

# Étude expérimentale et numérique des matériaux cimentaires sous sollicitation hydro-mécanique

Soleilhet François<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LMT, ENS Cachan, CNRS, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France, francois.soleilhet@ens-cachan.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

---

*RÉSUMÉ. Les matériaux cimentaires et notamment le béton sont parmi les matériaux principalement utilisés dans la construction des ouvrages de génie civil. Les enjeux de durabilité incitent à prédire leurs propriétés à long terme, étroitement liées aux risques de fissuration. Néanmoins, l'histoire de chargement hydrique génère des contraintes internes impactant ses propriétés tant en terme de résistance que de module de Young ou bien encore d'énergie dissipée. Dans le cadre de cette communication, une étude expérimentale sur l'effet de la dessiccation sur les propriétés mécaniques du béton est menée, sous des conditions hydriques variées. En concordance avec les résultats observés, cet effet est inclus dans un processus de simulation prenant comme étape la détermination de l'état hydrique du matériau, la modélisation des déformations de retrait induites et se terminant par le calcul mécanique. Ceci permettra de prédire l'évolution des caractéristiques mécaniques, la fissuration induite et les propriétés de transports résiduelles du béton dans le temps.*

*ABSTRACT. Cementitious material and more particularly concrete are the most widely used construction material. The prediction of their long term mechanical properties, closely linked to cracking risks, is then of great importance for durability issues. Nevertheless, the development of internal stresses generated by drying affect these latter especially the mechanical strength, the elasticity modulus and the dissipated energy. In this paper, an experimental campaign has been carried out in order to study the impact of drying process on concrete's mechanical behavior. In agreement with the experimental results, the drying effects are modeled in a process taking into account the calculation of the water state of the material, the simulation the induced shrinkage strains and ending in mechanical computation. The evolution of the mechanical characteristics, induced cracking and residual transport properties of the material can thus be determined.*

*MOTS-CLÉS : béton, dessiccation, retrait, fissuration, transfert de masse*

*KEYWORDS: concrete, drying, shrinkage, fracture, mass transfert*

---

Les matériaux cimentaires sont ceux les plus utilisés dans les ouvrages du génie civil. Que ce soit dans les domaines de l'habitation, des transports ou bien encore de l'énergie, ils sont utilisés massivement et doivent faire face à un environnement varié et parfois agressif. Aujourd'hui la durabilité des constructions est un enjeu majeur et pour répondre à cette problématique il est nécessaire, entre autre, de prédire le comportement à long terme des ouvrages. Néanmoins cette tâche reste ardue. La grande hétérogénéité du matériau combinée aux sollicitations multiples (thermique, chimique, hydrique, mécanique) rend l'oeuvre complexe.

L'objectif de ce travail est de prendre en compte les effets de la dessiccation dans la détermination des propriétés mécaniques et du comportement macroscopique des ouvrages en béton. En effet, conventionnellement, lorsque les propriétés mécaniques du béton sont caractérisées, les contraintes internes ne sont pas considérées et les phénomènes de dessiccation ne sont pas pris en compte. Néanmoins, le gradient hydrique entre la surface et le coeur d'une structure en béton peut mener à un état de contrainte hétérogène et engendrer une micro fissuration conséquente. Dans certains cas (durabilité, étanchéité), ce phénomène peut-être d'une importance majeure.

Bien qu'il semble remarquable, l'impact du séchage et de la micro-fissuration sur les propriétés mécaniques n'est pas beaucoup étudié. Si on s'intéresse au module de Young, beaucoup d'auteurs constatent une diminution de l'ordre de 4 à 30 % avec le séchage [WIT 70]. En ce qui concerne la résistance en compression, aucun consensus n'est trouvé. Certains auteurs rapportent une augmentation [YUR 06] tandis que d'autres une diminution [HAN 68]. Pour ce qui est de la résistance à la traction, une légère augmentation est constaté sur les essais de fendage [HAN 68] tandis qu'une diminution initiale suivie d'une augmentation progressive jusqu'à atteindre une humidité relative de 0 % est remarqué en flexion [PIH 74]. Une diminution suivie d'une augmentation est aussi mesurée sur les essais de traction directs [FOU 85].

