

# Effet du séchage sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires

R. BUCHER, T. VIDAL, A. SELLIER, J. VERDIER

Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions); 135, avenue de Ranguelil; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France  
[bucher@insa-toulouse.fr](mailto:bucher@insa-toulouse.fr), [vidal@insa-toulouse.fr](mailto:vidal@insa-toulouse.fr), [alain.sellier@insa-toulouse.fr](mailto:alain.sellier@insa-toulouse.fr),  
[verdiere@insa-toulouse.fr](mailto:verdiere@insa-toulouse.fr),

## Résumé :

*Le projet ANR MOSAIC (Mesoscopic Scale durability Investigations for Concrete) a pour objectif d'améliorer la connaissance des mécanismes à l'échelle fine de phénomènes de dégradation des matériaux cimentaires et leur conséquences à l'échelle macroscopique, en terme de comportement mécanique, de fissuration et donc de durabilité. Dans le cadre de projet, une des pathologies étudiées était le séchage et la microfissuration induite à différentes échelles. A l'échelle du matériau, le retrait de la pâte peut être gêné par l'inclusion granulaire plus rigide et entraîner un premier type de microfissuration qui s'initie à l'interface entre les deux phases. Une deuxième microfissuration structurale peut également se produire du fait des gradients de déformations de retrait entre le cœur et la surface du matériau. Un vaste programme expérimental a été établi avec pour ambition d'étudier les effets du séchage et de la microfissuration inhérente sur les propriétés mécaniques des matériaux à base cimentaires. Les matériaux étudiés sont la pâte de ciment, le mortier et le béton afin d'analyser le rôle des inclusions granulaires. Quatre conditions thermo-hydriques sont appliquées, à savoir par ordre de sévérité de séchage, 20°C-76%HR, 20°C-50%HR, 40°C-50% et 40°C-23%HR. Pour chaque matériau et chaque condition de séchage, les retraits et les pertes de masses sont enregistrés jusqu'à obtention d'un état proche de l'équilibre hydrique. L'effet du séchage et du degré de saturation sur les propriétés mécaniques est estimé à travers une campagne d'essais de résistance en compression, module de Young, résistance en traction par fendage, résistance en traction par flexion trois points et flexion quatre points menés sur l'ensemble des échantillons ayant subi les conditions thermo-hydriques de conservation. Différentes géométries ont été testées, échantillons épais classiquement utilisés par les normes mais aussi éléments fins afin de limiter la microfissuration structurale et de se focaliser sur l'effet de celle due au retrait de la pâte gênée par les inclusions granulaires. Les résultats obtenus ne montrent pas d'influence significative du degré de saturation sur la résistance en compression dès lors que le séchage se fait de façon assez homogène, par contre sur éléments épais, une microfissuration structurale de retrait entraîne une diminution de cette résistance pour la condition de séchage la plus sévère. Les modules d'élasticité diminuent avec le degré de saturation, démontrant la contribution de l'eau sur la compressibilité des matériaux. Les résistances en traction quant à elles, augmentent avec le séchage grâce à l'action de précontrainte due aux tensions capillaires. L'analyse comparative des résistances à la traction par flexion, de flexion 3 points et 4 points, montre que l'effet d'échelle probabiliste subsiste indépendamment du degré de saturation.*

## Abstract :

*The aim of the ANR MOSAIC project (Mesoscopic Scale durability Investigations for Concrete) is to improve the knowledge of the degradation mechanisms of cementitious materials at a fine scale and*

*their consequences at macroscale in terms of mechanical behaviour, microcracking and thus durability. In this project, one of the studied pathology is the desiccation and the microcracking at different scales. At the material scale, the paste shrinkage can be restrained by the more rigid granular inclusion and can lead to a first microcracking at the interface between the two phases. A second microcracking can develop due to shrinkage deformation gradients between the heart and the surface of the material. An experimental program has been set up for the purpose of studying the effects of desiccation and the induced microcracking on mechanical properties of cementitious materials. The materials are the cement paste, the mortar and a concrete in order to study the effect of the aggregate.*

*Four thermo-hydric conditions are applied by order of severity: 20°C-76%HR, 20°C-50%HR, 40°C-50% et 40°C-23%HR. For each material and each condition, shrinkage and mass losses are recorded until a state close to hydric equilibrium. The effects of desiccation and of the saturation degree on mechanical properties are assessed through a tests campaign characterizing compressive strength, Young's modulus, and tensile strength by 3-points and 4-points bending, performed after thermo-hydric storage. Various geometries of samples have been tested: thick samples usually used according to the norms and thin samples to limit the structural microcracking and to focus on those due to paste shrinkage restrained by the aggregates. The results do not show any influence of the saturation degree on the compressive strength. On thick samples, a shrinkage structural microcracking induces a reduction of the resistance in case of the most severe desiccation condition. The Young's moduli decrease with the saturation degree revealing the contribution of water to material compressibility. The bending tensile strength is improved with the saturation degree decrease thanks to a prestressing action of capillary tensions. The analysis of tensile strengths by 3-points and 4-points bending shows that the statistical size effect remains independent of the saturation degree.*

**Mots clefs : séchage, compression, module de Young, traction par flexion, retrait, effet d'échelle**

## **1 Introduction**

L'action du LMDC de Toulouse au sein du projet ANR MOSAIC concerne l'étude la fissuration du béton induite par le retrait de la pâte de ciment empêché par le squelette granulaire et de son effet sur les propriétés macroscopique mécanique et de transfert. Cet état de fissuration correspond également à celui qui serait engendré par un gonflement des granulats. Il se veut par conséquent représentatif de l'ensemble de phénomènes physico-chimique conduisant à une déformation différentielle granulat-pâte : retrait bien sûr, mais aussi dilatations thermiques différentielles [1], réaction alcali-granulats [2], décalcification de la pâte [3].

Le retrait de la pâte, tout comme le gonflement des granulats, modifie les propriétés de transfert via le réseau de fissuration. Il modifie également les propriétés mécaniques qui gèrent la propagation des macro-fissures [4]. Les macros-fissures deviennent alors les chemins préférentiels des agressions chimiques. Le but de cette étude est de comprendre l'origine et l'impact de l'état de fissuration à l'issue du retrait de séchage, en termes de propriétés de transfert sans macro-fissures, mais aussi en termes de propriétés mécaniques contrôlant l'apparition ultérieure de macro-fissures (résistance à la traction, module d'élasticité). En outre, en appliquant différentes conditions de séchage, l'influence de la microfissuration de séchage du degré de saturation, ainsi que leur lien avec l'effet d'échelle probabiliste seront étudiés.

Nous présentons dans cette communication une partie des résultats du programme d'essais mécaniques sur mortier et béton constitués des mêmes matériaux et même rapport E/C. Quatre conditions de séchage ont été appliquées, 20°C-76%HR, 20°C-50%HR, 40°C-50%HR et 40°C-23%HR. La température de 40°C a été choisie pour accélérer les cinétiques de séchage, atteindre un

degré de saturation plus faible qu'à 20°C pour une même hygrométrie, tout en évitant d'endommager thermiquement les matériaux, ce qui semblerait intervenir à partir de 50°C d'après [5]. La condition de référence est l'état endogène. Les pertes de masses et retraits, endogène et en dessiccation, sont enregistrés et les degrés de saturation estimés après séchage. A l'issue de chaque condition de séchage, les essais mécaniques sont réalisés, à savoir les mesures de résistances en compression, de modules de Young, et de résistances à la traction par flexion, sur des éprouvettes de béton et mortier ayant subi les différentes conditions de séchage. Pour les essais en compression, résistance et module de Young, des cylindres pleins et creux sont notamment testés afin d'étudier vérifier l'effet structural du gradient de retrait et l'influence de la microfissuration de surface induite. Deux types d'essais de flexion sont réalisés, flexion 3 point et 4 points, sur prismes en béton uniquement et de faible largeur afin de s'affranchir de la microfissuration structurale et se focaliser sur l'influence du degré de saturation et de la microfissuration à l'interface pâte-granulat. L'analyse des résistances à la traction par flexion de ces deux configurations est menée afin d'étudier l'effet d'échelle probabiliste et son lien avec le degré de saturation.

