

Cette ressource est basée sur le stage de deuxième année de Marie Malbois en Master Sciences de l'Ingénieur, Spécialité Génie civil, parcours Structures, Ouvrages et Matériaux du Génie Civil, effectué au LMT de Cachan¹ en 2014.

Ce travail s'inscrit dans les problématiques actuelles de durabilité des ouvrages. La fissuration induite par le phénomène de séchage, est susceptible de détériorer les propriétés mécaniques et de transferts des matériaux utilisés en construction. L'objet du travail de Marie Malbois [2] est la compréhension et la quantification des différents mécanismes de dégradations du béton sous séchage. Son but est de quantifier l'influence de l'hétérogénéité (présence de granulats dans la matrice) sur la fissuration du béton. Les premiers tests ont permis de définir la campagne expérimentale qui a, par la suite, été mise en œuvre dans la cadre de la thèse de M. Malbois.

Cette ressource est basée sur l'étude d'éprouvettes réalisées en béton modèle ; une évaluation des caractéristiques mécaniques avant et après séchage accéléré des éprouvettes est proposée ainsi que le suivi tomographique (voir ressource « *La tomographie en sciences et mécanique des matériaux* ») de la fissuration due au séchage et le traitement des images obtenues (voir ressource « *Présentation générale de la corrélation d'images numériques* »).

1 – Introduction

Le béton est un matériau présentant une importante hétérogénéité, qui induit son comportement mécanique particulier lorsqu'il est soumis à diverses sollicitations. En jouant sur les proportions et le choix de composition des phases le constituant, il a été possible d'établir le panel de bétons connu aujourd'hui (Béton Ordinaire, Béton Haute Performance, Béton Auto-Plaçant), qui présentent des propriétés différentes, ce qui complexifie l'étude de ce matériau sous sollicitation.

Les deux principales phases présentes sont la pâte de ciment (la matrice) et les granulats (les inclusions). Ce matériau composite présente de plus une zone sensible à l'interface granulats-pâte de ciment : on l'appelle auréole de transition (voir « *Annexe : Composition du béton* »). Cette zone pourra représenter un point faible lors des sollicitations mécaniques ou de séchage (elle est en effet généralement caractérisée par une porosité plus élevée).

2 – Le séchage du béton

Le séchage du béton est un phénomène complexe mêlant plusieurs mécanismes. Un béton dans un environnement à l'humidité relative inférieure à celle régnant au sein du matériau, subit un déséquilibre hygrométrique. Pour retrouver un état d'équilibre, un mouvement d'eau se met en place à l'intérieur du matériau vers l'environnement extérieur conduisant au séchage. Ce

¹ Laboratoire de Mécanique et Technologie, ENS Cachan [1]

mouvement d'eau se réalise à travers divers phénomènes : la diffusion de la vapeur d'eau, la perméation ou mouvement darcéen de l'eau liquide, l'évaporation/condensation et l'absorption/désorption (figure 1). Le séchage est un phénomène très lent qui, à titre d'exemple, peut durer une centaine d'années pour des structures très massives.

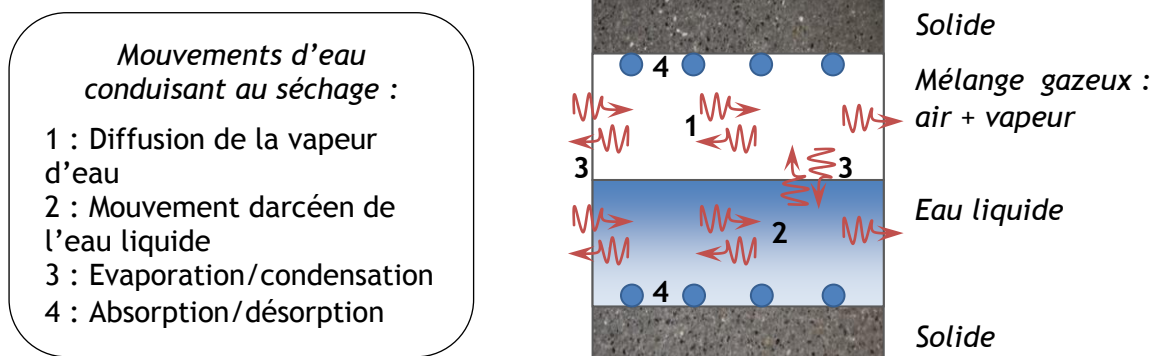


Figure 1 : Représentation des mécanismes de transport de l'eau dans la pâte de ciment [3]

3 – La fissuration due au séchage

Au moment du séchage, deux mécanismes de fissuration apparaissent. Le premier est provoqué par le gradient hydrique évoqué plus haut induisant des gradients de déformation et de contrainte (figure 2). Ce phénomène est à l'origine de fissures superficielles souvent visibles à l'œil nu mais difficilement évaluables quant à sa profondeur. La déformation apparente provoquée par le séchage est appelée **retrait de dessiccation**.

