportement mécanique ou la durabilité de l'ouvrage par la fissuration qu'elles induisent [4], [5]. Il est donc de toute première importance de bien comprendre le processus de retrait de dessiccation et de pouvoir prévoir ou même contrôler les déformations à partir des paramètres de formulation du matériau. C'est ce qui explique que le retrait de dessiccation des matériaux à base de ciment ait largement été étudié depuis de nombreuses années.

En outre, il est important de savoir comment se situent les déformations de retrait des matériaux à hautes ou à très hautes performances par rapport à celles des matériaux ordinaires. En effet, les bétons à hautes et à très hautes performances font désormais partie de la panoplie des matériaux à disposition des constructeurs. Leur utilisation est croissante, que ce soit pour les ouvrages du génie civil ou dans le domaine du bâtiment. Il devient donc nécessaire de bien connaître leur comportement, en particulier à long terme, et notamment d'acquérir des données expérimentales en la matière.

Trois principaux mécanismes ont été proposés depuis Powers ([6], [7]) pour expliquer le retrait de dessiccation des pâtes de ciment durcies, suivant le domaine d'humidité relative H_R considéré. Il s'agit des variations de dépression capillaire pour $40\% < H_R < 100\%$ (dans les pores où se sont formés des ménisques suite au départ d'eau),

des variations de l'énergie superficielle du solide pour $H_R < 40\%$ (qui dépend de la quantité d'eau adsorbée [8]), ainsi que de la pression de disjonction pour $40\% < H_0 < 100\%$ (dans les espaces restreints où l'adsorption est gênée [8], [9], [10]). En outre, Feldman & Sereda ont montré l'importance du mouvement de l'eau « interfeuille » des C-S-H sur les déformations liées aux cycles de séchage-humidification [11].

De plus, bon nombre de modèles ont été proposés, sur la base de ces différents mécanismes, pour quantifier et prévoir le retrait de dessiccation. La plupart d'entre eux, dans une optique d'outil pour l'ingénieur, relève d'une approche macroscopique, basée sur le mécanisme de dépression capillaire. Le lecteur pourra se reporter aux références suivantes pour les dix dernières années, de 1987 à 1997 : [4], [12], [13], [14], [15], [16] ou [17]. D'autres modèles, à vocation multi-échelle, voire également multi-phase, sont construits à partir d'une description précise de la microstructure [18], [19], [20].

Cependant, il subsiste encore à l'heure actuelle des lacunes dans la théorie (ou plutôt les théories) du retrait de dessiccation, telles que par exemple la façon dont chaque mécanisme de base est impliqué dans le processus global et la façon dont ils se combinent. Le retrait de dessiccation reste de ce fait difficile à prédire sur l'ensemble du domaine d'humidité relative.

Des résultats expérimentaux concernant le retrait de dessiccation de pâtes de ciment sont disponibles dans la littérature (se référer par exemple à [10], [12] ou [21]). Des résultats obtenus sur bétons et couvrant tout le domaine d'humidité relative sont beaucoup plus rares, notamment sur des bétons à hautes performances. Les résultats publiés concernent plutôt le retrait à long terme mesuré à une seule humidité relative [22], [23].

Dans le présent article, les résultats obtenus sur deux pâtes et deux bétons durcis, ordinaires et à très hautes performances sont analysés. Les mesures ont été réalisées sur des échantillons de faible épaisseur, âgés d'un an, au cours d'expériences de désorption de vapeur d'eau à la température $T = 23 \pm 0,1$ °C.

Comme nous l'avons dit précédemment, il existe des interactions entre autodessiccation et dessiccation *in situ*. Cependant, nous nous attachons ici à découpler les phénomènes en étudiant des matériaux suffisamment âgés pour que les processus d'hydratation soient quasiment stabilisés.

L'objectif d'une telle étude est d'obtenir, pour chaque matériau, la courbe maîtresse donnant les déformations à l'équilibre en fonction de l'humidité relative, et de mettre en évidence les similitudes ou les différences de comportement existant entre matériaux ordinaires et matériaux à très hautes performances.

Matériaux étudiés

Deux pâtes de ciment, nommées « CO » et « CH », et deux bétons, nommés « BO » et « BH », ont été étudiés. Leur formulation est donnée dans le tableau I.

Les formulations « CO » et « BO » correspondent à des matériaux ordinaires, alors que « CH » et « BH », formulations à faible rapport eau sur ciment (E/C) et contenant fumée de silice (FS) et superplastifiant, correspondent à des matériaux à très hautes performances (THP) (tableau II).