## 2. Descriptif du programme expérimental et des essais

### 2.1. Matériaux

Un seul ciment CEM II/A-LL 42.5R contenant 6 % de filler calcaire et respectant les critères de la norme européenne EN 197-1 [6] a été utilisé pour le mortier et le béton. Le choix des granulats s'est porté sur ceux de nature calcaire (carrière du Boulonnais) pour accroître le contraste de modules entre la pâte et les inclusions granulaires. Deux coupures granulaires ont été utilisées durant ce projet, un sable de 0-4mm et un gravier 4-12mm. Le rapport E/C a été figé pour les deux matériaux, afin que la composition de la pâte soit identique. La valeur élevée de 0,57 de ce même rapport a été définie afin d'obtenir des matériaux avec une porosité développée qui subiront un séchage conséquent en terme d'amplitude et de cinétique, entraînant ainsi une microfissuration susceptible d'être suffisamment importante pour impacter les propriétés mécaniques et de transfert. Avec un tel rapport E/C, les formulations nécessitent l'utilisation d'un agent viscosant. La quantité de viscosant est calculée en pourcentage par rapport à la masse de ciment. Elle a été adaptée à chaque matériau pour obtenir une consistance correcte et limiter la ségrégation et le ressuage. La formulation du mortier a été établie à partir de celle du béton en retirant la quantité de gravier. La formulation ne faisant plus 1m<sup>3</sup>, la quantité de l'ensemble des matériaux restant (ciment, sable, eau) a été augmentée de manière proportionnelle pour pouvoir atteindre 1m<sup>3</sup>.

Les proportions des différentes formules sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Composition des matériaux d'étude

Matériaux	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier (kg/m <sup>3</sup> )	Eau efficace (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosant (%)	E/C	Air (%)	Etalement (cm)
Béton	350	858	945	201	0,8	0,57	1,9	17
Mortier	545	1336	-	313	1,0	0,57	-	-

Pour le matériau béton, le coulage dans les coffrages est réalisé sans vibration, par simple piquage (2 couches, 20 coups par couche). Pour certains coffrages étroits, une vibration supplémentaire peut être appliquée en posant une aiguille vibrante sur les bords du moule. Le matériau mortier était, lui, suffisamment fluide pour se mettre en place sous son propre poids, sans ségrégation visible.

## 2.2 Caractérisation des matériaux avant la mise en condition de séchage

Avant la mise en séchage, les porosités accessibles à l'eau ont été évaluées selon la norme française NF P18-459 [7], notamment afin de déterminer le degré de saturation des matériaux à l'issue des différentes conditions de séchage. Les tests ont été réalisés après la période de cure de 28 jours sur trois échantillons issus de la même gâchée.

## 2.3 Conditions de conservation

### 2.3.1 Pendant la cure

Après démoulage 24h après leur coulage, les éprouvettes sont conservées en condition endogène. Pour cela, chaque éprouvette est entourée de deux couches de film plastique et d'une couche de scotch et placée dans une salle à 20°C.

### 2.3.2 Conditions de séchage

Les quatre conditions de séchage étudiées sont les suivantes : 20°C-76%HR ; 20°C-50%HR ; 40°C-50%HR et 40°C-23%HR. La Figure 1 illustre les différents dispositifs utilisés en fonction de la condition de séchage. La température modérée de 40°C a été choisie afin d'augmenter les cinétiques de séchage pour atteindre plus rapidement l'équilibre hydrique tout en limitant l'endommagement dû aux dilatations différentielles entre la pâte et les granulats. La condition 20°C-76%HR est obtenue dans une boîte à gant dans laquelle était placé un bac de solution saline saturée (NaCl) installé dans une salle climatisée. La condition 20°C-50%HR est obtenue dans une salle climatisée et celles à 40°C-50%HR et 40°C-23%HR dans une enceinte climatique de 1m<sup>3</sup>.

## 2.4 Etude des retraits et des évolutions de la perte de masse

Pour chaque condition de séchage, des mesures de retrait et de pertes de masse ont été relevées. L'étude de l'évolution de la perte d'eau permettra d'identifier la phase de stabilisation de masse qui traduit que l'équilibre hydrique est proche ou atteint, ce qui permettra de définir la fin de la mise en séchage.

### 2.4.1 Retraits

Le retrait endogène est suivi dès démoulage 24h après coulage sur trois corps d'épreuve. Il est mesuré sur des éprouvettes cylindriques  $h=22\text{cm}$  et  $\phi=11\text{cm}$ . Pour éviter toute dessiccation pendant la mesure du retrait endogène, les éprouvettes sont recouvertes de deux couches de papier aluminium adhésif et sont pesées régulièrement afin de s'assurer de l'absence de séchage parasite. La mesure de l'évolution de la longueur relative de l'échantillon est réalisée à l'aide d'un rétractomètre adapté à la géométrie de l'échantillon.

Le retrait en dessiccation est suivi après la cure endogène de 28 jours minimum, pour chaque condition de séchage, sur trois échantillons de faible épaisseur afin d'atteindre plus rapidement l'équilibre hydrique : disques cylindriques de  $3 \pm 0,2\text{cm}$  d'épaisseur pour le béton et de  $1 \pm 0,2\text{cm}$  d'épaisseur pour le mortier. Ces échantillons correspondent à des disques sciés issus d'une éprouvette cylindrique de dimensions  $\phi=11\text{cm}$ ,  $h=22\text{cm}$ . La surface périphérique est recouverte par deux couches de papier aluminium adhésif pour que le séchage se fasse dans une seule direction. Le retrait est mesuré à l'aide d'un même type de jauge de déformation à support métallique résistant à la

température et à la remontée d'eau, de 90mm de longueur. Pour chaque échantillon, deux jauges sont collées sur les deux faces libres de sécher, l'épaisseur des échantillons ne permettant pas le collage de jauges sur la circonférence. Les jauges sont ensuite reliées à un dispositif permettant de relever les mesures de déformations (Figure 1).



Figure 1. Illustration d'une jauge d'extensométrie collée sur un échantillon (a) et dispositif de suivi des mesures de déformations (b)

## 2.4.2 Pertes de masse

Les pertes de masses ont été suivies afin de corréliser ces évolutions avec celles du retrait en dessiccation et de connaître le degré de saturation des matériaux, notamment vis-à-vis de l'analyse des propriétés mécaniques. Pour chaque matériau, les masses de trois échantillons de mêmes dimensions que celles de retrait sont relevées : 3 disques cylindriques de  $3 \pm 0,2$ cm d'épaisseur pour les bétons et 3 disques cylindriques de  $1 \pm 0,2$ cm d'épaisseur pour la pâte et le mortier. Les échantillons proviennent d'une éprouvette cylindrique de dimensions  $\phi=11$ cm,  $h=22$ cm. Comme pour le retrait, la surface périphérique est recouverte par deux couches de papier aluminium adhésif afin que le séchage se fasse suivant une seule direction. Outre ces échantillons fins, des suivis de masse ont été effectués sur les corps d'épreuves destinés aux essais mécaniques, cylindres pleins ( $h=22$ cm et  $\phi=11$ cm), des cylindres creux ( $h=22$ cm,  $\phi_{ext}=11$ cm, épaisseur radiale 2,5cm) et des prismes ( $h=10$ cm,  $l=3$ cm et  $L=50$ cm). Dans le cas des cylindres, les surfaces supérieures et inférieures ont été protégées par du papier aluminium pour privilégier le séchage unidirectionnel radial.

## 2.5 Propriétés mécaniques

La campagne d'essais mécaniques doit apporter plusieurs éléments de compréhension sur l'impact du séchage sur le comportement mécanique. L'analyse des données permet d'identifier les effets du degré de saturation, des tensions capillaires et de la microfissuration pâte-granulat dû au retrait de la pâte empêché par le granulat en fonction de la sévérité du séchage appliqué. L'étude pour plusieurs dimensions d'éprouvettes plus ou moins épaisses doit renseigner sur l'effet structural du séchage induit par le gradient de déformation de retrait.

### 2.5.1 Comportement en compression

Les résistances à la compression et les modules d'élasticité du béton et mortier ont été déterminés sur des cylindres pleins de 11cm de diamètre et de 22cm de hauteur mais aussi sur des cylindres creux de mêmes dimensions mais présentant une réservation en leur centre. Cette géométrie creuse de 2,5cm d'épaisseur permet de réduire le temps de séchage et d'atteindre plus rapidement l'équilibre hydrique, mais également de limiter la microfissuration structurale induite par le retrait empêché dû au gradient

hydrique dans le sens radial. La valeur de 2,5cm correspond à environ le double du diamètre du plus gros granulats de manière à éviter la création d'un chemin préférentiel de diffusion de l'eau via les interfaces pâte-granat. Une confrontation entre les résultats sur éprouvettes pleines et creuses permettra d'estimer l'effet de la microfissuration structurale due au gradient de déformation de retrait sur les propriétés mécaniques en compression.

