

## **Influence du séchage sur le développement des hétérogénéités dans les structures à base de matériaux cimentaires : impact sur les propriétés mécaniques**

**Jean Chills AMBA<sup>1,2\*</sup>, Jean Paul BALAYSSAC<sup>2</sup> et Joseph NKONGHO<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions);  
135, avenue de Rangueil F-31 077 Toulouse Cedex 04, France*

<sup>2</sup>*Université de Douala : L2MSP (Laboratoire de Mécanique, Matériaux, Structures et Productique)  
BP. 2071 Douala, Cameroun*

\* Correspondance, courriel : [jeanchills@yahoo.fr](mailto:jeanchills@yahoo.fr)

### **Résumé**

Ce travail décrit l'ensemble des phénomènes qui gouvernent le développement des hétérogénéités dans les structures à base de matériaux cimentaires lorsqu'elles sont soumises au séchage ainsi que leur influence sur les propriétés mécaniques du matériau mis en œuvre. Il s'agit notamment des facteurs influents tels que la porosité, la teneur en humidité, le degré d'hydratation. Tous ces facteurs contribuent à la tenue du matériau in situ ainsi que son comportement au regard de la fissuration. Il a été démontré pour ces matériaux que, les fissures s'amorcent dans la partie du matériau qui présente les propriétés les plus médiocres et qu'elles se propagent par la suite dans le reste du volume. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la caractérisation et la quantification des gradients de propriétés tels que les gradients hydriques, les gradients d'hydratation et les gradients de porosités. Pour finir nous avons étudié leur impact sur l'évolution des propriétés mécaniques des matériaux mis en œuvre. L'étude a révélé une parfaite adéquation entre la progression du front de séchage et les différentes hétérogénéités observées en terme de caractéristiques mécaniques.

**Mots-clés :** *matériaux cimentaires, béton, mortier, séchage, hétérogénéités, propriétés mécaniques.*

### **Abstract**

**The heterogeneities development on cement-based materials subjected to drying : influence on the mechanical properties**

This research describes the main phenomena that govern the heterogeneities development of cement-based materials. This frame work is mainly focused on the property gradients linked to drying phenomenon (hydric, hydration, porosity) and the consequences on mechanicals properties. Here we present some experimental techniques developed to assess mechanical behaviour induced by these heterogeneities. For mechanical properties, the behaviour of the material significantly differs according to depth, from the drying face as show the laboratory samples. The study shows the good correlation between sensitivity of mechanical properties development and these heterogeneities.

**Keywords :** *cementitious materials, concrete, mortar, drying, heterogeneities, mechanical properties.*

## 1. Introduction

Pourquoi s'intéresser aux hétérogénéités dans les structures en béton ? En fait elles se présentent sous plusieurs formes. Dans la plupart des cas, le matériau mis en œuvre n'a pas toujours les mêmes propriétés dans tout son volume. Dans la masse du béton mis en œuvre, il peut se former à certains endroits des amas de granulats, avec pour conséquences un dosage en ciment non uniforme ainsi qu'une variation de la teneur en eau dans le volume du matériau. Ce phénomène est largement influencé par le type de structure réalisé. Ainsi pour un voile par exemple, les hétérogénéités peuvent non seulement être générées par le type de coffrage utilisé (absorbant ou non) mais aussi par la rhéologie et la composition du matériau qui pourrait influencer les phénomènes de ségrégation et de développement de la laitance. Par contre pour des applications de dallage, de planchers, ainsi que les applications de couche minces de mortier tels que les ragréages et les chapes, le développement des hétérogénéités se manifeste surtout suivant l'épaisseur du matériau. La particularité de ces structures est que leur surface exposée est importante comparée au volume total du matériau mis en œuvre.

Les travaux effectués par [1], [2] et [3] permettent de caractériser ces hétérogénéités. Certains auteurs vont plus loin dans leurs investigations en montrant l'influence qu'elles ont sur la fissuration des structures à base de matériaux cimentaires, surtout lorsque celles-ci sont utilisées pour des applications en couche mince [4 - 6].

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact des hétérogénéités sur les propriétés mécaniques des structures à base de matériaux cimentaires soumises au séchage. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux conséquences que génère le séchage sur le développement de ces hétérogénéités. Pour cela des essais permettant de quantifier les variations des teneurs en eau, de porosité ainsi que des résistances mécaniques ont été effectués suivant le protocole expérimental décrit par [1] et [7]. Les essais sont effectués sur un mortier sujet au séchage dans les conditions de laboratoire (conservation dans une atmosphère avec une humidité relative de 65% et une température de 20°C).