Il est notable que dans la description du phénomène trois facteurs prépondérant peuvent être dégagés. L'un d'eux, la pression capillaire, améliore la résistance du matériau et les deux autres, le gradient hydrique ainsi que l'incompatibilité de déformation entre la pâte et les granulats, vont diminuer les caractéristiques mécaniques à long terme.

Peu d'études comparent l'influence de la dessiccation sur les propriétés mécaniques en mettant en regard les résultats obtenus suivant les différentes méthodes de caractérisations standards. Ce travail de thèse développe, dans un premier temps, des campagnes expérimentales d'investigation des effets de la dessiccation sous humidités relatives et températures variées. Et se poursuit dans un second temps par des simulations numériques s'appuyant sur les expériences réalisées.

## 2 Quantification expérimentales des effets hydro-mécaniques

### 2.1 Matériaux

Dans le cadre de ce travail, le béton utilisé dans le projet VeRCoRs développé par EDF [GAL 12] a été utilisé. Le choix s'est porté sur ce matériau à la fois pour ses caractéristiques représentatives des ouvrages du Parc nucléaires français mais aussi pour les quantités d'informations mises à disposition sur le matériau (courbes de perte en masse, de retrait, de fluage). Ses caractéristiques mécaniques sont : une résistance à la compression moyenne à 28 jours de 40.75 MPa, une résistance à la traction (par fendage) égale à 3.5 MPa ainsi qu'un module d'Young moyen de 32.2 GPa, le tout obtenus sur des éprouvettes (16x32 cm).

**Tableau 1.** Formulation du béton.

Composant	Nature	Quantité	Unité
Cement	CEM I 52,5 R	320	$kg.m^{-3}$
Sable	Siliceux	830	$kg.m^{-3}$
Granulats (4-11mm)	Calcaire	445	$kg.m^{-3}$
Granulats (8-16mm)	Calcaire	550	$kg.m^{-3}$
Eau (total)		197.6	$kg.m^{-3}$
Plastifiant	SIKAPLAST Techno 80	2.75	$kg.m^{-3}$

Le béton VerCoRe est composé de ciment Portland (CEM17 avec une teneur en eau de 15,00/15,15 (15,15 min) sur ciment de 0.62. De plus, un plastifiant est introduit pour améliorer la maniabilité. La composition et les propriétés des granulats utilisés sont donnés dans la table 1. Pour réduire les erreurs dus à la variabilité inhérente à la fabrication, toutes les

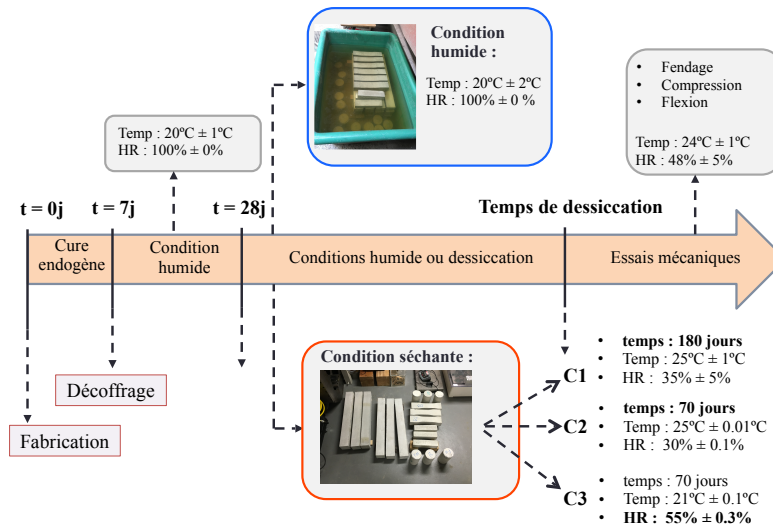


Figure 1. Protocole expérimental.