Les matériaux ont été préparés à partir de ciment CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2 HTS du Teil (LAFARGE) et, pour les formulations THP, de fumée de silice de Laudun (Gard, France) et de superplastifiant LOMAR D (1,8 % en masse) qui

TABLEAU I
Formulation des matériaux étudiés

Composant	Quantité (en kg.m ⁻³)			
	BO	BH	CO	CH
Gravillon calcaire du Boulonnais 12,5/20	777	854		
Gravillon calcaire du Boulonnais 4/12,5	415	411		
Sable du Boulonnais 0/5	372	326		
Sable de Seine 0/4	372	326		
Ciment CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2 HTS du Teil	353	421	1 502	1 757
Fumée de silice de Laudun		42,1		176
Eau	172	112	523	344
Superplastifiant LOMAR D		7,6		31,7

est un copolymère formaldéhyde naphthalène sulfonate. La composition minéralogique potentielle du ciment, calculée à partir de sa composition chimique par la formule de Bogue, est donnée dans le tableau III. Le ciment utilisé est riche en C_3S (57 %), ce qui induit de hautes résistances au jeune âge, et pauvre en C_3A (3,0 %), ce qui implique une faible demande en eau. Ce dernier point rend possible la fabrication avec une bonne ouvrabilité, malgré le faible rapport E/C des matériaux THP. Ce ciment a une finesse Blaine de $340 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. La fumée de silice, ajoutée sous forme de poudre, a une teneur en SiO_2 de 87 % et une surface spécifique BET (mesurée par adsorption d'azote) de $18 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. La composition chimique complète et les caractéristiques des différents constituants sont données dans la référence [24].

La résistance caractéristique à la compression à 28 jours du béton THP « BH » est égale à 115,5 MPa, celle du béton ordinaire « BO » étant de 49,4 MPa.

TABLEAU II
Caractéristiques des formulations
(dosages massiques)

Matériau	E/C	FS/C	Granulats/C
CO	0,34	-	-
CH	0,19	0,10	-
BO	0,48	-	5,5
BH	0,26	0,10	4,6

TABLEAU III
Composition minéralogique potentielle du ciment
utilisé, d'après la formule de Bogue

Composant	Teneur (en %)
C_3S	57
C_2S	24
C_3A	3,0
C_4AF	7,6
Gypse	4,4
Carbonates	1,8
CaO_1	0,5
$\text{Na}_2\text{O eq.}$	0,5

Procédure expérimentale

Échantillons

Cette étude expérimentale a été réalisée sur des échantillons en forme de disques (diamètre $\varnothing \approx 100 \text{ mm}$) de faible épaisseur ($L \approx 2-3 \text{ mm}$). Une telle géométrie permet d'une part, de considérer que le transfert d'humidité ayant lieu dans l'échantillon est quasi-monodimensionnel (sui-

vant l'épaisseur) et d'autre part, d'obtenir l'équilibre hydrique du matériau à une humidité relative donnée dans un temps raisonnable (plusieurs mois, fig. 1). Les disques sont obtenus par la découpe de cylindres sous eau, à la scie à diamant. Ces cylindres sont préalablement conservés 6 mois à $T = 21 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ sans échange d'eau avec l'extérieur, ceux-ci étant enveloppés de papier aluminium adhésif. Avant le démoulage à l'âge de 48 heures, la surface supérieure des cylindres était protégée des échanges hydriques grâce à un film en plastique. Une fois découpés, les disques sont conservés à $H_R \approx 100 \%$ et à $T = 21 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 6 mois jusqu'au lancement des essais de retrait.

Étant donné la longue durée des processus d'hydratation du ciment et des expériences de retrait envisagées, les expériences démarrent lorsque les échantillons sont âgés d'un an, afin d'être en mesure de considérer que l'hydratation du ciment et le retrait endogène sont négligeables au cours des essais.

Procédure

Les déformations des échantillons en fonction de l'humidité relative sont déterminées à partir de la variation de leur diamètre, au cours d'une désorption de vapeur d'eau par paliers de 10 % d'humidité relative, à la température $T = 23 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Au cours de ces expériences, les échantillons, préalablement à $H_R \approx 100 \%$, sont soumis à des ambiances caractérisées par des humidités relatives décroissantes, obtenues par différentes solutions salines saturées [24].

La mesure du diamètre des échantillons est effectuée à l'aide de comparateurs (précis au μm) disposés sur les disques au début de l'expérience et laissés en position pendant toute la durée de l'essai.

La déformation diamétrale de retrait (ϵ) d'un disque de diamètre (l) par rapport à sa valeur initiale (l_0), exprimée en 10^{-6} , est calculée par $\epsilon = (l - l_0) / l_0 \times 10^6$. Les déformations sont calculées ici en prenant comme référence la valeur du diamètre mesurée à $H_R = 90,4 \%$, pour chaque palier d'humidité relative au cours du processus de désorption jusqu'à $H_R = 12 \%$ ou $H_R = 3 \%$, selon l'avancement de l'expérience. $H_R = 90,4 \%$ apparaît en effet être une référence plus pertinente que $H_R \approx 100 \%$. Tout d'abord, à cause de l'autodessiccation, l'humidité relative interne initiale des matériaux est inférieure à 100 %, il est donc difficile d'atteindre à nouveau l'équilibre à cette humidité relative, suivant le matériau considéré, avant le démarrage de l'essai. De plus, il est très difficile d'obtenir des

résultats expérimentaux précis à $H_R \approx 100 \%$, vu l'importante influence de la température et l'apparition possible d'une condensation massive parasite.