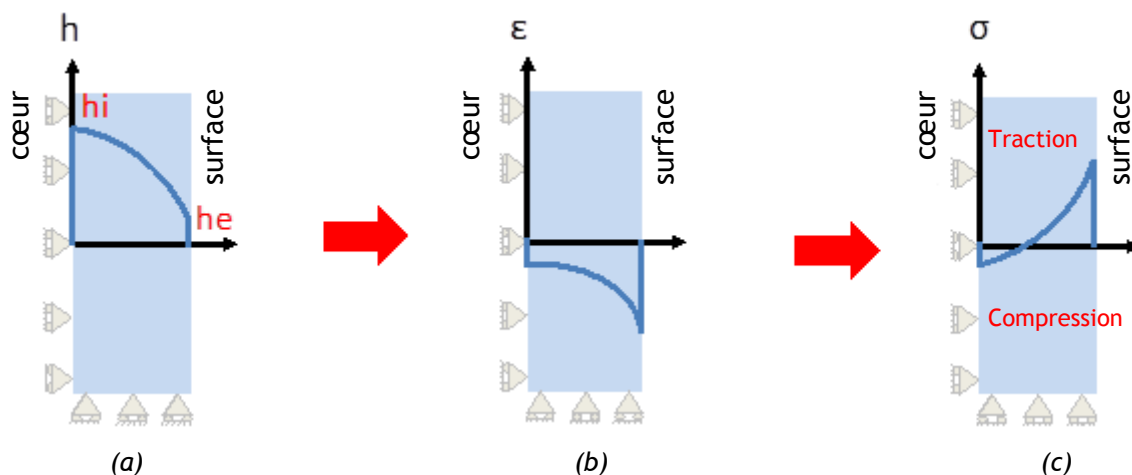


Figure 2 : Gradient hydrique (a) et gradients induits de déformation (b) et de contrainte (c)

Le deuxième mécanisme de fissuration est interne au béton, dû à une incompatibilité des déformations des éléments constitutifs du matériau (figure 3). Le béton est hétérogène (voir « Annexe : Composition du béton ») constitué d'une matrice qui se contracte lors du séchage, et d'inclusions généralement stables vis-à-vis du phénomène de séchage. Ces inclusions gênent le retrait de la matrice, induisant de la traction pouvant dépasser les limites en traction de la matrice, générant alors des fissurations réparties autour des inclusions et d'une inclusion à une autre.

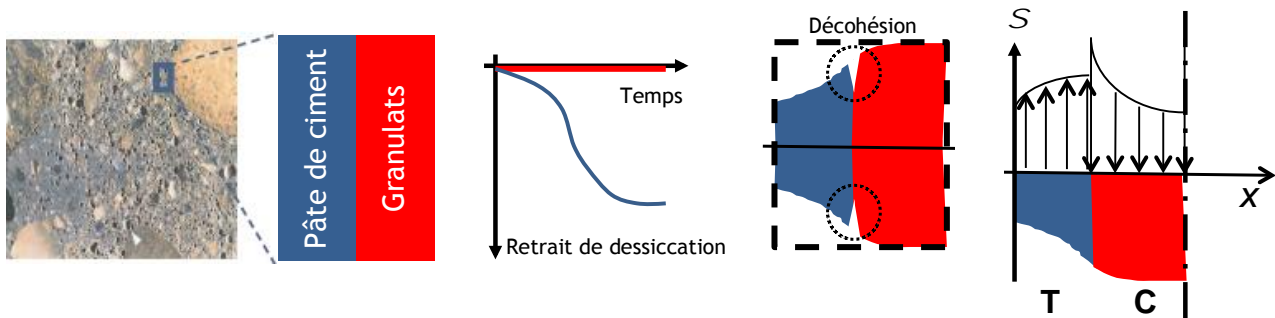


Figure 3 : Incompatibilité des déformations des éléments constitutifs du béton (pâte de ciment, granulats)

4 – Formulation du béton

Pour analyser de manière simplifiée le comportement vis-à-vis du séchage des matériaux cimentaires, le béton étudié dans cette ressource est un béton modèle dont les granulats ont des fuseaux de tailles définies de 8 mm à 12,5 mm et sont inclus dans la matrice pâte de ciment avec une fraction volumique égale à 30% du volume total.

La ségrégation est un risque important dans le cas de ce type de formulation, l'utilisation d'un agent viscosant est donc requise, et une étude du comportement lors du coulage de ce matériau est nécessaire.

4.1 - Essai au cône de Marsh pour la pâte de ciment seule

L'essai au cône de Marsh consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant une quantité fixe de coulis de pâte de ciment à travers un orifice d'évacuation (figure 4). Cette méthode permet de déterminer le dosage optimal de viscosant et de superplastifiant à ajouter dans une formulation : en effet, au delà d'un certain dosage, l'ajout d'adjuvant ne modifie plus, voire altère (en rendant trop visqueux ou trop fluide) la fluidité du mélange. Un surdosage serait donc inutile et coûteux.