échantillons de chaque campagne, ont été fabriqués en une seule gachée. Puis elles ont toutes suivies le même protocole, présenté sur la figure 1. Une première cure endogène a été respectée jusqu'au 7<sup>me</sup> jours après coulage. Puis les échantillons ont été protégés de la dessiccation par un stockage dans une eau basique jusqu'au 28<sup>me</sup> jours après coulage. À la fin de cette période, les échantillons ont été séparés en deux lots. Les échantillons du premier lot (le lot référence en bleu) sont laissés dans l'eau tandis que le reste est placé dans des conditions contrôlées en humidité et en température. Les tests sont effectués après une période de dessiccation fixée suivant la campagne.

## 2.2 Mesure de la perte en masse

Dans la prise en compte des effets hydro-mécaniques, la caractérisation de l'état hydrique est une partie clé du processus. Afin de quantifier cet état, des mesures de pertes en masse sont réalisées pour les trois campagnes figure (2). Une fois sortie de l'eau après la phase de maturation, les différents échantillons, sont placés dans des conditions d'humidité et de température contrôlées.

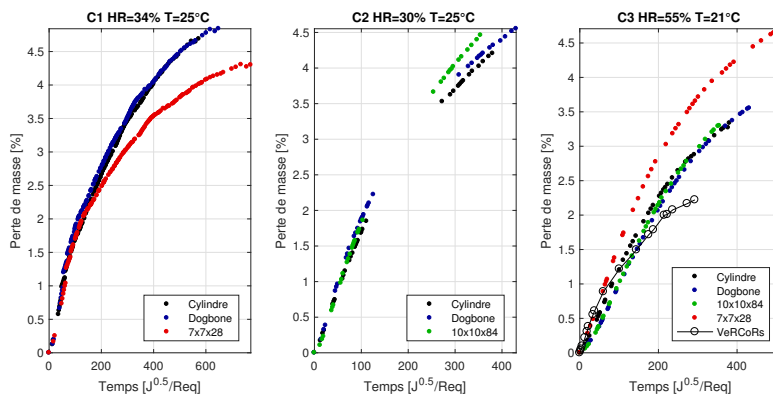


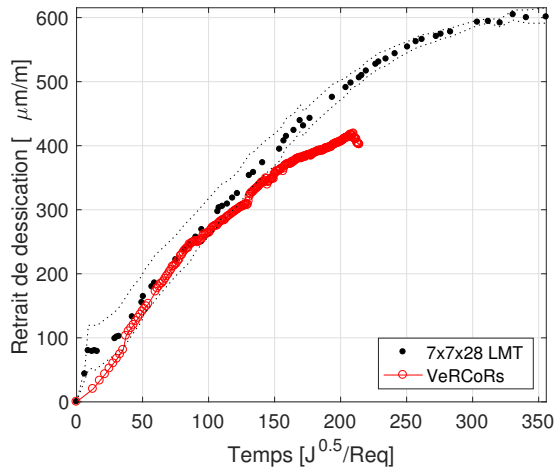
Figure 2. Pertes en masse

Pour comparer la dessiccation des différents échantillons, il est possible de l'exprimer en fonction de  $\frac{\sqrt{t}}{R_{eq}}$  (avec  $t$  le temps et  $R_{eq}$  le rayon équivalent). Ainsi, on observe suivant les trois campagnes une superposition des courbes

dans les premières phases de dessiccation puis une discordance pour certaines sur le plus long terme. Les données de VeRCoRs sont comparées à la campagne 3 (conditions similaires). Malgré un ralentissement de la perte en masse après  $200 \sqrt{J} \cdot Req^{-1}$  les courbes concordent. Ce ralentissement est probablement dû à un changement, non souhaité, des conditions de conservation des éprouvettes VeRCoRs.