Les cylindres pleins sont classiquement confectionnés dans des moules cylindriques aux dimensions voulues  $\phi=11\text{cm}$ ,  $h=22\text{cm}$ . Une illustration des cylindres creux est présentée sur la Figure 2.

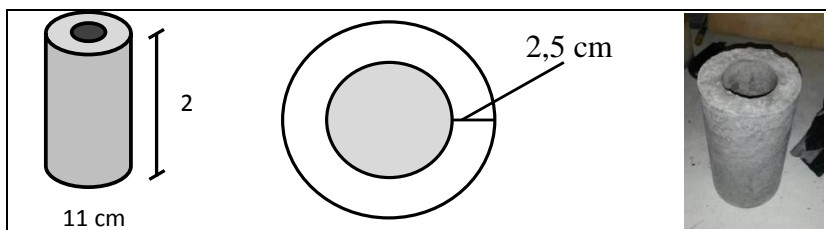


Figure 2. Schémas et photo du cylindre creux après démoulage

Pour confectionner cette géométrie particulière creuse, un cylindre en PVC est fixé dans le fond d'un moule en carton (Figure 3a) avant le coulage. Une cale est ensuite disposée, après le coulage, sur le haut du moule afin de centrer le cylindre sur toute sa hauteur (Figure 3b).



Figure 3. Cylindre PVC fixé centré au fond du moule en carton (a) et cale assurant le centrage du cylindre (b)

Les essais en compression ont été menés selon la norme NF EN 12390-3 [8] sur quatre éprouvettes préalablement rectifiées. Une vitesse de 0.5MPa/s est appliquée. Les éprouvettes testées ont subi les quatre conditions de séchage différentes, ainsi que la condition endogène de référence. Les faces supérieure et inférieure sont recouvertes par du papier aluminium adhésif pour que le séchage se fasse de manière radiale. Les modules de Young ont été déterminés à partir d'essais en compression réalisés sur 3 éprouvettes, selon les recommandations RILEM [9]. L'acquisition des mesures de déformations longitudinales est réalisée par l'intermédiaire d'une cage d'extensométrie J2P pour les éprouvettes cylindriques de mortiers et de béton, qu'elles soient pleines ou creuses. Cette cage est constituée de 3 capteurs LVDT espacés angulairement de 120°, et positionnés selon l'axe de chargement, hors zone de fretage.

## 2.5.2 Comportement en flexion du béton

Des essais de flexion ont été réalisés uniquement sur matériau béton afin d'évaluer l'effet du séchage sur le comportement en flexion, résistance à la traction et plus particulièrement l'énergie de fissuration, sur 3 échantillons pour chaque condition de conservation : endogène, 20°C-76%HR ; 20°C-50%HR ; 40°C-50%HR et 40°C-23%HR. Les deux configurations d'essais, flexion 3 points et 4



points, comme représenté sur la Figure 4, sont étudiées.

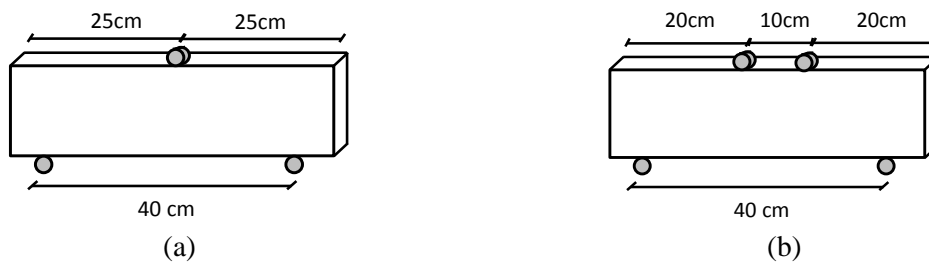


Figure 4. Configuration de l'essai de flexion 3 points (a) et 4 points (b)

Les zones soumises à la contrainte de traction maximale étant très différentes dans les deux configurations, fibre inférieure de la seule section transversale située à mi-travée en flexion 3 points et fibre inférieure de la zone située entre points d'application des forces en flexion 4 points, l'effet d'échelle probabiliste [10] sur l'apparition de la fissuration de flexion pourra être analysé et son lien avec la microfissuration de séchage et le degré de fissuration étudié.

Les éprouvettes testées sont des prismes de dimensions  $h=10\text{cm}$ ,  $L=50\text{cm}$ ,  $l=3\text{cm}$ . Le choix de cette faible épaisseur de 3cm a également été appliqué afin de concentrer l'étude sur la microfissuration due aux déformations différentielles pâte-granulat et non celle due au retrait différentiel structural. En outre, elle est sensiblement équivalente à celle des cylindres creux. Pour confectionner ces éprouvettes, des coffrages de dimensions classiques  $10\times 10\times 50\text{cm}$ , identiques à ceux nécessaires pour les éprouvettes de l'essai d'énergie de fissuration ou de l'essai tirant (Figure 5a), ont été utilisés. Deux séparateurs métalliques de  $0,5\times 10\times 50\text{cm}$  sont installés pour pouvoir confectionner trois éprouvettes dans un seul de ces moules (Figure 5b), plutôt que de débiter les échantillons à partir d'une éprouvette épaisse, ce qui viendrait réhumidifier le matériau. Afin de maintenir ces séparateurs, deux cales sont positionnées de part et d'autre du moule (Figure 5c). Une fois le dispositif installé (Figure 5d) et le béton coulé (Figure 5e), les échantillons sont décoffrés 24h plus tard (Figure 5f), avec une attention particulière pour éviter de les casser.

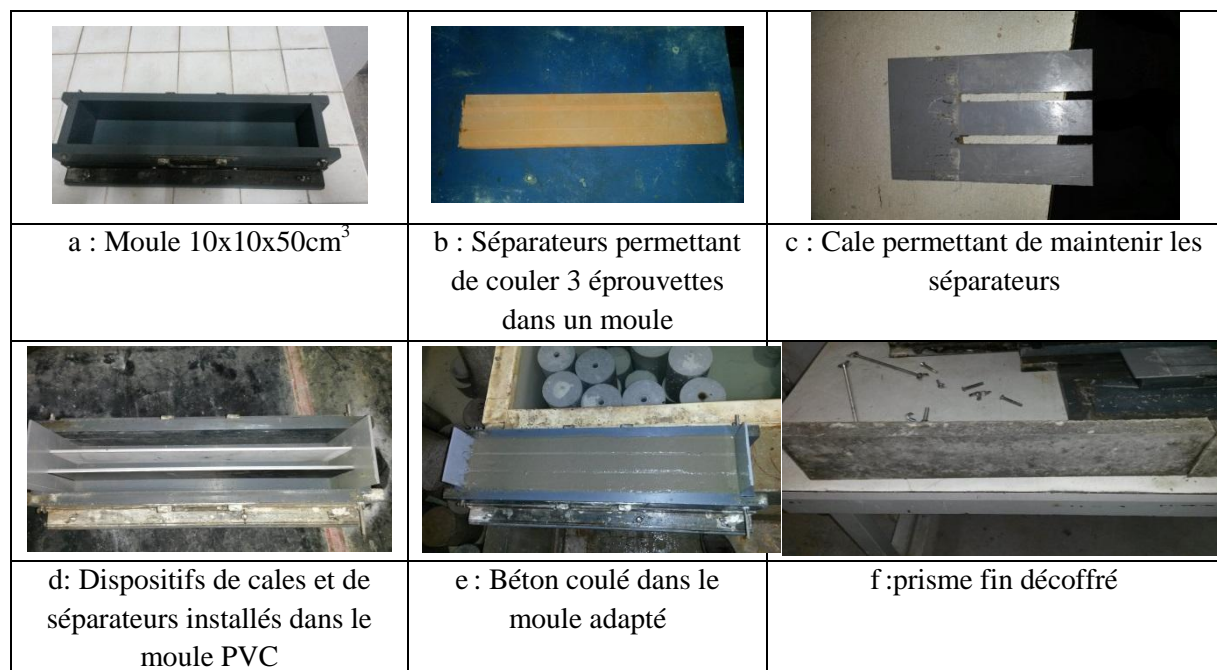


Figure 5. Dispositif de conception des prismes fins

Ces essais ont été réalisés sur une presse de capacité 100kN utilisé avec un capteur de force de 10kN, asservie en déplacement de la flèche à l'aide d'un capteur LVDT, placé à mi-travée et fixé à l'aide du dispositif présenté de la Figure 6. Celui-ci permet de s'affranchir des déplacements parasites liés aux tassements d'appuis et autres jeux qui interviennent pendant l'essai de flexion. Les vitesses choisies sont de 10 $\mu$ m/min et de 5 $\mu$ m/min respectivement pour la flexion 3 points et la flexion 4 points.