Il apparaît clairement que le séchage affecte considérablement la structuration du matériau en terme de porosité et de teneur en humidité, avec pour conséquences l'abaissement des performances mécaniques au voisinage de la face exposée. Sur site, ceci se traduit par la fragilisation de cette région du matériau au regard de la fissuration.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Matériau testé

Les tests ont été effectués sur un mélange à base de ciment Portland dont la composition est donnée dans le *Tableau 1*.

**Tableau 1 : Composition du matériau**

Ciment (g)	Sable (g)	Super plastifiant (L/m <sup>3</sup> )
CPA CEM I 52,5 R	Sable normalisé	Glénium 27
333	667	3,40

- Le ciment

Le ciment utilisé ici est un CEM I 52.5 R de l'usine Martres Tolosane et commercialisé par Lafarge. Le détail de sa composition chimique est donné dans le **Tableau 2**.

- Le sable

Le sable utilisé pour la formulation du mortier est du sable normalisé tel que décrit par la norme EN 196-1.

- Le super-plastifiant

Pour faciliter la maniabilité et la mise en œuvre du matériau, un super plastifiant (Glénium 27) a été ajouté au mélange (eau de gâchage).

**Tableau 2 : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé**

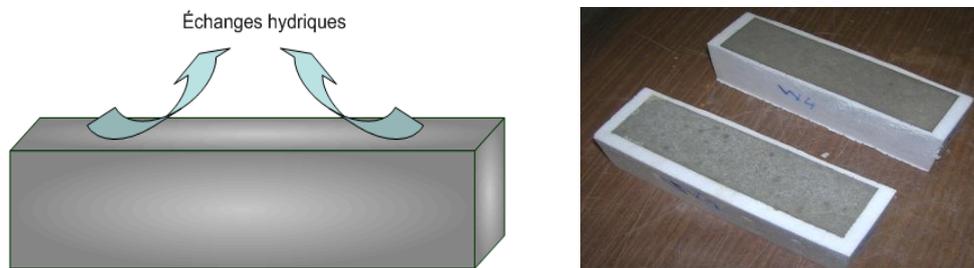
<b>Composition chimique</b>	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	NaO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO
<b>%(masse)</b>	63,99	19,89	5,64	2,47	1,77	3,13	0,07	0,4	0,2 1	0,1
<b>Perte au feu</b>	1,73									
<b>Composition de Bogue</b>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF						
<b>%(masse)</b>	53,7	17,9	9,5	6,9						

**2-2. Quantification des hétérogénéités dans la couche de matériau : Protocole expérimental**

Dans cette section, nous présentons les différents tests qui ont servis pour quantifier les hétérogénéités dans la couche de mortier.

**2-2-1. La méthode des tranches**

Cette technique consiste à prélever par carottage et par sciage des tranches sur l'épaisseur de la couche de mortier ou de béton durci et à en mesurer les propriétés. Les éprouvettes d'étude sont des prismes de 40×40×160 mm qui sont coulées dans des moules en polystyrène (voir **Figure 1**).

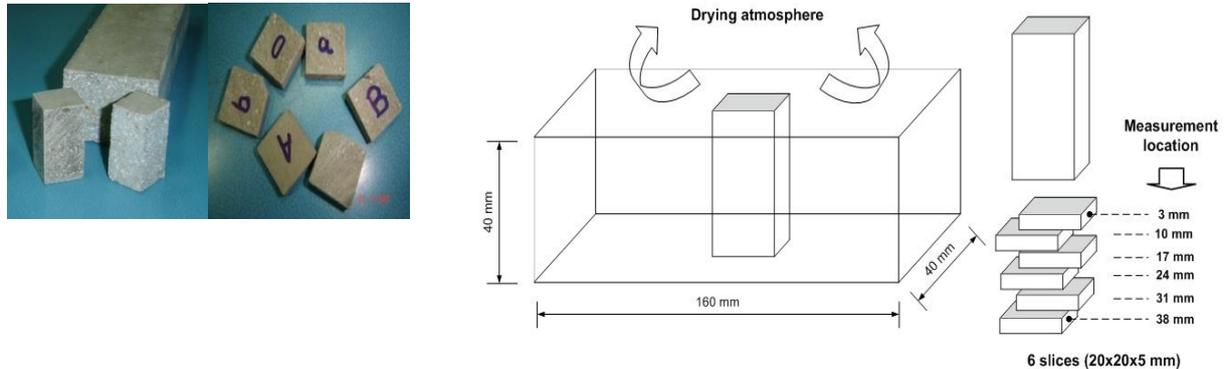


**Figure 1 : Conditions d'échanges hydriques entre le matériau et le milieu extérieur**

Le choix de ce type de moules se justifie par le fait qu'ils offrent de meilleures propriétés en terme d'isolation thermique comparés aux moules en acier ou en bois. Dans ce cas, les échanges hydriques se font essentiellement par la face supérieure [4].