### 2.3 Mesure du retrait de dessiccation

Bien que des informations relatives au retrait de dessiccation soient disponibles dans le benchmark VeRCoRs, des mesures de retrait sur des éprouvettes 7x7x28 cm sont réalisées en complément. Au regard de la figure 3(a), on observe une bonne concordance entre le matériau réalisé et le béton de VeRCoRs. On note néanmoins que l'écart décrit ci-avant entraîne un ralentissement cohérent du retrait de dessiccation référence.



(a) Evolution du retrait de dessiccation



(b) Bâti de mesure de retrait

**Figure 3.** Quantification du retrait de dessiccation.

## 2.4 Essais mécaniques

### 2.4.1 Présentation des essais réalisés

**Essai de fendage :** Les essais de fendage et de compression ont été réalisés à l'aide d'une machine hydraulique d'une capacité de 2500 kN. Cette dernière est composée d'un plateau rigide en partie basse et d'une rotule en partie haute. Les essais ont été réalisés en accord avec la norme européenne NF-EN-12390. L'essai a été réalisé sous un chargement en force jusqu'à rupture, avec une vitesse de montée en charge de  $1.94 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ . Une attention particulière a été portée afin de limiter l'excentricité du chargement.

**Essai de compression :** Le pilotage de l'essai est réalisé en force avec une vitesse de chargement de  $5 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ . Une cage d'extensométrie composée de trois LVDTs est utilisée pour mesurer les déformations. Pour obtenir le module de Young, trois cycles de charges, jusqu'à 30 % de la valeur de la résistance en compression, puis décharges sont effectués. Enfin l'essai est mené à terme jusqu'à rupture de l'éprouvette.

**Essai de flexion :** Les essais de flexion, entaillé et non entaillé, ont été réalisés sur une machine hydraulique de 10 kN. Un chargement sous une vitesse de déplacement de  $200 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  a été adopté. Cette vitesse a été choisie pour atteindre la fin de la zone élastique en un temps compris entre 30 secondes et une minute. L'éprouvette a été équipée à mi portée d'un LVDT, pour mesurer la flèche de la poutre.

### 2.4.2 Résultats expérimentaux

Par souci de concision, seuls les résultats des éprouvettes de flexion entaillées seront présentés (figure 4). Les résultats correspondent à la valeur moyenne de trois échantillons. Sur les comportements macroscopiques, il est possible de distinguer deux phases distinctes. Une première phase de montée élastique jusqu'au pic d'effort puis



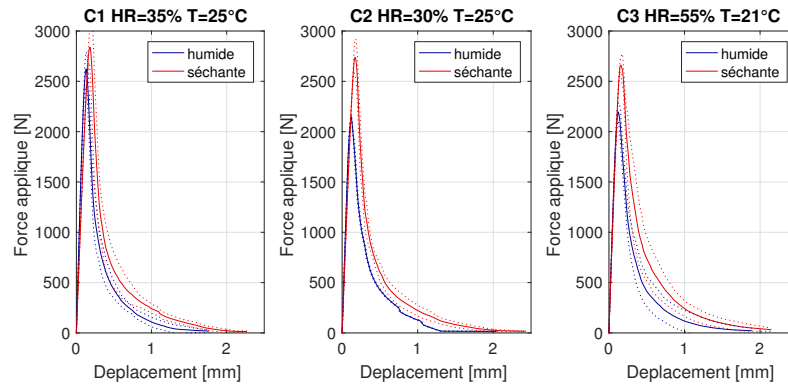


Figure 4. Comportement force-déplacement des poutres entaillées sur 20 % de la hauteur.

La figure 5, illustre l'influence de la dessiccation sur la réponse à l'essai de flexion entaillé.