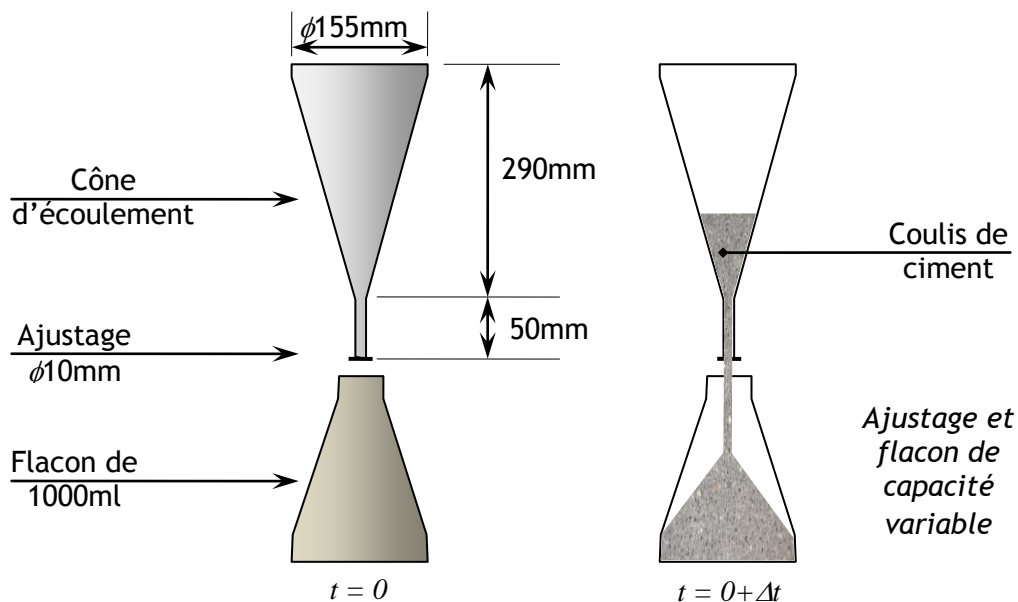


Figure 4 : Schéma de l'essai au cône de Marsh

Dans le cas du béton étudié, la viscosité du coulis augmente avec l'augmentation du dosage en viscosant jusqu'à un plafond. L'essai effectué indique un dosage optimal en viscosant de 0,8% (figure 5). Néanmoins, ce dosage optimal va être de nouveau mis en cause dans le cas de

l'incorporation de granulats dans le mélange. Des essais de formulation restent donc nécessaires pour optimiser de nouveau ce paramètre pour le béton.

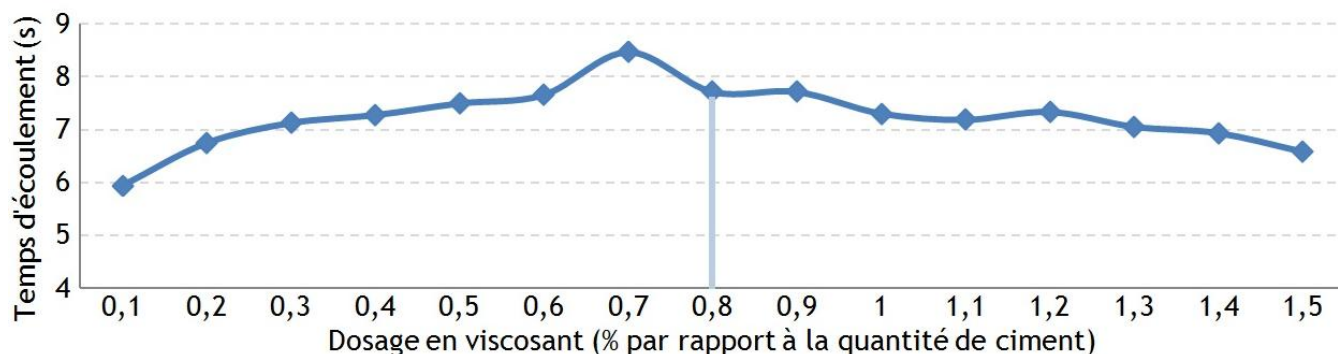


Figure 5 : Essai au cône de Marsh : dosage en viscosant

4.2 - Optimisation sur béton modèle

Afin de valider le dosage en viscosant et plastifiant du béton modèle, des éprouvettes sont coulées pour vérifier la bonne distribution des granulats et de la pâte de ciment dans les éprouvettes fabriquées (non ségrégation des granulats et homogénéité de l'état de surface par une bonne diffusion de la pâte de ciment dans l'ensemble du moule). Le phénomène de ségrégation consiste en un classement des grains selon leur grosseur provoquant des excès de particules fines ou grosses dans certaines régions. Cet effet de ségrégation peut se produire dans un béton trop fluide [4]. Ces effets peuvent induire alors des irrégularités de résistance mécanique, l'apparition de bulles d'air, une irrégularité de surface pénalisant esthétiquement. Trois paramètres ont un impact important sur la ségrégation :

- **Le dosage en viscosant** : en l'augmentant, on augmente la viscosité du béton et permet le maintien des granulats en suspension.
- **Le dosage en plastifiant** : adjuvant qui a tendance à augmenter la fluidité du béton.
- **La vibration** : permet de chasser les bulles d'air emprisonnées, mais peut favoriser la chute des granulats.

En gardant les dosages de ciment et eau, des essais ont été réalisés en jouant sur ces trois paramètres (voir tableau figure 6). Les éprouvettes coulées correspondantes sont visibles figures 7 et 8.