A une échéance donnée, on prélève par sciage sur chaque éprouvette une carotte sur toute l'épaisseur du matériau. Cette carotte est ensuite découpée en tranches d'épaisseurs variables suivant la nature du test à effectuer. Les prélèvements sont effectués une seule fois sur chaque éprouvette.

Des mesures de porosimétrie au mercure, de teneur en eau libre et liée par étuvage ont pu ainsi être effectuées sur ces tranches de mortiers. Il est alors possible de reconstituer les profils de teneur en eau et de porosité d'une carotte de mortier en faisant l'hypothèse que son épaisseur correspond à la somme des épaisseurs de chaque tranche [7].



**Figure 2 :** Géométrie des éprouvettes et procédé de prélèvement des tranches de matériaux

### 2-2-1-1. Mesures des teneurs en eau libre et des teneurs en eau liée

Les teneurs en eau libre sont obtenues par séchage à l'étuve. Le principe consiste à déterminer à une échéance donnée la perte de masse d'un échantillon soumis à un étuvage à 105°C. L'eau enlevée lors de l'étuvage est celle contenue dans les pores du matériau (eau libre).

$$(\%)_{\text{eau-libre}} = \frac{(M_{\text{mortier}} - M_{(80-105)^{\circ}\text{C}})}{M_{\text{mortier}}} \times 100 \quad (1)$$

De la même façon, les teneurs en eau des hydrates sont obtenues par perte au feu sur des tranches. L'eau chimiquement liée est considérée comme étant l'eau enlevée lors de l'étuvage à 550°C sans la quantité d'eau libre.

$$(\%)_{\text{eau-liée}} = \frac{(M_{(80-105)^{\circ}\text{C}} - M_{550^{\circ}\text{C}})}{M_{(80-105)^{\circ}\text{C}}} \times 100 \quad (2)$$

### 2-2-1-2. Mesures des porosités au moyen de la porosimétrie par intrusion de mercure

Des essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été réalisés sur des tranches de mortier de 10×10×8,5 mm âgés de 28 jours. Le test permet de déterminer la porosité ainsi que la distribution en taille des pores du matériau. Le principe consiste à injecter du mercure sous pression (fluide non mouillant) dans le matériau préalablement dégazé. Le volume de mercure injecté correspond au volume cumulé des pores accessibles au mercure pour une pression donnée. La pression capillaire appliquée  $P$  est reliée au rayon d'accès aux ports  $r_p$  par la loi de Laplace [7]:

$$P = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_p} \quad (3)$$

Avec :

$P$  : pression capillaire

$r_p$  : le rayon du pore

$\sigma$  : tension superficielle du fluide

$\theta$  : angle de contact capillaire solide – fluide.

### 2-3. Essais mécaniques réalisés

Afin de quantifier l'impact des hétérogénéités sur les résistances mécaniques du matériau durci, des essais mécaniques ont été effectués en parallèle sur des éprouvettes entières non débitées de dimensions  $40 \times 40 \times 160$  mm et sur des tranches de mortier de  $13 \times 40 \times 160$  mm de dimensions (voir *Figure 3*).



**Figure 3 :** Conditions de sciage des tranches de mortier

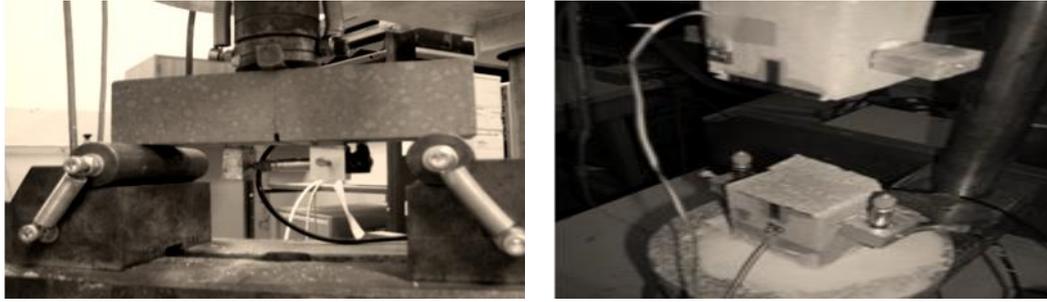
La démarche consiste à comparer les résistances mécaniques mesurées sur des éprouvettes non débitées avec celles des tranches obtenues après sciage.

Des essais de flexion 3 points (CMOD) ont été effectués sur ces prismes (entiers ou débités), avec une profondeur d'entaille de 5 mm (voir *Figure 4*).