L'évolution des déformations des échantillons est enregistrée en fonction du temps, comme illustré sur la figure 1 pour les pâtes de ciment durcies CO et CH. Chaque palier d'humidité relative se prolonge jusqu'à l'obtention de l'équilibre, indiqué par la stabilisation des déformations. L'évolution des déformations en fonction du temps montre que le séchage est un processus très lent. Pour chacun des paliers, l'équilibre n'est pas atteint avant plusieurs mois (fig. 1).

Les pertes relatives de masse d'échantillons identiques à ceux utilisés pour la mesure des déformations de retrait sont calculées à partir du suivi de la masse des échantillons au cours des expériences de désorption (fig. 2). Les pesées sont réalisées à la précision du milligramme.

Analyse des résultats expérimentaux de retrait de dessiccation

L'originalité des expériences réalisées ici réside en particulier dans la mesure de déformations correspondant à de petits créneaux d'humidité relative, sur des échantillons de faible épaisseur (quelques millimètres) et sur des matériaux que l'on peut supposer stabilisés d'un point de vue chimique. Ce dernier point indique que l'on mesure directement les déformations de retrait de dessiccation (pas d'interaction avec l'autodesiccation).

Cette démarche permet d'obtenir les déformations à l'équilibre à une humidité relative donnée, avec des cinétiques raisonnables. Elle offre aussi l'avantage de se rapprocher des conditions de déformations sans contrainte et donc des déformations intrinsèques au matériau à une humidité relative donnée. Ces déformations intrinsèques sont supérieures aux déformations mesurées sur des structures se fissurant en surface, suite à de forts gradients hydriques qui résultent des grandes dimensions de la structure ou de la grandeur du palier d'humidité relative imposé, et qui, elles, dépendent de la géométrie de la structure [5], [25].

Les résultats chiffrés des déformations de retrait de dessiccation, obtenues à l'équilibre au cours de la désorption par paliers et calculées en prenant pour référence I_0 la valeur mesurée à $H_R = 90,4 \%$, sont résumés dans le tableau IV pour les quatre formulations CO, CH, BO et BH. Les valeurs des déformations données représentent la moyenne calculée avec trois échantillons, chaque triplet d'échantillons subissant l'ensemble de la désorption par paliers.

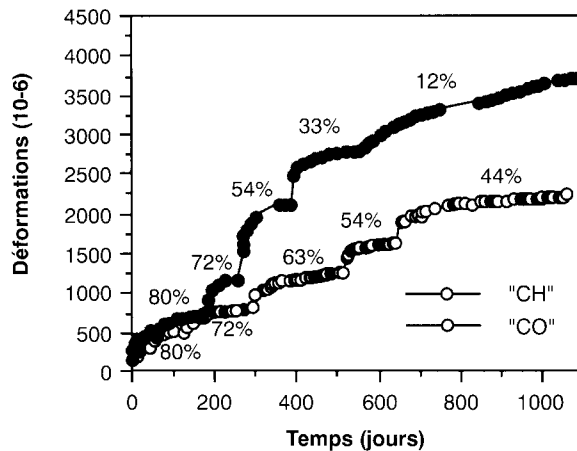


Fig. 1 - Évolution des déformations de retrait de dessiccation des pâtes de ciment durcies, en fonction du temps, à $T = 23 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, et calculées en prenant la valeur à $H_R = 90,4 \%$ comme référence.

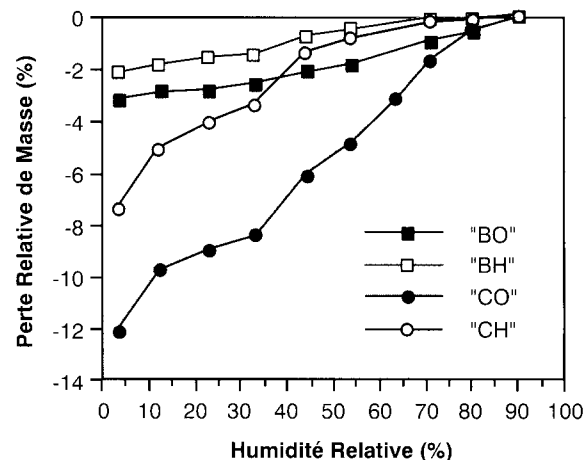


Fig. 2 - Pertes relatives de masse en fonction de l'humidité relative et à $T = 23 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, calculées en prenant la valeur à $H_R = 90,4 \%$ comme référence.

TABLEAU IV
Déformations de retrait de dessiccation des matériaux durcis, en fonction de l'humidité relative, obtenues par désorption à $T = 23 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$

H_R (%)	Déformations (en 10^6)			
	CO	CH	BO	BH
90,4	0	0	0	0
80,1	733	500	157	186
71,5	1 170	818	297	231
63,2	-	1 249	419	-
53,5	2 118	1 635	663	351
44,0	-	2 241	-	-
33,0	2 810	2 528	644	417
22,8	-	2 820	-	-
12,0	3 690	3 399	679	496
3	4 237	-	-	706

Les courbes donnant les déformations de retrait de dessiccation obtenues à l'équilibre à $T = 23 \pm 0,1$ °C, en fonction de l'humidité relative, pour les 4 formulations, sont représentées sur la figure 3 (ϵ est calculée en prenant pour référence l_0 la valeur mesurée à $H_R = 90,4$ %).