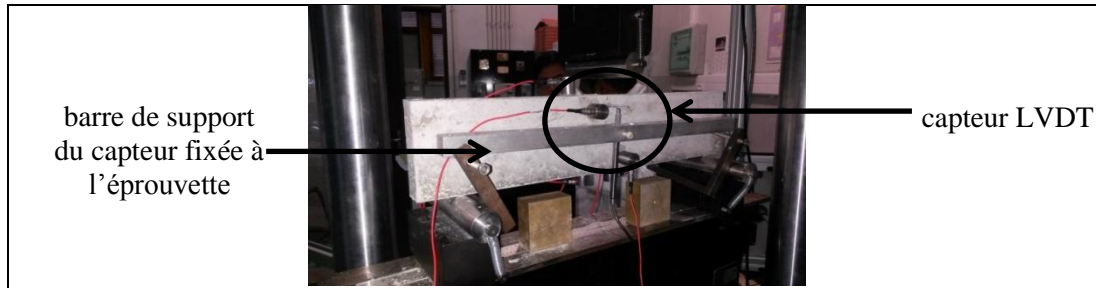


Figure 6. Dispositif de fixation du capteur LVDT

### 3 Résultats et analyses

#### 3.1 Porosités accessibles à l'eau et degrés de saturation

Au terme d'une cure endogène de 35 jours afin de limiter les couplages avec l'hydratation, la porosité accessible à l'eau a été évaluée pour chaque matériau. Pour vérifier l'homogénéité des matériaux sur toute la hauteur des éprouvettes cylindriques ( $h=22\text{cm}$  et  $\phi=11\text{cm}$ ), et vérifier leur éventuelle ségrégation ou sédimentation, ces essais ont été réalisés sur des disques ( $h=5\text{cm}$ ) de matériaux prélevés à différentes hauteurs de l'échantillon initial. Les résultats de porosité mesurés à différentes hauteurs de deux éprouvettes d'une même gâchée sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Porosité à l'eau en % des matériaux mortier et béton en fonction de la position sur la hauteur du cylindre 11x22cm

Matériaux	N° éprouvette	haut de l'éprouvette	milieu de l'éprouvette	bas de l'éprouvette	Moyenne	Ecart type
Mortier	1	24,8	23,1	22,2	23,4	1,3
	2	24,6	23,5	23,1	23,7	0,8
Béton	1	14,8	14,2	13,8	14,3	0,5
	2	14,5	14,2	14,0	14,3	0,3

Comme attendu, du fait de la proportion des granulats, le béton se caractérise par les plus faibles porosités. Ces résultats présentent de faibles écarts des valeurs moyennes des deux éprouvettes d'une même gâchée d'un même matériau. En ce qui concerne la variation de porosité sur la hauteur d'une éprouvette, les écarts-types sont également limités. On constate une légère augmentation de la porosité dans la partie haute des éprouvettes synonyme d'une légère ségrégation entraînant une fraction volumique de pâte supérieure dans cette zone.

Le degré de saturation a été calculé après les quatre types de séchage sur le béton sur les corps d'épreuves de différentes géométries confectionnés pour le programme d'étude mécanique : disque  $h=3\text{cm}$  et  $\phi=11\text{cm}$ , cylindre plein  $h=22\text{cm}$  et  $\phi=11\text{cm}$ , cylindre creux  $h=22\text{cm}$ ,  $\phi=11\text{cm}$  et épaisseur 3cm, prismes 3x10x50 cm pour le béton. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 3.

A la sortie de cure, le degré de saturation des matériaux est de  $80\pm 5\%$ . Il est estimé sur un échantillon de faible épaisseur remis en condition de saturation.



Tableau 3. Degrés de saturation du béton ayant subi les quatre modes de séchage

Matériau	Géométrie d'échantillons	Type de séchage			
		20°C-76%HR	20°C-50%HR	40°C-50%HR	40°C-23%HR
Béton	Disque h=3cm et $\phi=11$ cm	58,8±0,9%	44,8±0,5%	12,3%	6,2%
	Cylindre plein h=22cm et $\phi=11$ cm	69,3%	59,0%	31,4%	34,8%
	Cylindre creux h=22cm $\phi=11$ cm épaisseur 2,5cm	54,4%	37,6%	21,0%	11,5%
	Prismes 3*10*50 cm	62,0%	40,0%	19,3%	3,0%

L'objectif d'obtenir des valeurs de degrés de saturation relativement distincts sur une gamme étalée pour analyser son effet est globalement atteint. Les degrés de saturation mesurés sur les disques de béton de faible épaisseur, et éprouvettes de 2,5 ou 3cm, sont globalement assez proches. Les valeurs sont supérieures pour les cylindres pleins. Ces résultats confirment l'intérêt d'avoir confectionné des éprouvettes de béton de faible épaisseur, cylindres creux et prismes fins, dont les degrés de saturation sont proches de ceux des disques de h=3cm, ceci afin de réduire les gradients de déformation de retrait entre cœur et surface et de limiter la microfissuration due à cet effet structural. L'ordre de sévérité de séchage, est comme attendu, du moins au plus intense : 20°C-76%HR, 20°C-50HR, 40°C-50%HR, 40°C-23%HR. Pour les deux conditions de séchage à même hygrométrie de 50%HR, le degré de saturation à l'équilibre sera plus faible à 40°C, conformément à l'effet de la température sur l'isotherme de désorption.

Pour les deux conditions de séchage à 20°C, le suivi de perte de masse ayant pu être relevé de manière indépendante sur chaque échantillon, l'écart-type peut être calculé. En revanche, à 40°C, les trois échantillons étaient disposés sur une seule balance et la lecture de la masse était faite à l'extérieur de l'enceinte afin d'éviter son ouverture qui aurait déséquilibré les conditions d'ambiance imposées. La valeur présentée dans le Tableau 3 correspond donc à la valeur moyenne calculée directement en divisant par trois la valeur affichée sur la balance. Pour les cylindres pleins, cylindres creux et prismes de béton, le suivi de masse a été réalisé sur une seule éprouvette. Les écarts-types constatés pour les conditions de séchage à 20°C sur échantillons de faible épaisseur sont relativement faibles (inférieur à 2,4%).

### 3.2 Evolutions des pertes de masse

La Figure 7 représente les évolutions des pertes de masse dans le temps, exprimées en pourcentage par rapport à la masse de l'éprouvette, de chaque matériau en fonction du type de séchage imposé. Les séchages sur mortier ont été effectués sur des éprouvettes de 1cm d'épaisseur et de 3cm d'épaisseur pour les bétons. Pour les deux conditions de séchage à 40°C, les valeurs correspondent à la moyenne des mesures obtenues sur 3 éprouvettes pesées sur une seule et même balance avec une lecture à l'extérieur de l'enceinte climatique. Pour les deux conditions de séchages à 20°C, la perte de masse de chaque échantillon est représentée puisque chaque éprouvette a été pesée indépendamment.

Pour un même matériau, les évolutions sont évidemment variables aussi bien en termes de cinétiques que d'amplitudes suivant le mode de séchage du fait des différentes conditions thermo-hydriques. L'analyse faite sur les degrés de saturation peut être étendue à ces résultats par rapport à la sévérité des modes de séchage, aux degrés de saturation et donc aux pertes de masse distincts obtenus lorsque l'échantillon tend vers l'équilibre hydrique. La température augmente significativement les cinétiques initiales et permet d'atteindre l'équilibre hydrique plus rapidement. L'analyse des cinétiques en fin de séchage montre que cet équilibre ne semble pas totalement atteint pour le séchage à 20°C-76%HR

quel que soit le matériau, et également pour les échantillons de béton à 20°C-50%HR.