Les travaux de [8] ont montré pour les matériaux cimentaires que, l'une des propriétés servant à limiter leur susceptibilité à la fissuration est leur capacité d'adaptation en phase adoucissante. Cette phase peut être mise en évidence au moyen d'essais mécaniques. Le principe consiste à exploiter la partie post-pic des courbes d'essais de traction, de compression, ou alors de flexion.

Dans cette étude, des essais de flexion 3 points ont été effectués suivant le dispositif de mesure représenté sur la *Figure 4-a*. L'ouverture de fissure est mesurée grâce à un capteur LVDT qui est positionné à mi portée de l'éprouvette. Dans ce cas, l'essai est asservi par déplacement.

De même, l'essai de traction directe a permis de mettre en évidence le comportement en phase élastique du matériau (débité ou entier). La configuration de l'essai est illustrée sur la *Figure 4-b*. Les tests sont réalisés sur des éprouvettes de mortier de dimensions  $12 \times 40 \times 160$  mm ou  $40 \times 40 \times 160$  mm entaillées. La profondeur de l'entaille est choisie de telle sorte que la rupture se produise au niveau de la section réduite. Dans notre cas, nous avons adopté une profondeur d'entaille de 2 mm. Les efforts sont transmis au matériau par l'intermédiaire des embases qui sont collées sur les deux extrémités de l'éprouvette. La liaison éprouvette-embases est assurée au moyen d'une colle à prise rapide. Les mesures des déplacements au niveau du matériau sont effectuées au moyen de deux capteurs de déplacement LVDT montés en parallèle sur l'éprouvette. Dans ce cas, l'essai est asservi par force.



**a-** exemple d'une tranche de 13×40×160 mm    **b-** exemple d'une éprouvette de 40×40×160 mm

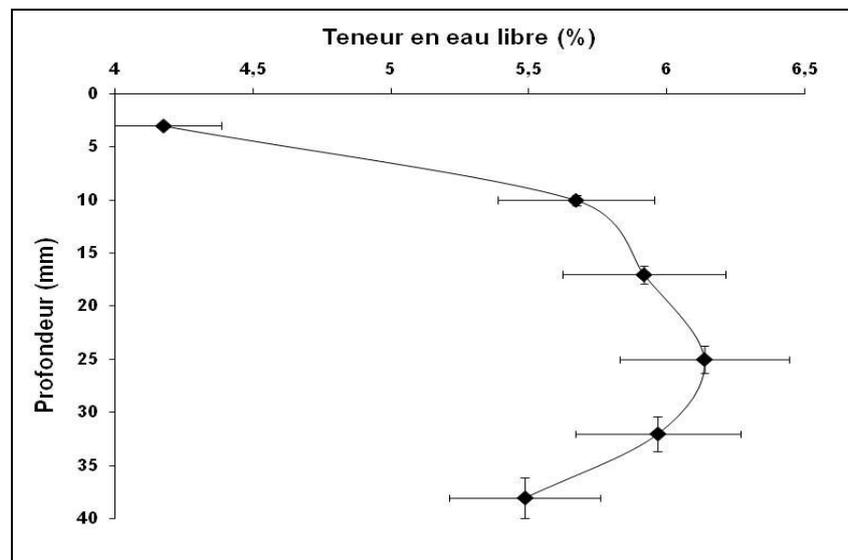
**Figure 4 :** Configuration des essais de flexion 3 points CMOD (a) et de traction directe (b)

### 3. Résultats et discussion

Nous présentons ici les résultats des gradients de propriétés mesurés le long de la couche de mortier. Par la suite, les profils des teneurs en eau, d'hydratation et de porosité dans la couche de mortier sont représentés, ainsi que les caractéristiques mécaniques des matériaux avec prise en compte des effets générés par le séchage différentiel.

#### 3-1. Les profils de teneurs en eau libre et liée dans la couche de mortier

Les profils de teneur en eau à 28 jours du mortier sont présentés sur les *Figures 5 et 6*. Chaque point représente la moyenne de trois essais.



**Figure 5 :** Teneurs en eau libre dans la couche de mortier

Nous pouvons observer la pénétration du front de séchage dans la couche de mortier depuis la surface de séchage. On remarque que le séchage affecte de façon plus marquée le quart supérieur de la couche de mortier avec des gradients de teneur en eau assez significatifs. On observe dans le même temps un

gradient des teneurs en eau libre au voisinage du font du moule; ce phénomène peut être attribué à l'effet de paroi qui est marqué par la différence de texture de cette zone, comparée au reste de la couche [9].