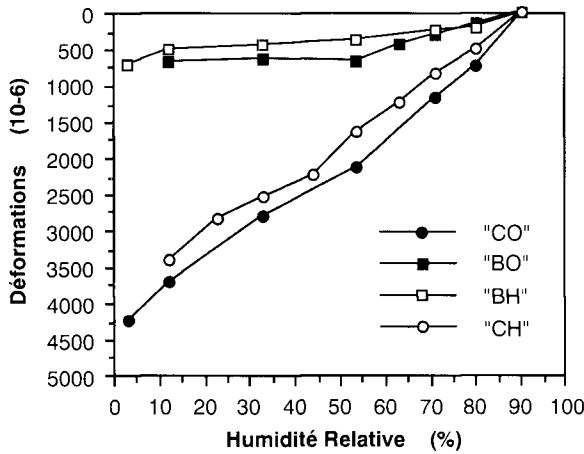


Fig. 3 - Déformations de retrait de dessiccation des matériaux durcis obtenues à l'équilibre en fonction de l'humidité relative, par désorption à $T = 23 \pm 0,1$ °C.

Les résultats expérimentaux obtenus sur la pâte de ciment durcie CO peuvent être comparés avec les résultats publiés par Ferraris et Wittmann en 1987 [10], relatifs au retrait de dessiccation mesuré à $T = 20$ °C sur une pâte de ciment âgée de 28 jours et de rapport E/C = 0,3. Les déformations longitudinales mesurées par Ferraris et Wittmann sont données dans le tableau V. Les valeurs reportées ont été lues sur les graphiques publiés.

TABLEAU V
Déformations de retrait de dessiccation, en fonction de l'humidité relative, obtenues par désorption à $T = 20$ °C, sur une pâte de ciment âgée de 28 jours et de rapport E/C = 0,3 [10]

H_R (%)	Déformations (en 10^{-6})
90,4	0
80,1	1 500
53,5	2 000
33	3 000
12	3 500

Les résultats obtenus sur la pâte de ciment durcie CO (tableau IV) et ceux de la référence [10] sont en bon accord au-dessous de $H_R = 80,1$ %. On peut supposer que les deux pâtes de ciment durcies ont une microstructure comparable. La valeur beaucoup plus élevée enregistrée par Ferraris et Wittmann à $H_R = 80,1$ % peut alors être attribuée au jeune âge de la pâte. À cette échéance, l'état d'hydratation du matériau est susceptible d'évoluer encore de façon sensible. Par conséquent, une plus grande quantité d'eau liquide (capillaire) est sans doute disponible et susceptible de s'évaporer entre $H_R = 90,4$ % et

$H_R = 80,1$ %, pour cette pâte. Les déformations de retrait correspondantes sont donc plus grandes. Dans le cas de CO, vu son âge, l'essentiel de l'hydratation a été réalisé : une plus grande quantité d'eau a été chimiquement combinée. L'autodessiccation ne portant pas ces matériaux à une H_R inférieure à 80 % même au bout de plus d'un an [1], on peut penser que ses effets seront négligeables au-dessous de cette humidité relative.

D'autre part, Feldman [21] a obtenu avec une pâte de ciment durcie âgée d'un an ($E/C = 0,50$) un retrait de dessiccation de l'ordre de $5\,500 \times 10^{-6}$ (valeur lue sur la figure publiée), entre $H_R \approx 90$ % et $H_R \approx 0$ %. Cette valeur est plus élevée que la valeur $4\,240 \times 10^{-6}$ obtenue, dans le même domaine d'humidité relative, avec la pâte de ciment durcie CO qui a un rapport E/C plus faible ($E/C = 0,34$). Ceci conduit à penser que, dans ce domaine d'humidité relative, le retrait de dessiccation augmente avec le rapport E/C. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par Hansen sur deux pâtes de ciment durcies avec $E/C = 0,40$ et $E/C = 0,60$ [12].

Il est possible également d'exprimer les déformations de retrait, mesurées à l'équilibre pour une humidité relative donnée, en fonction de la perte relative de masse obtenue à l'équilibre à cette même humidité relative. Les résultats obtenus pour les pâtes de ciment durcies CO et CH sont reportés sur la figure 4.

La figure 4 illustre bien que, pour deux pâtes différentes, la perte d'une même quantité d'eau peut générer des déformations différentes si les proportions respectives de pores « capillaires » et de pores relatifs au « gel C-S-H » impliquées dans le séchage sont différentes. On appelle ici « gel C-S-H », le « gel » microcristallisé et microporeux de silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui est le constituant essentiel de la pâte de ciment durcie.