Numéro éprouvette	Plastifiant	Viscosant	Vibration
1	0%	0,8%	oui
1bis	0%	0,8%	non
2	0%	1,6%	oui
2bis	0%	1,6%	non
3	0,35%	3,2%	oui
3bis	0,35%	3,2%	non

Figure 6 : Différents dosages testés par éprouvette

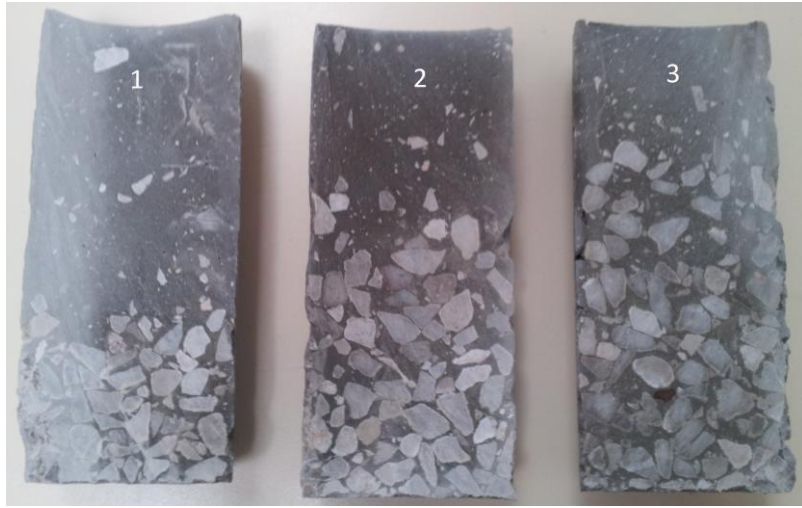


Figure 7 : Coupes des éprouvettes N° 1, 2 et 3 (vibrées)



Figure 8 : Coupes des éprouvettes N° 1bis, 2bis et 3bis (non vibrées)

La ségrégation est très présente sur les éprouvettes vibrées. Des éprouvettes non vibrées, la 2bis présente une meilleure répartition des granulats sur toute la hauteur. La formulation retenue pour le béton modèle étudié est donc la configuration de l'éprouvette 2 bis (tableau figure 9).

Matrice	E/C	G1 (6-8mm)	G2 (10-12.5mm)	Plastifiant	Viscosant	Vibration
Pâte de ciment	0,57	0%	30%	0%	1,6	non

Figure 9 : Composition du béton retenu pour l'étude

5 – Observation expérimentale de la fissuration sous séchage accéléré en étuve

Les éprouvettes cylindriques de 7 cm de diamètre et 16 cm de hauteur nécessitent un temps de séchage naturel important (voir paragraphe 2), aussi pour cette étude le séchage est accéléré.

5.1 - Séchage accéléré

Les éprouvettes sont démoulées 24 heures après le coulage ce qui correspondant à la phase d'hydratation du béton durant laquelle il va acquérir ses propriétés mécaniques structurales (solidification du béton) ; elles sont ensuite préparées pour suivre une cure endogène de 28 jours durant laquelle elles vont poursuivre leur hydratation jusqu'à obtenir leurs propriétés mécaniques finales. Cela consiste à emballer les éprouvettes dans une couche de film

plastique puis une couche d'aluminium pour empêcher les échanges avec le milieu extérieur. Entreposées pendant 28 jours, les éprouvettes sont ensuite placées dans une étuve à 105°C durant 7 jours afin de les sécher complètement de manière accélérée (départ de toute eau libre et de l'eau liée contenue dans le matériau). La perte de masse rend compte de l'état de séchage de l'éprouvette durant ces 7 jours (figure 10). On observe notamment une stabilisation de la masse qui rend compte de l'état total de l'éprouvette. La perte en masse de l'échantillon, $\Delta m(t)$ est calculée comme suit :

$$\Delta m(t) = \frac{m_{\text{initiale}} - m_{\text{finale}}}{m_{\text{initiale}}} \times 100$$