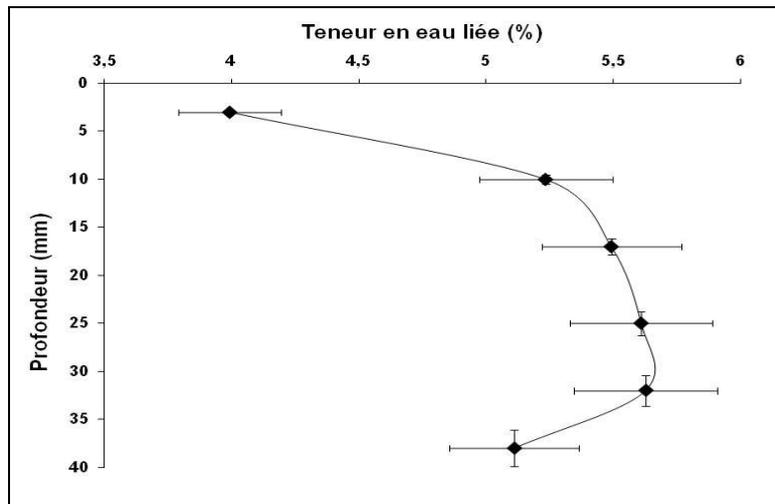


Figure 6 : Teneurs en eau liée dans la couche de mortier

Les profils d'hydratation sont également mis en évidence par la distribution des teneurs en eau chimiquement liée dans la couche de mortier. Les profils de teneur en eau liée sont représentés sur la **Figure 6**. En observant l'évolution des courbes, on peut voir l'évolution des profils d'hydratation dans la couche de mortier depuis la surface de séchage. On remarque également que le séchage affecte de façon plus marquée le quart supérieur de la couche de mortier où les gradients des teneurs en eau liée sont importants.

### 3-2. Les profils de porosité dans la couche de mortier

Les courbes à 28 jours donnant les volumes cumulés de mercure en fonction de la taille des pores obtenus pour différentes tranches de matériau sont présentées sur la **Figure 7**.

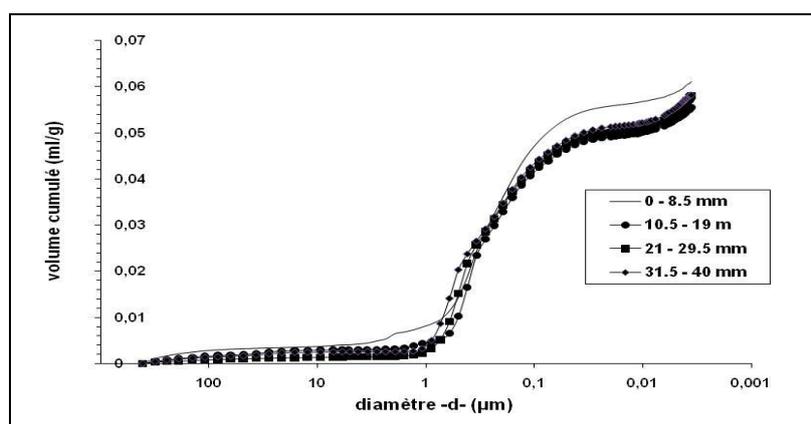


Figure 7 : Volume cumulé de mercure en fonction du diamètre des pores pour chaque tranche de mortier

Tableau 3 : Résultats des tests de porosimétrie sur la couche de mortier

Tranches de mortiers (mm)	0 – 8,5	10,5 – 19	21 – 29,5	31,5 – 40
Porosité Hg (%)	13,56	12,035	12,55	12,66
Taille des pores :	Répartition du volume poreux en fonction de la taille des pores (%)			
> 1 $\mu\text{m}$	14	7,82	3,86	5,58
1 $\mu\text{m}$ – 0,01 $\mu\text{m}$	79	82,66	84,13	84,17
< 0,01 $\mu\text{m}$	6,6	9,51	12	10,24