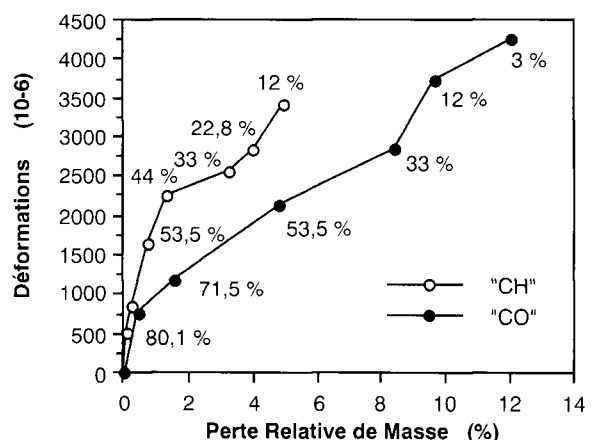


Fig. 4 - Déformations de retrait de dessiccation des pâtes de ciment durcies, en fonction des pertes relatives de masse obtenues par désorption à $T = 23 \pm 0,1$ °C.

Les courbes de retrait en fonction de la perte relative de masse sont constituées de plusieurs sections de pente différente, chacune de ces sections étant quasiment linéaire. On peut penser que ces sections correspondent à des mécanismes de retrait différents mettant en jeu des types d'eau différents :

- Dans le domaine $44\% < H_R < 80\%$ (le point expérimental à $H_R = 44\%$ existe seulement pour CH), une importante proportion du retrait global a lieu. Dans ce domaine, les tensions de la phase liquide dues aux ménisques présents dans les pores partiellement remplis d'eau génèrent une contraction de la matrice solide. On peut considérer que le retrait associé aux pertes d'eau résulte essentiellement de ces variations de dépression capillaire, les effets de la pression de disjonction étant souvent considérés comme négligeables.

La frontière de ce domaine obtenue expérimentalement à $H_R = 44\%$ peut également être mise en évidence sur les isothermes de désorption de vapeur d'eau (courbes donnant la teneur en eau à l'équilibre en fonction de l'humidité relative des matériaux) déterminées expérimentalement à partir du suivi de la masse des échantillons (fig. 5).

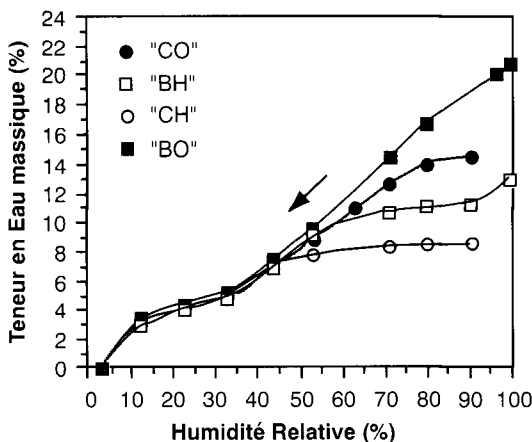


Fig. 5 - Isothermes de désorption de vapeur d'eau obtenues à $T = 23 \pm 0,1^\circ\text{C}$. La teneur en eau est exprimée par unité de masse de pâte de ciment durcie « sèche » (c'est-à-dire à $H_R \approx 3\%$) contenue dans le matériau.

- Pour $H_R \leq 44\%$, les isothermes de désorption sont identiques pour les quatre matériaux testés (fig. 5). Dans ce domaine, la structure poreuse concernée par les équilibres hydriques est donc indépendante de la formulation. Ceci signifie que les équilibres hydriques ont lieu dans la structure poreuse interne aux C-S-H. Lorsque $H_R = 44\%$, les pores tels que $r_p > 20 \text{ \AA}$ sont vidés et ne sont plus recouverts que d'un film d'eau adsorbée [24]. On peut donc supposer que dans le domaine correspondant à $H_R \leq 44\%$,

d'autres mécanismes de retrait que celui lié aux variations de dépression capillaire deviennent prépondérants. En particulier, quand l'humidité relative décroît, la quantité d'eau adsorbée diminue. L'énergie superficielle du solide va donc augmenter. Il se produit alors un retrait (dit de Gibbs-Bangham), afin de minimiser l'énergie superficielle du solide [8].

Dans le domaine $33\% < H_R < 44\%$, au vu des résultats expérimentaux, le départ d'eau de la pâte semble s'accompagner d'un retrait plus faible que lorsque $H_R > 44\%$ ou $H_R < 33\%$. Dans ce domaine, les cinétiques de désorption sont particulièrement lentes et elles correspondent à une perte d'eau importante. En effet, la distribution des tailles de pores des matériaux présente un pic pour $r_p \approx 17 \text{ \AA}$, que l'on peut attribuer aux pores internes aux amas d'hydrates et situés entre les cristallites du gel C-S-H [24], [26]. Les pores tels que $r_p \geq 17 \text{ \AA}$ sont vidés lorsque $H_R \leq 38,5\%$ [24], générant une forte perte d'eau.