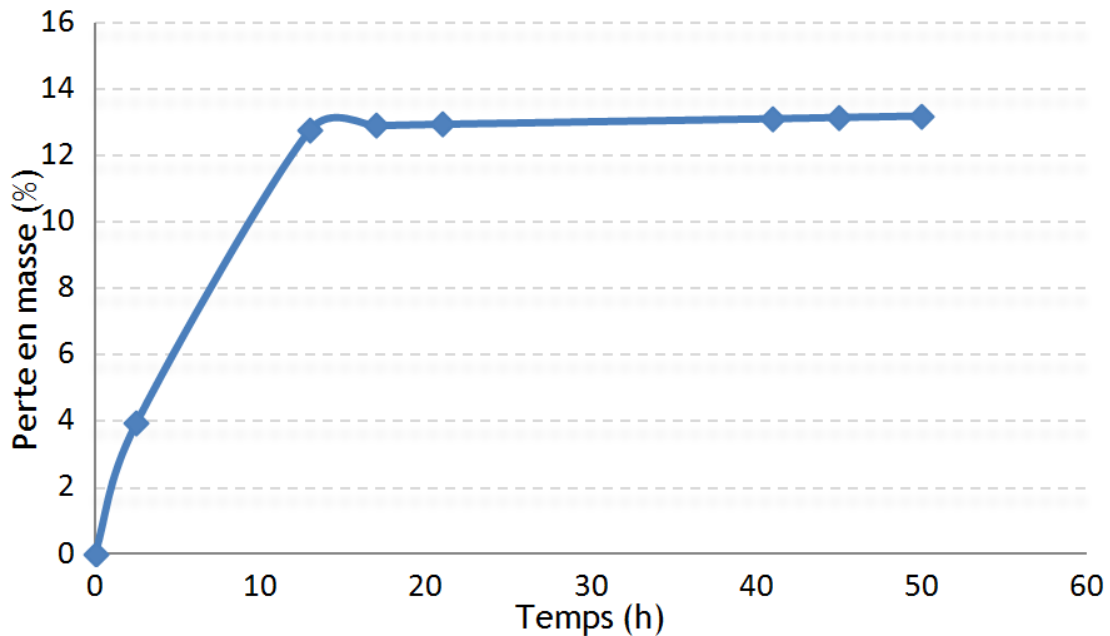


Figure 10 : Perte en masse $\Delta m(t)$ d'une éprouvette lors du séchage

5.2 - Incidence sur les caractéristiques mécaniques

L'effet du séchage sur la dégradation des propriétés mécaniques en association avec la fissuration est visualisé par des essais de flexion 3 points (figure 11) réalisés sur des **éprouvettes avant séchage** (après la cure endogène de 28 jours) et sur des **éprouvettes après séchage** accéléré en étuve (durant 7 jours).



Figure 11 : Dispositif expérimental des essais de flexion 3 points

Les essais réalisés sur les deux types d'éprouvette (figure 12) montrent que celle ayant subi le séchage accéléré présente une diminution de sa résistance en flexion ($F_{max} = 1050 N$ contre $F_{max} = 3200 N$ pour l'éprouvette non séchée) ainsi qu'une ductilité plus importante (figure 13). Le module d'Young chute d'environ 77% ($E = 5,7 GPa$). L'évolution de ces caractéristiques est à relier à une fissuration apparue lors du séchage. Ceci reste à confirmer par une observation de cette fissuration.

	<i>Eprouvette sans séchage</i>	<i>Eprouvette avec séchage</i>
$F_{max} (N)$	3200	1050
$E (GPa)$	25	5,7

Figure 12 : Résultats des essais de flexion 3 points réalisés sur les 2 types d'éprouvette

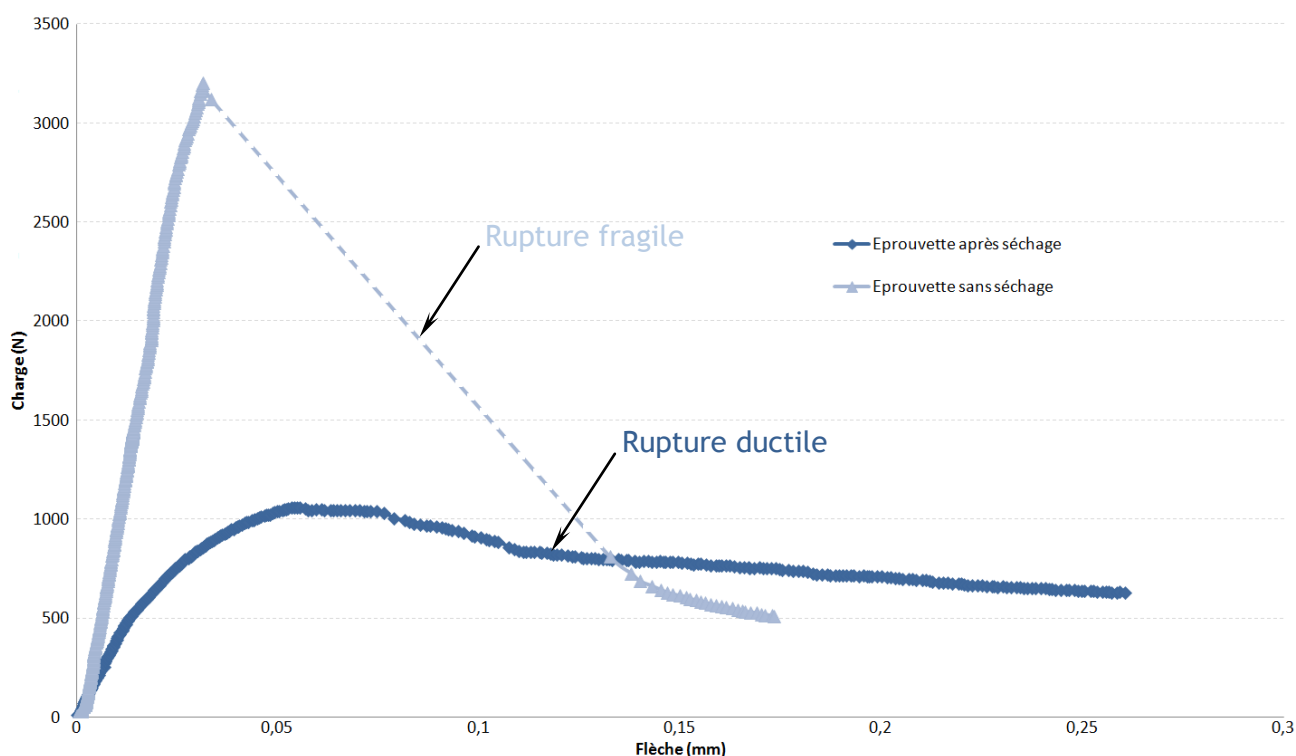


Figure 13 : Courbes charge-flèche, essais de flexion 3 points sur éprouvettes sans séchage (clair) et après séchage (foncé)