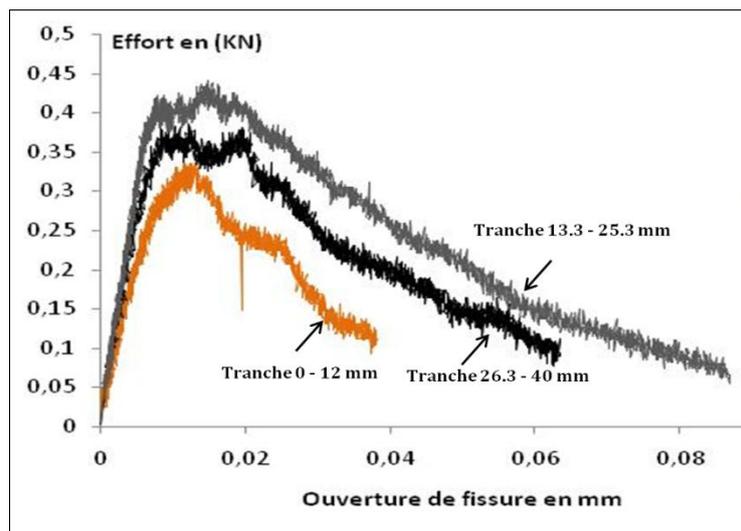
On remarque comme dans le cas des teneurs en eau, que le séchage affecte beaucoup plus le quart supérieur de la couche de mortier où les porosités sont plus importantes. En effet, lorsque nous observons les courbes, on remarque que la courbe donnant le volume cumulé de mercure en fonction du diamètre des pores pour la couche superficielle (0 – 8.5 mm) s'écarte sensiblement des trois autres. Dans cette couche, il apparaît clairement que la porosité  $y$  est plus grande (voir **Tableau 3**). Tout Ceci nous indique que le matériau hydraté n'a pas la même texture sur toute son épaisseur.

### 3-3. Caractéristiques mécaniques mesurées sur prismes débités ou entier

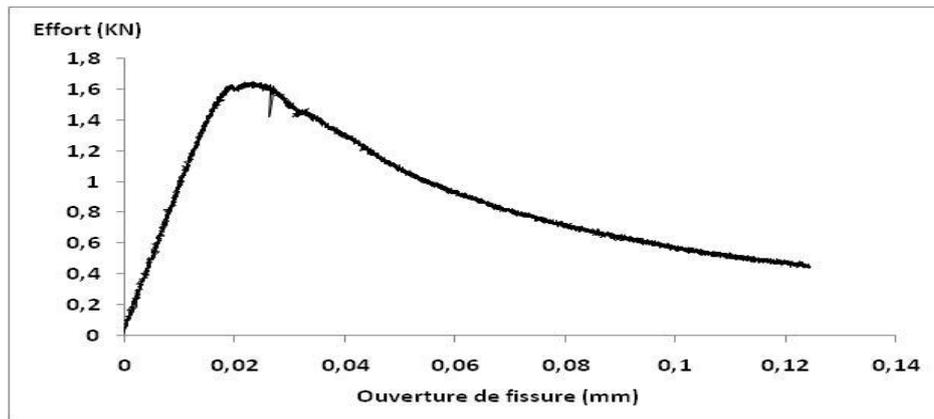
Les caractéristiques mécaniques mesurées à 28 jours sur les tranches de matériaux et sur prismes non débités sont présentées sur les **Figures 8 à 11**. Il s'agit notamment des courbes ( $\sigma$ – $\varepsilon$ ) ainsi que des courbes ( $F$ – $C_{MOD}$ ) permettant de mettre en évidence la phase adoucissante du matériau. On constate que les résistances mécaniques du matériau varient sensiblement en fonction de la profondeur de séchage.

#### 3-3-1. Comportement adoucissant du matériau

Les courbes ( $F$ – $C_{MOD}$ ) obtenues au moyen des essais de flexion 3 points effectués sur des prismes de  $13 \times 40 \times 160$  mm et  $40 \times 40 \times 160$  mm entaillés sont présentées sur les **Figures 8 et 9**.



**Figure 8 :** Exemple de courbe expérimentale  $F$ – $C_{MOD}$  pour les 3 tranches de mortiers



**Figure 9 :** Exemple de courbe expérimentale Force – CMOD pour une éprouvette 40×40× 160 mm

En observant ces courbes, il apparaît clairement que les propriétés mécaniques de notre matériau sont assez médiocres au voisinage de la surface de séchage sans doute liée au fait que le processus d'hydratation est rapidement stoppé par le phénomène de séchage tel que observé sur les profils des teneurs en eau (voir **Figure 5**).

Ces propriétés s'améliorent sensiblement à mesure que l'on s'éloigne de la face exposée et on remarque que la tranche intermédiaire offre de meilleures caractéristiques mécaniques ainsi qu'un meilleur comportement dans partie post-pic comparées aux deux autres tranches ; sans doute à cause du fait que l'hydratation est meilleure dans cette zone.