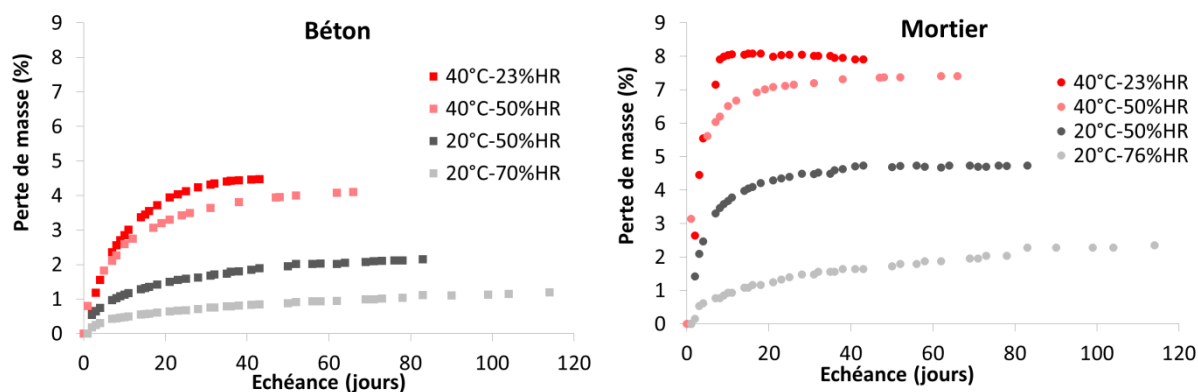


Figure 7. Evolutions des pertes de masse de chaque matériau pour les différentes conditions de séchage

Les amplitudes différentes de perte d'eau mettent en évidence le degré de sévérité des quatre modes de séchage. Dans le cas du mortier, l'équilibre hydrique semble atteint pour la plupart des conditions de séchage sauf pour le séchage à 20°C-76%HR, alors que pour le béton, le séchage n'est pas totalement achevé du fait de l'épaisseur plus importante des échantillons ( $h=3\text{cm}$  pour le béton contre  $h=1\text{cm}$  pour le mortier). Les cinétiques et amplitudes de séchage du béton significativement plus faibles que celles du mortier du fait du moindre volume de pâte et donc de quantité d'eau évaporable. Les légères reprises de masse des échantillons de pâte et mortier en fin d'essai du séchage 40°C-23%HR sont dues aux variations de l'hygrométrie qui est descendu à 21,5-22% avant de se stabiliser à 23%, sachant que cette condition thermo-hydrrique se rapproche d'une des limites de fonctionnement de l'enceinte climatique.

La Figure 8 permet d'illustrer l'effet de la géométrie de l'éprouvette de béton sur la cinétique de séchage pour la condition 20°C-50%HR. Différentes géométries d'échantillons ont été testés : un cylindre plein de  $\phi=11\text{cm}$ , et 3 types d'éprouvettes de 3cm d'épaisseur (disque de  $\phi=11\text{cm}$ , prisme et cylindre creux). Le cylindre plein se caractérise par une cinétique de séchage significativement plus faible que celle des trois autres éprouvettes. Les éprouvettes de 3cm d'épaisseur présentent des cinétiques comparables, légèrement plus faibles pour le cylindre creux.

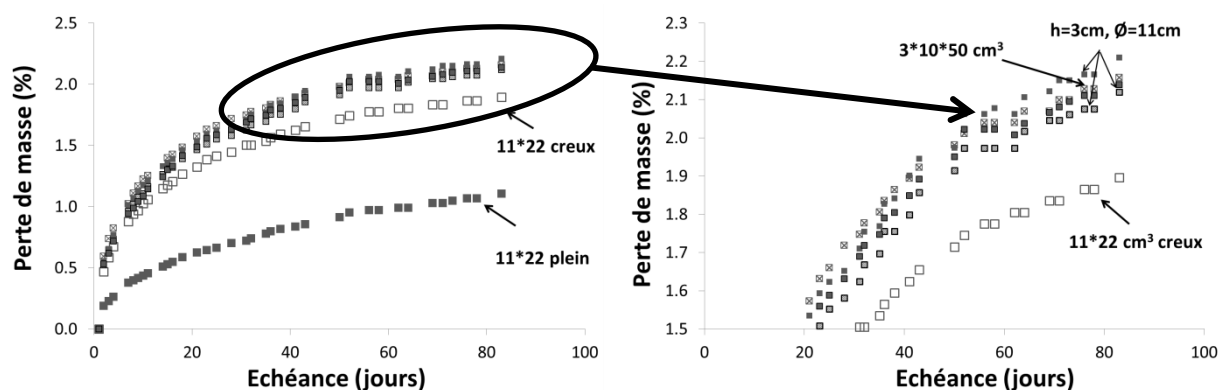


Figure 8. Effet de la géométrie et de l'épaisseur de l'éprouvette de béton sur la cinétique de séchage pour la condition 20°C-50%HR

### 3.3 Evolutions des déformations de retrait

Lors de cette étude, deux types de retrait ont été mesurés : le retrait endogène et le retrait en

dessiccation. Le retrait en dessiccation est mesuré à la suite de la cure endogène de 28 jours.

### 3.3.1 Retrait endogène

La Figure 9 illustre les évolutions de retrait endogène pour l'ensemble des matériaux, avec la même échelle d'ordonnée que celle utilisée pour les graphes de retrait de dessiccation de la Figure 10 pour en faciliter la comparaison.

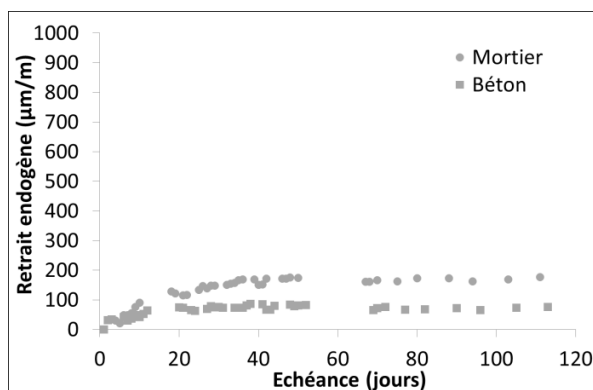


Figure 9. Evolution des retraits endogènes des matériaux à partir de 24h après le coulage

Les retraits endogènes du béton et du mortier sont relativement semblables avec des cinétiques élevées au jeune âge dues à l'auto-dessiccation par hydratation du ciment. Les cinétiques diminuent ensuite avec le ralentissement de l'hydratation puis le retrait tend à se stabiliser au-delà de 50 jours. L'amplitude de retrait est plus faible pour le béton puisque la proportion supérieure de granulats, qui se comportent comme des inclusions rigides, restreignent la déformation de retrait de la pâte.

### 3.3.2 Retrait total

La Figure 10 présente les évolutions du retrait total à partir de l'instant où les échantillons sont mis dans les conditions de séchage de l'étude, soit 28 jours minimum. Etant donné que le retrait endogène varie peu au-delà de cette échéance, le retrait total est donc équivalent au retrait de dessiccation. Les durées de mesure des retraits varient d'un matériau à l'autre. Pour le mortier, la fin de l'essai a été pilotée par le temps durant lequel la jauge a été capable de mesurer une déformation. En effet, les importants retraits et quantités d'eau évaporables ont parfois entraîné un décollement de la jauge due à la remontée d'eau évaporable.

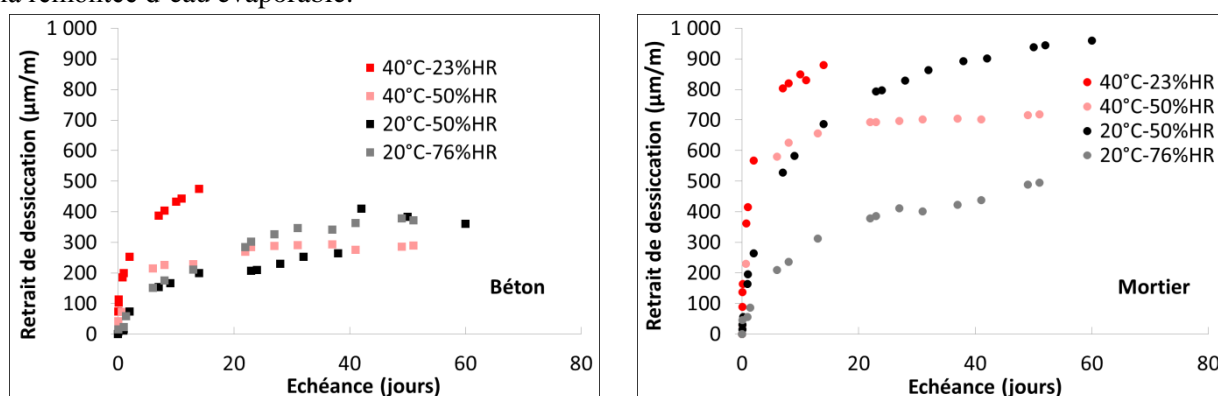


Figure 10. Evolution des retraits de dessiccation des matériaux pour les différentes conditions de séchage après 28 jours de cure endogène

Les amplitudes supérieures du retrait du mortier s'expliquent à la fois par la plus forte proportion de

pâte, mais également par le retrait de la matrice restreint par la présence des inclusions granulaires plus rigides dans le béton. Comme attendu, les évolutions à 20°C montrent un retrait supérieur à 50%HR par rapport à 76%HR pour le mortier. En revanche, celles du béton sont moins distinctes. Les évolutions de retrait à 40°C comportent une part importante de déformation de dilatation thermique. Ceci explique pourquoi les retraits ne sont pas plus aussi supérieurs de ceux à 20°C.