5.2 - Suivi tomographique de la fissuration due au séchage

La tomographie par absorption de rayons X est une technique non destructive d'acquisition d'images de la structure d'un matériau. Le principe de la tomographie (voir ressource « *La tomographie en sciences et mécanique des matériaux* ») consiste en la reconstruction du volume 3D à partir de l'acquisition d'une série de radiographies 2D du matériau.

Afin de comprendre le phénomène de fissuration due au séchage, deux images 3D d'une même éprouvette sont réalisées par tomographie : la première est réalisée sur l'éprouvette sortant de la cure endogène de 28 jours (figure 14), la seconde sur cette même éprouvette après le séchage en étuve de 7 jours et son refroidissement (figure 15). On voit apparaître des fissures sur l'éprouvette après séchage.

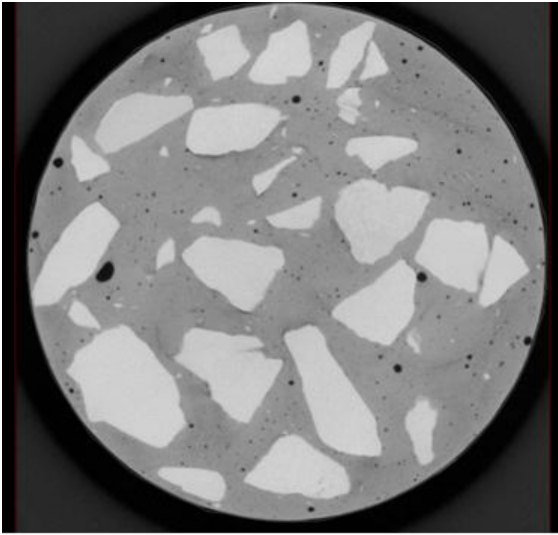


Figure 14 : Image issue de la tomographie éprouvette avant séchage

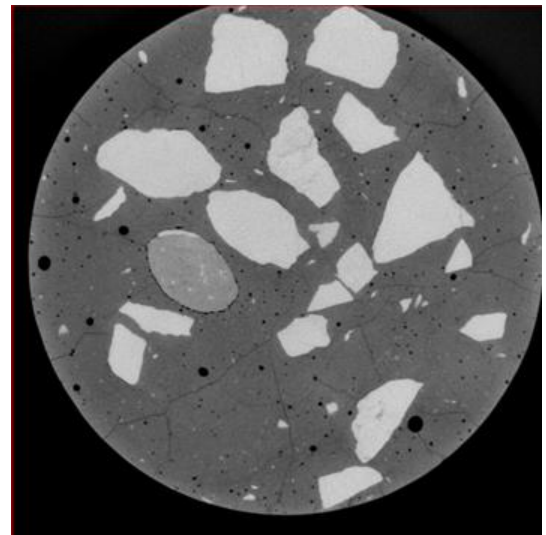


Figure 15 : Image issue de la tomographie éprouvette après séchage

5.3 - Corrélation volumique

La méthode de traitement des deux images est la corrélation d'images volumiques, extension de la corrélation d'images numériques (voir ressource « *Présentation générale de la corrélation d'images numériques* »). La méthode consiste à suivre de petits volumes de matériau, les ROI², dans les cas référence et déformé afin de déterminer leur champ de déplacement.

Les champs de déplacement sont définis sur l'ensemble de la ROI et sont cinématiquement enrichis pour prendre en compte des discontinuités liées à la présence de fissurations. Une régularisation des champs de déplacement a ensuite lieu afin de s'assurer qu'ils sont mécaniquement admissibles. La différence entre la configuration déformée corrigée par le champ de déplacement estimé et la configuration de référence est appelée le résidu. Il indique les zones ne respectant pas les hypothèses cinématiques sur lesquelles la détermination du champ de déplacement a été effectuée, i.e. les zones présentant une discontinuité du champ de déplacement (les fissures).