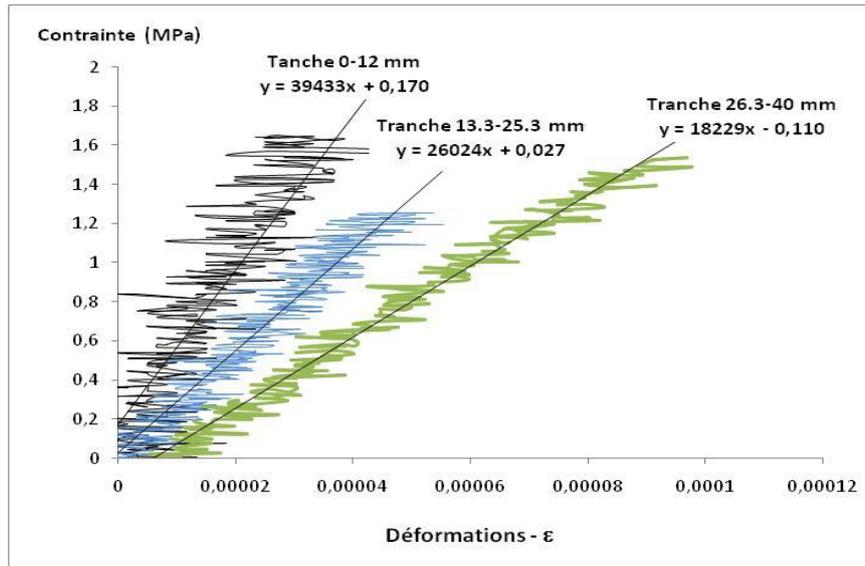
Il apparaît également pour la tranche du matériau en contact avec le fond du moule que, la résistance chute sensiblement comparée à celle de la tranche intermédiaire, sans doute à cause de l'effet de paroi mentionnée plus haut dans cette étude. Ce phénomène est corrélé aux distributions des teneurs en eau telles que observées sur les **Figures 5 et 6**.

A partir des observations faites sur les courbes des **Figures 8 et 9**, on peut conclure que chaque sous couche ou lamelle de matériau a une influence sur la résistance totale de l'éprouvette de 40×40×160 mm de dimensions, traduisant ainsi l'intérêt à limiter le développement des hétérogénéités dans la couche de matériau.

### 3-3-2. Comportement à la traction

Les courbes ( $\sigma-\varepsilon$ ) obtenues au moyen des essais de traction directe effectués sur des prismes de 13×40×160 mm et 40×40×160 mm sont présentées sur les **Figures 10 et 11**. Après examen, on remarque que la tranche supérieure présente de meilleures caractéristiques mécaniques en traction comparées aux deux autres tranches de dessous. Il s'agit surtout ici d'observer l'évolution de la pente obtenue à partir des courbes ( $\sigma-\varepsilon$ ).

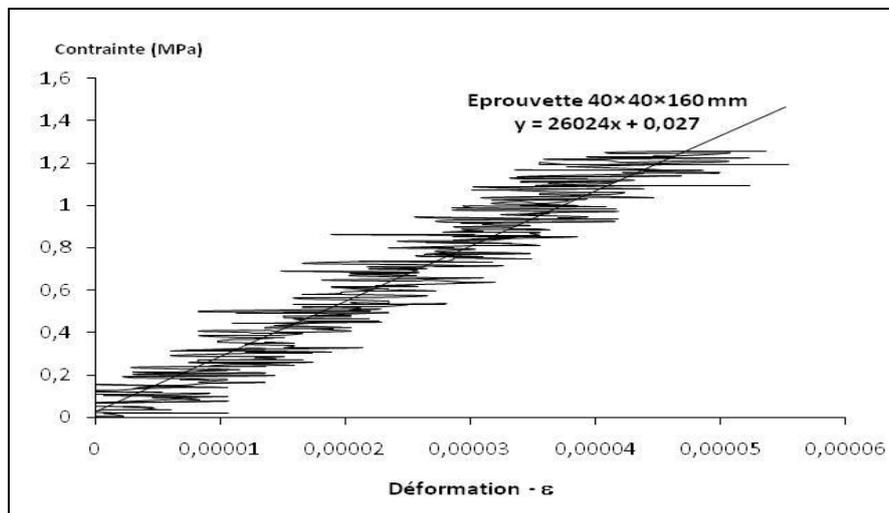
Ce comportement peut s'expliquer par la texture du matériau qui diffère sensiblement entre la surface et le cœur du matériau. Cette texture est fortement influencée par le séchage. Comme nous l'avons présenté plus haut dans cette étude, la diminution importante de la teneur en eau libre (**Figure 5**) a pour conséquences l'arrêt brutal de l'hydratation ; donc le développement d'une matrice cimentaire qui n'est pas assez bien structurée. Dans cette situation, la proportion en granulats est plus importante au voisinage de la surface de séchage. Lorsque cette sous-couche est sollicitée, ce sont essentiellement les granulats qui permettent de reprendre les efforts. Plusieurs auteurs [10] ont montré que le module d'Young des granulats est plus élevé que celui de la pâte de ciment.