Dans le domaine $33\% < H_R < 44\%$, la phase liquide est donc discontinue, y compris à l'échelle du réseau poreux des C-S-H. On considère alors classiquement que le transport en phase liquide se réduit à la migration des films d'eau adsorbée (couche multimoléculaire dont l'épaisseur est inférieure à 20 \AA [24]), le transfert de l'humidité s'effectuant majoritairement par diffusion en phase gazeuse. On peut par conséquent penser que les parts respectives du retrait par dépression capillaire et du retrait de Gibbs-Bangham sont toutes deux limitées.

Dans le domaine $12\% < H_R < 33\%$, le départ de l'eau entraîne à nouveau un fort retrait. Dans ce domaine, quasiment toute la surface spécifique des C-S-H est recouverte par une couche multimoléculaire d'eau adsorbée et contribue donc au retrait de Gibbs-Bangham qui devient de ce fait probablement très important. Par contre, le retrait généré par dépression capillaire peut être considéré comme négligeable.

- Le changement de pente intervenant aux environs de $H_R = 12\%$ peut s'interpréter de la manière suivante : lorsque l'on désorbe de l'eau au dessous d' $H_R = 12\%$, on enlève la couche monomoléculaire adsorbée. Une importante quantité d'eau est désorbée entre $H_R = 12\%$ et $H_R = 3\%$, correspondant aux espaces interfoliaires liés à la structure des C-S-H. On enlève donc de l'eau fortement liée au solide, participant même certainement à la constitution des hydrates (ettringite ou C-S-H, qui sont instables au-dessous de $H_R = 12\%$). Cette déshydratation implique que des processus chimiques sont susceptibles d'intervenir en plus des mécanismes physiques. Les déformations du matériau sont donc naturellement modifiées.

Au total, on constate que des valeurs de retrait de dessiccation non négligeables sont enregistrées sur toute la gamme d' H_R pour les pâtes de ciment durcies. En particulier, des déformations importantes se manifestent pour $H_R \leq 40\%$, que l'on peut logiquement attribuer au retrait de Gibbs-Bangham. Certes, le domaine le plus important d'un point de vue pratique correspond à $H_R > 40\%$, voire même à $H_R \geq 50\%$. Ainsi, au niveau de la modélisation du retrait de dessiccation et donc de sa prédiction, il est prioritaire de travailler dans ce domaine et il apparaît judicieux de considérer le mécanisme des variations de dépression capillaire comme prépondérant. Cependant, si l'on souhaite mettre en œuvre un modèle utilisable sur toute la gamme d'humidité relative, sachant en particulier que le domaine $H_R \leq 50\%$ peut concerner un certain nombre de régions du globe, au moins de façon saisonnière, il serait donc souhaitable de pouvoir introduire également dans le modèle le mécanisme de variation de l'énergie superficielle du solide. La seule prise en compte du mécanisme des variations de dépression capillaire peut en effet engendrer des divergences entre résultats expérimentaux et simulations numériques lorsque l'humidité relative décroît au-dessous de 50% .

On retiendra toutefois que, pour ce qui concerne les bétons, et est donc directement applicable aux ouvrages, quasiment aucune évolution des déformations n'est enregistrée dans le domaine $H_R \leq 50\%$, comme on l'indiquera plus loin.

Comparaison entre matériaux ordinaires et THP

Les résultats expérimentaux obtenus fournissent des données intéressantes sur les matériaux THP. La figure 3 met en évidence que le retrait de dessiccation des matériaux à très hautes performances contenant des fumées de silice est plus faible que celui des matériaux ordinaires à une même humidité relative. Les déformations des matériaux THP représentent environ 70% de celles des matériaux ordinaires, quand la référence est prise à $H_R = 90,4\%$. Les formulations THP présentent donc l'avantage d'avoir un retrait de dessiccation plus faible que les formulations ordinaires dans le domaine d'humidité relative considéré.

Cependant, cette constatation résulte d'un comportement différent limité au domaine des hautes humidités relatives. Ceci est cohérent avec le fait que les matériaux THP (CH et BH) ont une porosité « capillaire » et donc une quantité d'eau initiale dans ces pores susceptible de générer du retrait en s'évaporant, beaucoup plus faible que celles des matériaux CO et BO [3].

Si les déformations sont calculées en prenant comme référence le diamètre des échantillons à $H_R = 12\%$, on s'aperçoit, par exemple pour les pâtes de ciment durcies CO et CH, que les courbes donnant le retrait de dessiccation en fonction de l'humidité relative sont quasiment confondues, au moins pour $H_R \leq 80,1\%$ (fig. 6). Lorsque l'humidité relative descend au-dessous de 76% , les pores tels que $r_p \geq 50 \text{ \AA}$ sont vidés. Ceci signifie que c'est la porosité relative aux C-S-H, interne mais également externe, qui est alors impliquée dans les déformations, cette dernière résultant de l'agencement des amas d'hydrates C-S-H. Or, les pâtes de ciment durcies CO et CH contiennent des quantités équivalentes de C-S-H. Plus précisément, elles ont une surface spécifique BET, mesurée par adsorption d'eau, équivalente ([24], [26]), ce qui indique au passage que ce paramètre peut être directement lié aux déformations mesurées. Il est donc fondé que, dans ce domaine, les déformations des deux matériaux soient équivalentes.