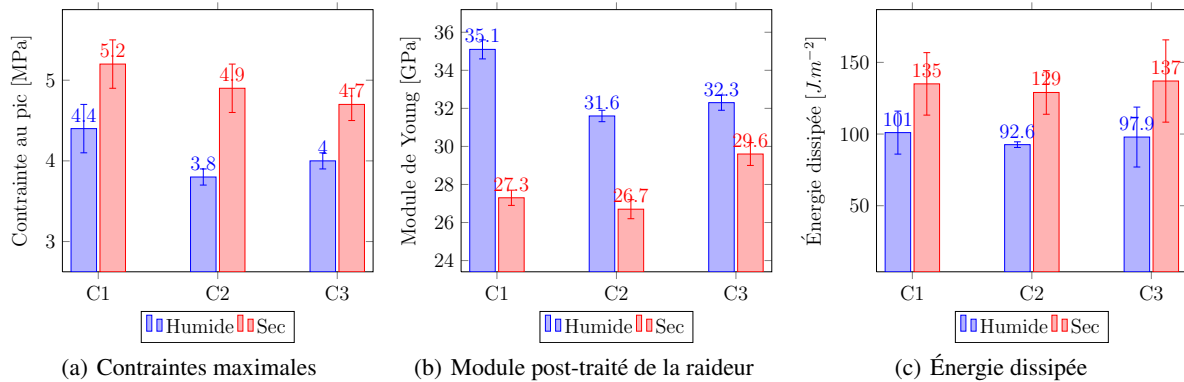


Figure 5. Quantités d'intérêts.

Si on s'intéresse aux contraintes au pic, figure 5(a), on observe une faible variabilité sur la valeur moyenne des contraintes entre campagnes sur éprouvettes humides. Il est notable ensuite que la dessiccation des éprouvettes augmente la contrainte au pic. Cette augmentation n'est pour l'instant pas expliquée. Dans le cas de la flexion non entaillée la résistance au pic d'effort semble légèrement affectée mais il est difficile de conclure à la vue des écarts types et du nombre de réalisations. Ainsi au regard des résultats obtenus il est étonnant d'avoir une très forte augmentation de la contrainte au pic lorsque l'on entaille tout ou partie de la zone endommagée par le gradient hydrique.

Dans le cas du module figure 5(b), les tendances semblent plus claires. La dessiccation tend à réduire le module. Les deux phénomènes décrits en préambule jouent un rôle important mais avec des cinétiques différentes. Le gradient hydrique, qui s'exprime essentiellement dans les premiers instants diminue le module en créant un effet structural entre la peau et le cœur de l'éprouvette qui endommage le matériau. Ensuite à l'échelle de la pâte de ciment les incompatibilités de déformation entre les granulats et la pâte vont venir générer une fissuration additionnelle qui va intervenir à plus long terme.

Enfin, l'énergie dissipée, qui dans le cas du matériau humide correspond à l'énergie de fissuration (énergie nécessaire à la propagation d'une unité de fissure en mode I), évolue avec la dessiccation. Cela peut s'expliquer par l'état de micro-fissuration présent au sein de l'éprouvette. Cette dernière aura tendance à rendre le chemin de propagation de la fissure plus rugueux nécessitant plus d'énergie pour la propagation de celle-ci.

### 3.1 Stratégie de modélisation

Pour pouvoir prendre en compte les effets hydriques dans la prédiction numérique des propriétés mécaniques plusieurs étapes sont à prendre en compte, figure 6.