**Figure 10 :** Exemples de courbes expérimentales  $\sigma$  (MPa) -  $\varepsilon$  pour les tranches de mortiers de  $13 \times 40 \times 160$  mm

Les couches de dessous ont forcément une proportion en liant plus élevée, ceci s'explique par une meilleure hydratation (voir **Figure 6**). Lorsque le matériau est sollicité, la matrice cimentaire participe activement à la reprise des efforts ; mais celle-ci est plus déformable que le granulat.

Pour la tranche 3, la baisse considérable du module peut se justifier par la texture du matériau qui est largement influencée par l'effet de paroi, contribuant à abaisser considérablement les propriétés telles que le taux d'hydratation, ou encore certaines caractéristiques mécaniques (voir **Figures 5, 6, 7**).



**Figure 11 :** Un exemple de courbe expérimentale  $\sigma$  (MPa) -  $\varepsilon$  pour un prisme de  $40 \times 40 \times 160$  mm

A partir des résultats de la **Figure 10**, on constate que la pente moyennée sur les trois tranches est de 27800. En comparant cette pente à celle obtenue après essai de traction directe effectué sur prisme non débité de  $40 \times 40 \times 160$  mm de dimensions (voir **Figure 11**), on remarque que celles-ci sont assez voisines.

Ceci nous permet de dire que la résistance de la couche de mortier est conditionnée par celles de différentes sous-couches qui la constituent. Ceci rejoint l'hypothèse de [3] qui modélise une couche de béton soumise au séchage comme étant la superposition de plusieurs couches adjacentes dont chacune présente des propriétés mécaniques différentes de celle des couches voisines. Ceci traduit l'existence de fortes hétérogénéités qui sont générées par le séchage différentiel qui se produit dès la mise en œuvre du matériau.

#### 4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons décrit les procédures de caractérisation des hétérogénéités induites par le séchage dans des couches de structures à base de matériaux cimentaires. Il apparaît clairement que la progression du front de séchage dans la couche de mortier a non seulement une influence directe sur la distribution des teneurs en eau libre, mais aussi sur la structuration du matériau. Ainsi les gradients de propriétés résultant de la dessiccation (gradients d'hydratation, gradients de porosité, gradients de propriétés mécaniques) ont été mis en évidence grâce aux techniques de caractérisation présentées. La reconstitution des profils de teneurs en eau, d'hydratation et de porosité montre clairement que les gradients de propriétés sont plus importants au voisinage de la surface de séchage ; avec pour conséquence le développement non uniforme de propriétés mécaniques. Ces propriétés sont assez médiocres au voisinage de la surface de séchage comparées à celles du cœur du matériau qui est moins influencé par ce phénomène.

Il apparaît clairement que le développement des propriétés mécaniques dans la couche de mortier peut être corrélé à la progression du front de séchage.

#### Références

- [1] - S. Carré, O. Nicolle. (2005) *Caractérisation des gradients de microstructure des matériaux cimentaires induits par les couplages hydratation-transfert d'eau : application aux structures de béton armé réparées "17<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique", Sept, Troyes.*
- [2] - J.K. Kim and CS Lee. (1998) *Prediction of differential drying shrinkage in concrete "Cement and concrete research", vol. 28, No. 7, pp. 985-994.*
- [3] - G. Martinola, H. Sadouki & F.H. Wittmann. (2001) *Numerical model for minimizing risk of damage in repair system "Journal of materials in civil engineering", march/april.*
- [4] - J.C. Amba, J.P. Balayssac, C.H. Détriché. (2009) *Characterisation of differential shrinkage of bonded mortar overlays subjected to drying "Materials and Structures", Vol 43, March 2009, pp 297-308.*
- [5] - A. Bentur and K. Kovler. (2003) *Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems "Materials and Structures", vol. 36, April 2003, pp 183-190.*
- [6] - C. Feron C. (2002) *Etude des mécanismes de génération de contraintes et de fissuration par retrait gêné dans les structures à base de matériaux cimentaires. PhD thesis of INSA Lyon, 17 june 2002.*
- [7] - LCPC. (2002) *Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons Méthodes d'essai N°58 ; LCPC ; 1<sup>er</sup> trimestre 2002.*
- [8] - A. Turatsinze, F. Hussein and J. L. Granju. (2000) *Durability of metal-fibre reinforced concrete repairs: drying shrinkage effects. Proceeding of the Sixth International Symposium on Brittle Matrix Composites BMC6, held in Staszic Palace, Warsaw, Poland, 9-11 October.*
- [9] - J. P. Balayssac. (1992) *Relations entre performances mécaniques, microstructure et durabilité des bétons. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse.*
- [10] - F. X. Hubert, Burlion and J-F Shao (2003). *Drying of concrete: modelling of Hydric damage "Materials and Structures", vol. 36, January-February 2003, pp. 12-21.*