Les figures 3 et 6 indiquent qu'il existe un domaine où la relation entre retrait de dessiccation et humidité relative est quasiment linéaire. Plus précisément, il apparaît en figure 6 que pour les deux pâtes de ciment durcies, la relation est linéaire à partir d' $H_R = 100\%$ et au moins jusqu'à $H_R = 53,5\%$. Une telle relation linéaire entre déformations de retrait et humidité relative a également été mise en évidence dans le cas du retrait d'autodessiccation avec les mêmes matériaux [1]. Ces informations sont très importantes pour la modélisation du retrait de dessiccation des bétons.

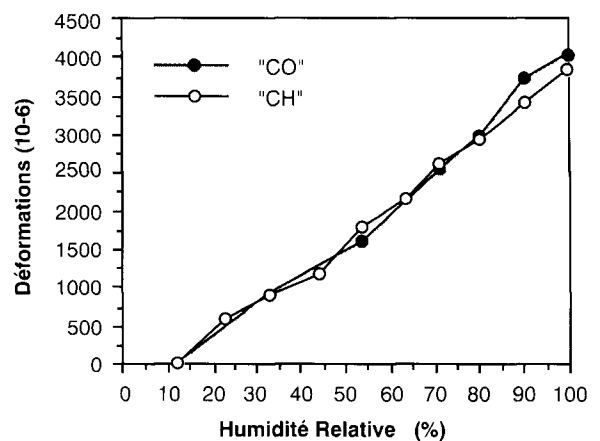


Fig. 6 - Déformations de retrait de dessiccation en fonction de l'humidité relative, obtenues par désorption à $T = 23 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, sur les pâtes de ciment durcies « CO » et « CH », et calculées en prenant comme référence le diamètre à $H_R = 12\%$.

Comparaison des résultats obtenus sur pâtes et sur bétons

Les déformations enregistrées sur les bétons « BO » et « BH » représentent environ 25% de celles des pâtes correspondantes « CO » et « CH ».

Dans un béton, les déformations de retrait de la pâte sont gênées par la présence de composants inertes tels que les granulats. Il est donc correct que les déformations des bétons soient inférieures à celles des pâtes de ciment durcies correspondantes (fig. 3).

Cependant, dans les bétons, un état de contrainte complexe est engendré. Ceci implique qu'il est difficile d'obtenir une relation directe entre la déformation d'un béton et celle de la pâte de ciment durcie correspondante. Le volume de pâte est un paramètre prépondérant, mais ce n'est pas le seul qui intervienne.

Les déformations mesurées sur bétons semblent se stabiliser pour $H_R \leq 53,5 \%$. Cependant, il est difficile, avec la précision des comparateurs utilisés, d'obtenir une bonne précision dans ce domaine, vu les faibles déformations enregistrées pour les bétons.

Conclusions

Les expériences décrites dans cet article ont permis d'obtenir les courbes maîtresses donnant les déformations de retrait de dessiccation à

l'équilibre en fonction de l'humidité relative pour deux pâtes de ciment et deux bétons durcis.

L'originalité des expériences réalisées réside en particulier dans la mesure de déformations correspondant à de petits créneaux d'humidité relative, sur des échantillons de faible épaisseur et sur des matériaux que l'on peut supposer stabilisés d'un point de vue chimique.

Les cinétiques d'obtention des valeurs d'équilibre illustrent une fois encore la lenteur des processus de séchage dans les matériaux à base de ciment.

L'analyse des courbes donnant les déformations en fonction de la perte relative de masse des échantillons a mis en évidence comment chacun des mécanismes de retrait intervenait en fonction de la structure poreuse du matériau et des transferts hydriques mis en jeu.

La comparaison entre matériaux ordinaires et à très hautes performances illustre le plus faible retrait de dessiccation des matériaux THP dans le domaine des fortes humidités relatives.

Les résultats expérimentaux et les propriétés obtenues ici fournissent des données intéressantes sur les matériaux THP et pourront être utiles à la modélisation du retrait de dessiccation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BAROGHEL BOUNY V. (1997), *Experimental investigation of self-desiccation in high-performance materials - Comparison with drying behaviour*, Proceedings of the International Research Seminar Self-desiccation and its importance in Concrete Technology, June 10th, Lund, Sweden (edited by B. Persson & G. Fagerlund, Lund), pp. 72-87.
- [2] MAMILLAN M. (1973), Répartition de la teneur en eau dans le béton durci, *Annales de l'ITBTP*, **309-310**, pp. 30-34.
- [3] BAROGHEL BOUNY V., GODIN J., GAWSEWITCH J. (1996), *Microstructure and moisture properties of high-performance concrete*, Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete BHP96, Paris (France), May 29th-31st, **vol. 2**, pp. 451-461, Laboratoire central des Ponts et Chaussées et Presses de l'ENPC, Paris.
- [4] ACKER P. (1991), *Retraits et fissurations du béton : causes, mécanismes, modèles*, AFPC, Paris.
- [5] ROSSI P., ACKER P. (1988), A new approach to the basic creep and relaxation of concrete, *Cem. and Conc. Research*, **vol. 18**, pp. 799-803.
- [6] POWERS T.C. (1965), *Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste*, Proceedings of the International Symposium of the Structure of Concrete and its behaviour under load, London, pp. 319-344, Cement and Concrete Association, London.
- [7] POWERS T.C. (1968), The thermodynamics of volume change and creep, *Materials and structures*, vol. 1, **6**, pp. 487-507.
- [8] WITTMANN F.H. (1973), Interaction of hardened cement paste and water, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 56, **8**, pp. 409-415.
- [9] BAZANT Z.P. (1972), Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement paste and concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 2, **1**, pp. 1-16.
- [10] FERRARIS C.F., WITTMANN F.H. (1987), Retrait de la pâte de ciment durcie, *Chantiers*, **4**, pp. 289-292.
- [11] FELDMAN R.F., SEREDA P.J. (1968), A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties, *Materials and structures*, vol. 1, **6**, pp. 509-520.