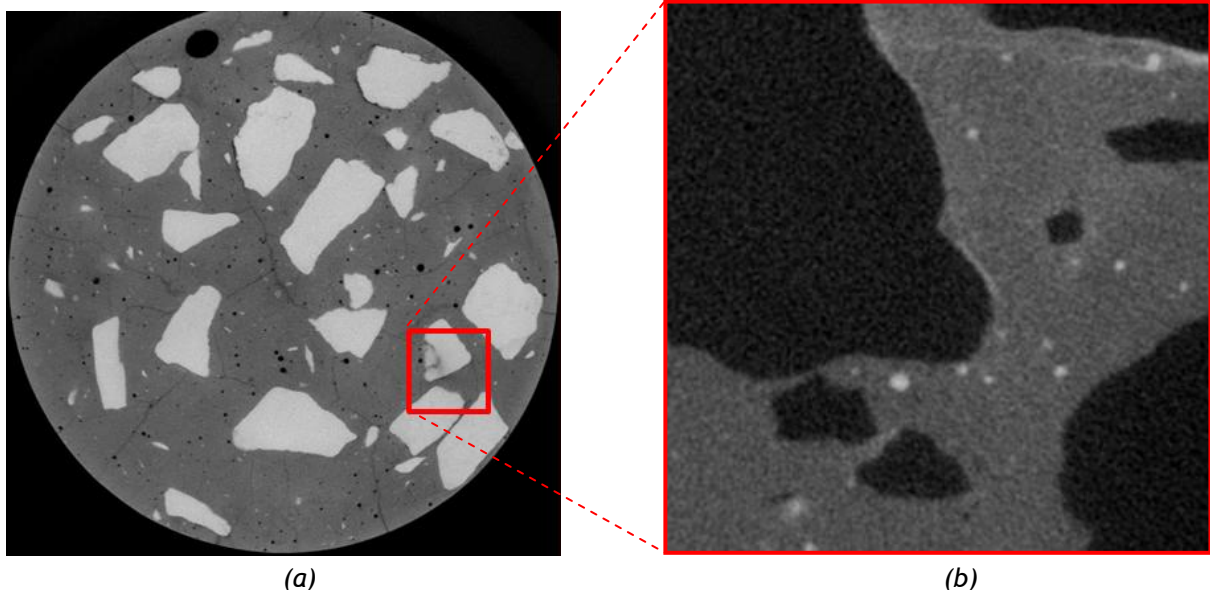


Figure 16 : (a) Choix du sous volume (ici indiqué par un encadré rouge),
(b) sous volume choisi 300x300x300 pixels (ROI)

² ROI : Region Of Interest, région d'intérêt

Une zone d'études ou ROI (figure 16) est reconstruite numériquement en deux volumes avant séchage (volume de référence, figure 17a) et après séchage (volume déformé, figure 17b). Les échelles de niveau de gris et/ou couleur différent d'une figure à l'autre, le séchage de la pâte de ciment lui faisant subir des modifications qui remanient le niveau de gris affecté aux projections.

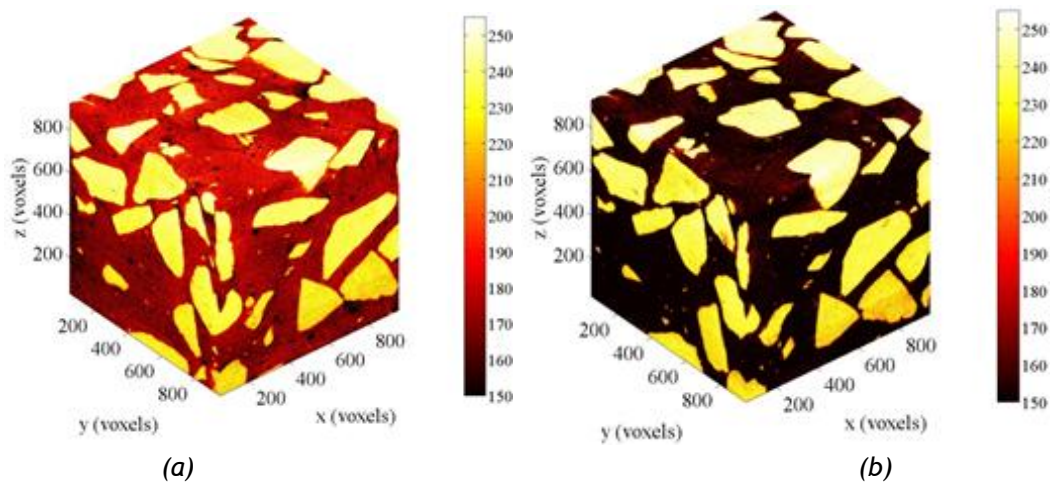


Figure 17 : Reconstruction tomographique du volume avant séchage (a) et après séchage (b)

Lorsque le résidu (référence à la définition donnée précédemment) de l'étude est généré et après segmentation, l'accès au réseau de fissures est possible (en 2D, figure 18 puis en 3D, figure 19). La précision du tracé de la fissuration dépend de la finesse du maillage et du filtrage des bruits présents sur les images (encore très important sur l'analyse faite figure 17).