Par rapport aux objectifs de l'étude, ces amplitudes semblent suffisamment significatives pour induire une microfissuration qui pourrait affecter les propriétés mécaniques et de transfert.

### 3.4 Effet du séchage sur les propriétés mécaniques

L'effet du séchage sur les propriétés mécaniques est analysé à partir des résultats de résistance en compression, de module d'élasticité pour les deux matériaux, et résistances à la traction par flexion 3 points et 4 points pour le béton, et cela en fonction de la condition thermo-hydrrique appliquée.

#### 3.4.1 Résistances en compression

La Figure 11 présente les résultats de résistance en compression des éprouvettes cylindriques de béton et de mortier pleines ( $h=22\text{cm}$ ,  $\phi=11\text{cm}$ ) et creuses ( $h=22\text{cm}$ ,  $\phi=11\text{cm}$ , épaisseur radiale de 2,5cm). Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de référence conservées en condition endogène et sur celles ayant subi les quatre conditions de séchage. Les valeurs en partie haute des histogrammes correspondent à la variation de la résistance en compression par rapport à la valeur mesurée en condition endogène de référence. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs d'écart-types.

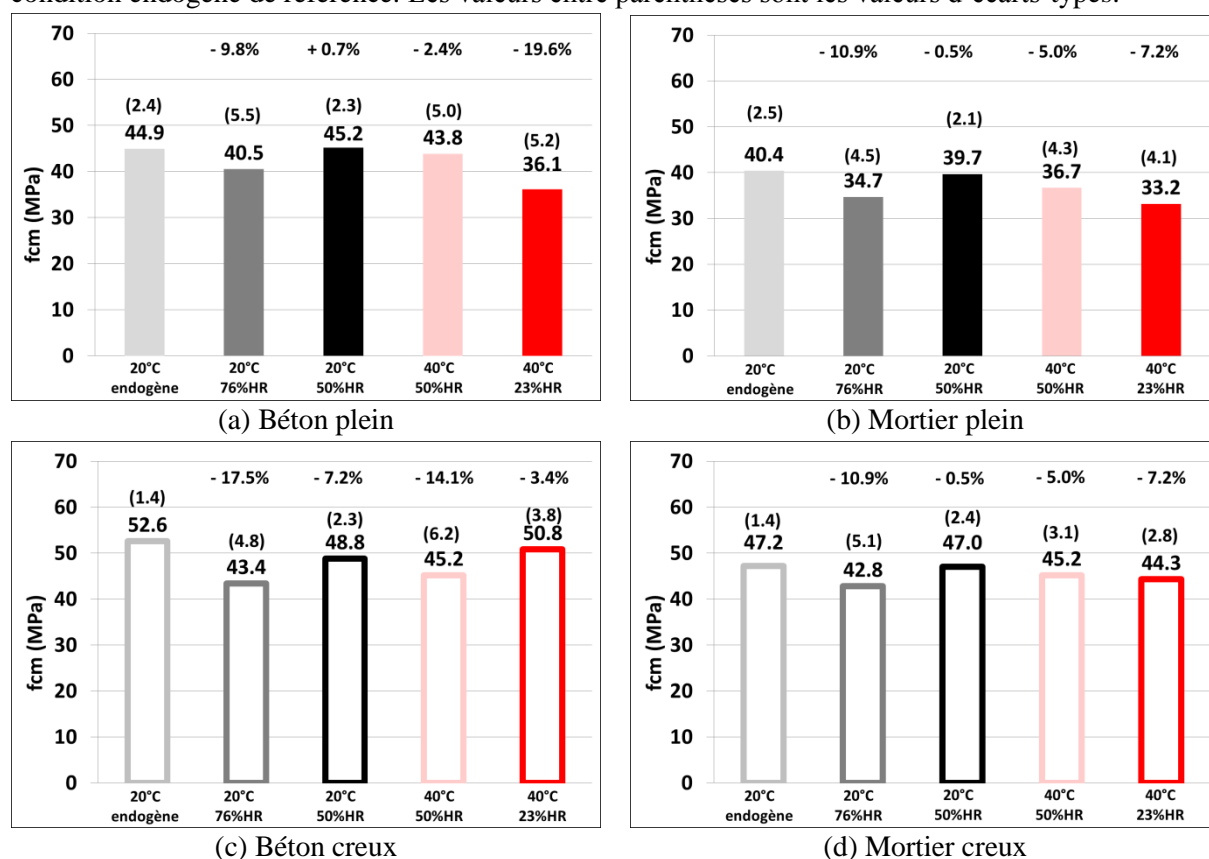


Figure 11. Résistances en compression mesurées sur cylindres pleins de béton (a) et mortier (b) des cylindres creux de béton (c) et mortier (d)

Les résultats de résistances en compression montrent des valeurs qui fluctuent parfois fortement

suivant la condition de séchage par rapport à la valeur en condition endogène, et ce quel que soit le matériau ou le type d'échantillon. Dès que l'on sèche à 20°C-76%HR, on constate une diminution de la résistance pour tous les échantillons et matériaux. Puis la résistance augmente au nouveau pour la condition 20°C-50%HR. Par conséquent, au vu de ces résultats, il ne semble pas exister une dépendance avérée de la résistance en compression avec la sévérité de séchage ou du degré de saturation. Il est généralement admis que deux phénomènes antagonistes se produisent en fonction du degré de saturation. La désaturation entraînerait une augmentation des tensions capillaires dont l'action serait semblable à une mise en précontrainte du matériau améliorant ainsi sa résistance [11-13]. En revanche, elles peuvent également être à l'origine de deux types de microfissuration qui endommagent le matériau. A l'échelle locale, la contraction de retrait de la pâte gênée par les inclusions granulaires rigides engendre une microfissuration à l'interface des deux phases. La prépondérance de l'un ou de l'autre de ces deux mécanismes, précontrainte ou microfissuration due au retrait, pourrait expliquer les évolutions de la résistance en compression en fonction du degré de saturation. On peut d'ailleurs relever que les écarts-types sont plus élevés en conditions de séchage intermédiaire notamment 20°C-76% pouvant traduire la présence de points faibles correspond à un endommagement localisé de type microfissuration qui affecterait la résistance en compression de certains échantillons.

Pour le séchage le plus sévère à 40°C-23%HR on constate une baisse significative des résistances à la compression à 40°C-23% sur les cylindres pleins contrairement à celles des creux, surtout sur béton. Dans le cas des échantillons épais, un gradient de déformation de retrait entre cœur et surface peut induire un état d'auto-contraintes induisant des contraintes de traction en surface à l'origine de microfissuration. Cet effet structural montre donc l'intérêt de mener une grande part de l'étude sur des éléments fins afin de s'affranchir de ce phénomène.

### 3.4.2 Modules de Young

La Figure 12 présente les résultats de modules de Young mesurés sur les cylindres pleins et creux de mortier et de béton fonction de la condition de conservation. Les valeurs en partie haute des histogrammes correspondent à la variation du module par rapport à la valeur mesurée en condition endogène de référence. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs d'écarts-types.

Globalement, les valeurs de module d'élasticité tendent à diminuer avec la sévérité de séchage, et donc avec le degré de saturation. Comme pour les résistances en compression, on observe des comportements semblables entre le mortier et le béton. Par conséquent, si un endommagement de type microfissuration locale à l'interface pâte-granulat due au retrait de la pâte gêné par le granulat pourrait expliquer en partie la diminution des modules, ce ne serait être la principale raison étant donné que la tendance est similaire pour le mortier. Les dépressions capillaires ne semblent pas avoir d'effet sur la rigidité du matériau.