- [12] HANSEN W. (1987), Drying shrinkage mechanisms in Portland cement paste, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 70, 5, pp. 323-328.
- [13] BAZANT Z.P., KIM J.K. (1991), Consequences of diffusion theory for shrinkage of concrete, *Materials and structures*, 24, pp. 323-326.
- [14] ALMUDAIHEEM J.A. (1992), An improved model to predict the ultimate drying shrinkage of concrete, *Magazine of concrete research*, vol. 44, 159, pp. 81-85.
- [15] HAN M.Y., LYTTON R.L. (1995), Theoretical prediction of drying shrinkage of concrete, *J. of materials in civil engineering*, vol. 7, 4, pp. 204-207.
- [16] LASSABATERE T. (1994), *Couplages hydro-mécaniques en milieu poreux non saturé avec changement de phase : application au retrait de dessiccation*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, oct., 215 pages.
- [17] GRANGER L., TORRENTI J.-M., ACKER P. (1997), Thoughts about drying shrinkage : scale effects and modelling, *Materials and structures*, 30, pp. 96-105.
- [18] BENTZ D.P., QUENARD D., BAROGHEL BOUNY V., GARBOCZI E.J., JENNINGS H.M. (1995), Modelling drying shrinkage of cement paste and mortar. Part 1 : Structural models from nanometers to millimeters, *Materials and Structures*, 28, pp. 450-458.
- [19] XI Y., JENNINGS H.M. (1997), Shrinkage of cement paste and concrete modelled by a multi-scale effective homogeneous theory, *Materials and structures*, vol. 30, pp. 329-339.
- [20] SHIMOMURA T., MAEKAWA K. (1997), Analysis of the drying shrinkage behaviour of concrete using a micromechanical model based on the micropore structure of concrete, *Magazine of Concrete Research*, vol. 49, 181, pp. 303-322.
- [21] FELDMAN R.F. (1968), *Sorption and length-change scanning isotherms of methanol and water on hydrated Portland cement*, Proceedings of the 5th International Congress on the Chemistry of Cement, Tokyo (Japan), Session III.1 : Structures and physical properties of cement paste, 3, pp. 53-66, Cement Association of Japan, Tokyo.
- [22] LE ROY R., DE LARRARD F. (1993), *Creep and shrinkage of high-performance concrete : the LCPC experience*, Proceedings of the 5th Int. RILEM Symposium in Barcelona, RILEM 93 (E. & F.N. SPON, London) pp. 500-508.
- [23] PERSSON B. (1997), *Long-term shrinkage of high-performance concrete*, Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, June 2-6, Göteborg, Sweden, vol. 2, Cement hydration (Edited by H. Justnes).
- [24] BAROGHEL BOUNY V. (1994), *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons - Méthodes, analyse, interprétations*, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, 468 pages.
- [25] WITTMANN F.H. (1985), *Water and mechanical properties of concrete*, Séminaire *Le béton et l'eau*, Saint-Rémy-Lès-Chevreuse, France, 19 pages.
- [26] BAROGHEL BOUNY V., CHAUSSADENT T. (1995), Pore structure and moisture properties of cement-based systems from water vapour sorption isotherms, Proceedings of MRS 1994 Fall Meeting, Boston, *Materials Research Society*, vol. 370, pp. 245-254.

ABSTRACT

A new experimental approach to drying shrinkage in ordinary and very high performance paste and hardened concrete

V. BAROGHEL BOUNY - J. GODIN

This paper presents an experimental study of drying shrinkage in samples of concrete paste and thin one year old hardened concrete. Tests were conducted on an ordinary cement paste and an ordinary concrete with a water-to-cement ratio of 0.34 in the first case and 0.48 in the second, and a very high performance cement paste and a very high performance concrete containing 10% of silica fume with a water-to-cement ratio of 0.19 in the first case and 0.26 in the second. The deformations under equilibrium with the environment were determined under varying relative humidity by water vapour desorption in stages at $T = 23 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. The results indicate that drying shrinkage is lower in the case of very high performance materials. A linear relationship between relative humidity and measured deformations was also revealed.