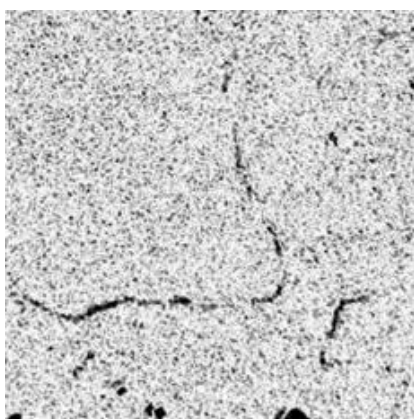


Figure 18 : Production 2D du résidu

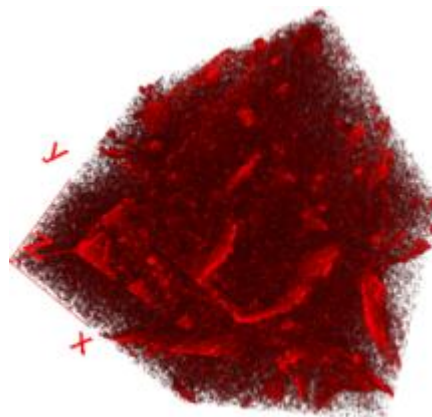
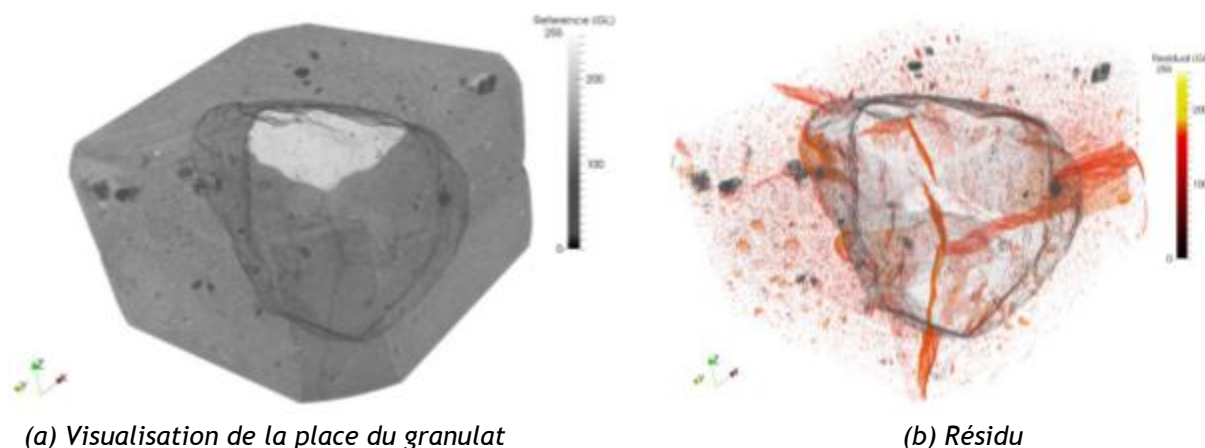


Figure 19 : Reconstruction tomographique 3D du résidu

Des résultats moins bruités (figure 20) ont pu être obtenus depuis cette première étude dans le cadre de la thèse de M. Malbois.



(a) Visualisation de la place du granulat (b) Résidu
Figure 20 : Suivi tomographique de la fissuration d'un échantillon matrice/granulat isolé après un séchage à $HR = 35\% \pm 5\%$ (HR : humidité relative)

6 – Conclusion

Les éprouvettes élaborées à partir d'une formulation optimisée de béton modèle étudiées avant puis, après un séchage accéléré en étuve, a permis de montrer les effets du séchage sur la génération de fissures. Le suivi tomographique permet de visualiser le réseau de fissures, qui a été quantifié (ouverture des fissures et longueur) dans les travaux ultérieurs.

Ces premiers essais réalisés durant le stage de Marie Malbois ont permis d'établir le protocole de réalisation (formulation, pourcentages de granulats incorporés, conditions de fabrication) et d'essais (modes de quantifications des effets mécaniques induits) des matériaux modèles qui ont depuis été utilisés dans le cadre de sa thèse et d'un projet d'ANR MOSAIC³ visant à étudier l'influence de l'hétérogénéité des matériaux cimentaires sur leur comportement sous diverses pathologies (séchage ou Réaction Sulfatique Interne RSI). Ainsi, la formulation a été optimisée pour permettre une distribution spatiale adéquate des inclusions dans les matériaux contrôlés en termes d'inclusions (limitation à un fuseau resserré de dimensions de granulats).

La possibilité de suivi tomographique pour la quantification de l'évolution du réseau de fissures a été validée, en complément de la mesure de l'évolution des caractéristiques mécaniques (qui en dépend) par des essais de flexion 3 points. Les essais menés dans le cadre de la thèse de Marie Malbois au Laboratoire de Mécanique et de Technologie [1] sont à présent menés pour différentes tailles et pourcentages en granulats incorporés dans une matrice de type « pâte de ciment » et « mortier », sous un séchage naturel sur des durées expérimentales beaucoup plus longues de plus de 200 jours. Les premiers résultats obtenus montrent une influence marquée du pourcentage d'inclusions et beaucoup plus faible de la taille des inclusions.

Références :

[1]: <http://www.lmt.ens-cachan.fr/>

[2]: M. Malbois, Influence des hétérogénéités du béton sur son comportement induit sous séchage, mémoire de stage de master 2^e année, LMT - ENS Cachan, juin 2014

[3]: V. Baroghel-Bouny, M. Mainguy, T. Lassabatere et O. Coussy, Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials (1999)

[4]: Ségrégation du béton frais, Bulletin du ciment, 1955

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>

³ MOSAIC : Mesoscopic Scale durability Investigations for Concrete