Sur les cylindres creux, la baisse est moins régulière dans le cas du béton. On observe notamment une légère augmentation du module de Young avec le séchage de 40°C-23%HR par rapport au séchage de 40°C-50%HR. Le fait de limiter la microfissuration structurale de retrait pourrait être à l'origine de ce comportement distinct entre cylindres pleins et creux à la condition de séchage la plus sévère.

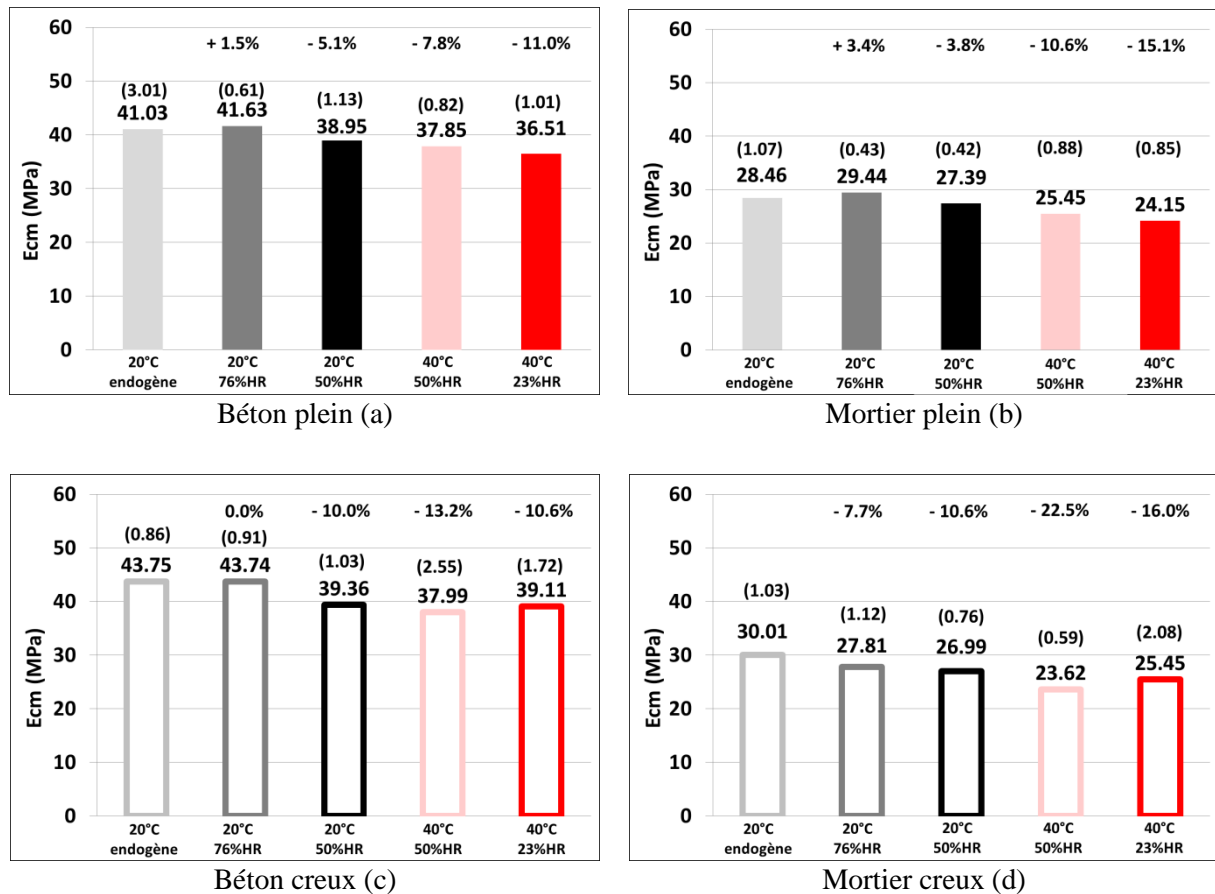


Figure 12. Modules de Young mesurés sur des cylindres pleins de béton (a) et mortier (b) et des cylindres creux de béton (c) et mortier (d)

Comme le montre la Figure 13 avec les résultats sur béton, le module de Young tend à augmenter légèrement avec le degré de saturation, traduisant la contribution de l'eau dans la compressibilité du matériau.

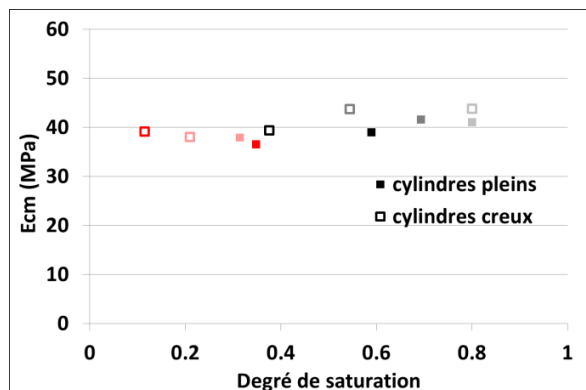


Figure 13. Evolution des modules d'élasticité du béton en fonction du degré de saturation

### 3.4.3 Résistances à la traction par flexion

La Figure 14 présente les résultats obtenus sur les essais de flexion 3 points (a) et 4 points (b) sur les prismes de béton fins de 3cm d'épaisseur, de 50cm de longueur et de 10cm de hauteur. On peut observer une augmentation non négligeable de la résistance en flexion avec l'intensité du séchage pouvant atteindre jusqu'à 50.3% à 40°C-23%HR par rapport à la condition endogène.



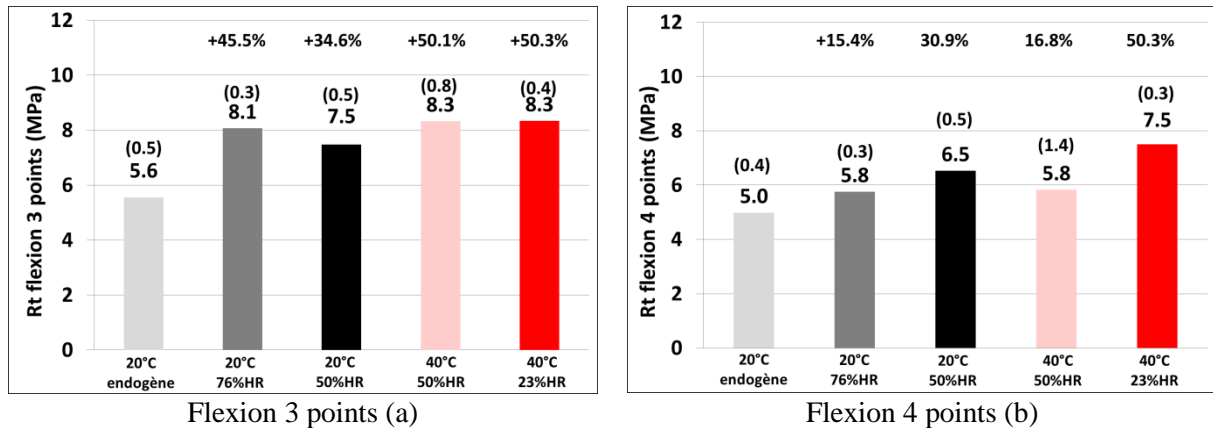


Figure 14. Résistance à la traction par flexion 3 points (a) et 4 points (b) des prismes de béton

Cette augmentation des résistances en traction par flexion, flexion 3 points et 4 points, avec le séchage du béton est mise en évidence sur le Figure 15 qui montre l'évolution des résistances en traction par flexion en fonction du degré de saturation.

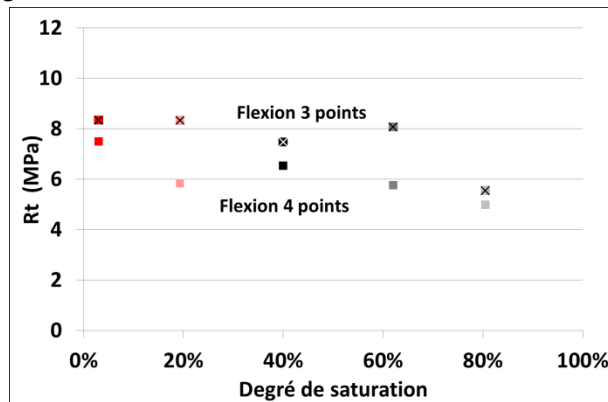


Figure 15. Evolution des résistances en traction par flexion du béton en fonction du degré de saturation

Cette amélioration de la résistance en flexion est attribuable à l'effet favorable de précontrainte des dépressions capillaires lorsque le béton est soumis à des contraintes de traction. Toutefois, d'après l'application directe de la théorie de Biot en poromécanique, l'intensité des dépressions capillaires est telle qu'elle devrait entraîner un gain de résistance environ 4 fois plus important pour un degré de saturation donné. Cette analyse sous-entend par conséquent qu'il existerait un mécanisme qui affecterait la transmission de ces tensions capillaires. L'hypothèse d'une microfissuration à l'échelle locale de l'interface pâte-granulat liée à la contraction de la pâte gênée par l'inclusion granulaire plus rigide peut être avancée. Elle serait en accord avec celle du fluage de dessiccation le définissant comme un supplément de retrait de dessiccation lié à une meilleure transmission des tensions capillaires dans le sens du chargement mécanique, qui limiterait le développement des contraintes de traction au voisinage du granulat et donc la microfissuration [14].

En outre, comme espéré, la confection de prismes de faible épaisseur a permis de prévenir la microfissuration structurale due au retrait de dessiccation gênée qui aurait pu s'opposer à cet effet et complexifier l'exploitation de ces données expérimentales.

Le programme d'étude des essais de flexion 3 points et 4 points avait aussi pour objectif d'étudier l'effet d'échelle probabiliste et le lien entre la notion de maillon faible, zone préférentielle d'amorçage de fissure à l'origine de la rupture par traction, et la microfissuration locale à l'interface pâte-granulat

induite par le retrait de la pâte. Dans le cas de la flexion 3 points, la contrainte maximale de traction étant localisée dans la section transversale à mi-travée en fibre inférieure, la résistance en traction ne serait affectée que dans l'hypothèse où une telle microfissuration de séchage se produirait dans cette même zone. Dans le cas de la flexion 4 points, la zone soumise à la contrainte de traction étant plus étendue, entre les deux sections où sont appliquées les charges ponctuelles, la probabilité que la microfissuration soit présente est bien supérieure, et l'on devrait constater une diminution de la résistance en flexion [10].

Pour vérifier ces hypothèses, la Figure 16 présente le rapport des valeurs de résistances à la traction par flexion 3 points et 4 points. Les valeurs expérimentales de ces rapports aux différentes conditions de séchage sont confrontées à celle du rapport des résistances calculée d'après la méthode Weibull [15] estimant l'effet d'échelle probabiliste. La relation théorique donnant le rapport des résistances à la traction par flexion 3 points et 4 points est la suivante :

$$\frac{R_t^{3points}}{R_t^{4points}} = \left( 1 + m \left( 1 - 2 \frac{a}{l} \right) \right)^{1/m}$$

avec :

$m = 4,6$  pour un coefficient de variation de l'ordre de 25% conformément aux écarts-types des résultats obtenus

$a = 150\text{mm}$ , distance entre appui et point d'application de la force ponctuelle pour l'essai de flexion 3 points

$l = 400\text{ mm}$  distance entre appuis.

La valeur obtenue du rapport théorique des résistances à la traction, représentée en pointillés sur la Figure 16 est égal à 1.18. Elle est proche de la valeur expérimentale moyenne de 1.24. L'effet d'échelle probabiliste semble donc applicable et indépendant du degré de saturation.

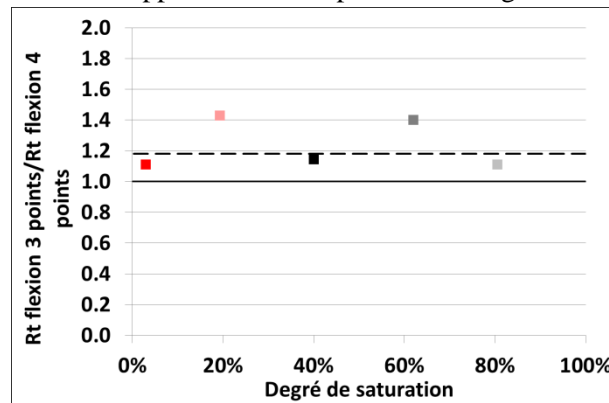


Figure 16. Rapport des résistances en flexion 3 points sur les résistances en flexion 4 points et comparaison avec la valeur théorique de la méthode WL2

## 4 Conclusions

Cette étude traite d'une partie des données expérimentales issues du programme expérimental réalisé par le LMDC dans le cadre du projet ANR MOSAIC dont l'objectif est d'étudier l'effet du séchage sur les propriétés mécaniques et de transfert dans les matériaux à base cimentaire. Les principales conclusions sont les suivantes :

- le degré de saturation a peu d'effet sur la résistance en compression. La comparaison des résultats sur cylindres pleins et creux met en évidence une diminution de la résistance en condition de séchage la plus sévère, révélant un endommagement induit davantage par l'effet structural du retrait de dessiccation que par une dépendance intrinsèques.

- le module d'élasticité augmente avec le degré de saturation grâce à la contribution de l'eau à la compressibilité des matériaux à base cimentaire. Les résultats étant similaires sur mortier et béton, la microfissuration à l'interface pâte-granulat ne semble donc pas être le mécanisme responsable de la dégradation des modules de Young lorsque le matériau est séché. Les tensions capillaires n'ont pas d'influence sur cette propriété élastique.

- les résistances à la traction par flexion 3 points ou points obtenues sur prismes de béton fins augmentent lorsque le degré de saturation diminue grâce à l'effet de précontrainte des tensions capillaires. Ce gain est néanmoins plus faible que ne le prédit la théorie de Biot. Une microfissuration à l'interface pâte-granulat due au retrait gênée de la pâte à l'interface pourrait affecter cette transmission de la dépression au squelette solide. Cette hypothèse pourrait ainsi également expliquer le fluage de dessiccation qui correspondrait à un supplément de retrait grâce à l'application d'une contrainte qui préviendrait l'apparition de cette microfissuration et améliorerait cette transmission des tensions capillaires [14].

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence nationale de la recherche pour le soutien financier du projet ANR MOSAIC, ainsi que tous les acteurs des différents laboratoires partenaires.

## Références

- [1] H. Cagnon, T. Vidal, A. Sellier, X. Bourbon, G. Camps, Effects of water and temperature variations on deformation of limestone aggregates, cement paste, mortar and High Performance Concrete (HPC), *Cement and Concrete Composites* 71 (2016) 131-143.
- [2] S. Poyet, A. Sellier, B. Capra, E. Bourdarot, Influence of Water on Alkali-Silica Reaction: Experimental Study and Numerical Simulations, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18(4) (2006) DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:4(588).
- [3] A. Sellier, L. Buffo-Lacariere, M. El Gonnouni, X. Bourbon, Behavior of HPC nuclear waste disposal structures in leaching environment, *Nuclear Engineering and Design*, 241 (2011) 402-414.
- [4] L. Buffo-Lacariere, S. Baron, F. Barre, Restrained shrinkage of massive reinforced concrete structures: results of the project CEOS.fr, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* vol.20 7 (2016) 785-808.
- [5] W. Ladaoui, T. Vidal, A. Sellier, X. Bourbon, Analysis of interactions between damage and basic creep of HPC and HPFRC heated between 20 and 80°C, *Materials and Structures* 46 (2013) 13-23.
- [6] EN 197-1, Cement-Part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2001
- [7] NF P18-459, Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique, 2010.
- [8] NF EN 12390-3, Essais pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, 2012.
- [9] RILEM CPC8, Recommendations RILEM CPC8, Modulus of elasticity of concrete in compression, *Materials and Structures* vol6 30 (1972) 507-512.
- [10] A. Sellier, A. Millard, Weakest link and localisation WL 2 : a method to conciliate probabilistic and energetic scale effects in numerical models. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (2014) 1–15. doi:10.1080/19648189.2014.906368
- [11] P. Acker Comportement mécanique du béton : apports de l'approche physico-chimique. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1988).
- [12] N. Burlion, F. Bourgeois, J. F. Shao, Effect of desiccation on mechanical behaviour of concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol.27 3 (2005) 367-379.

- [13] I. Yurtdas, N. Burlion, F. Skoczylas Experimental characterisation of the drying effect on uniaxial mechanical behaviour of mortar. *Materials and Structures*, vol.37 (267), (2004) 170-176.
- [14] A. Sellier, S. Multon, L. Buffo-Lacariere, T. Vidal, X. Bourbon, G. Camps, Concrete creep modelling for structural applications: non-linearity, multi-axiality, hydration, temperature and drying effects, *Cement and Concrete Research* 79 (2016) 301-315.
- [15] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Applied Mechanics ASME* 18 (1951) 12–23