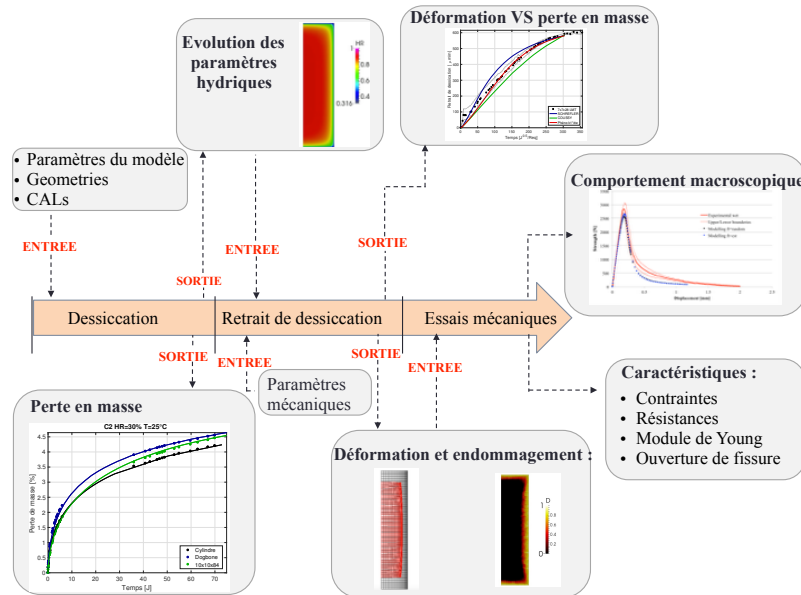


Figure 6. Processus numérique.

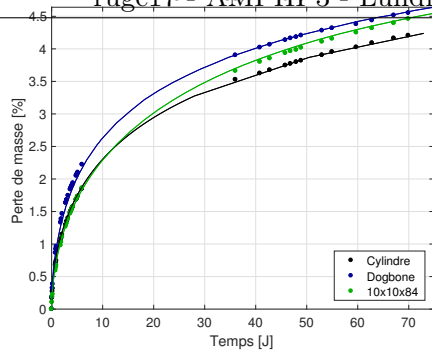
Dans le protocole présenté chaque étape est une étape nécessaire à la précédente. Ainsi, dans un premier temps l'effort de modélisation se porte sur la caractérisation de l'état hydrique du matériau. En sortie deux informations sont disponibles, l'évolution de la perte en masse et l'évolution des différents gradients hydriques moteurs du retrait de dessiccation. Vient ensuite l'étape de modélisation du retrait duquel des déformations et un endommagement pré-mécanique sont déterminés. La modélisation se poursuit avec le calcul mécanique, tenant compte de l'état post-retrait, pour déterminer des résistances mécaniques, des ouvertures de fissures ou bien tout autre quantité d'intérêt.

### 3.2 Modélisation des effets hydriques

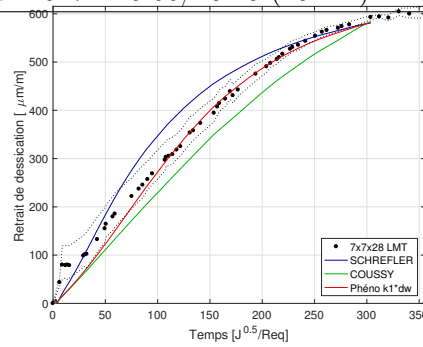
Comme dit précédemment l'une des étapes clés de la démarche de modélisation présentée ici est la caractérisation de l'état hydrique au sein du matériau. Le phénomène de dessiccation des matériaux cimentaires est un phénomène complexe. Plusieurs mécanismes, plus ou moins couplés rentrent en ligne de compte : perméation, diffusion, absorption-désorption et condensation-évaporation. Le séchage peut être analysé à travers la résolution d'une équation d'équilibre des masses de vapeurs, liquides et airs. Les hypothèses formulées dans [BAZ 87] permettent de ne considérer, dans notre cas, que l'équation d'équilibre de la phase liquide (1) :

$$\frac{\partial S_l}{\partial P_c} \frac{\partial P_c}{\partial t} = \text{div}(k_{rl}(S_l) \frac{K}{\mu_l \phi} \text{grad}(P_c)) \quad (1)$$

Ici  $S_l$ ,  $P_c$ ,  $\phi$ ,  $K$ ,  $k_{rl}$  et  $\mu_l$  sont respectivement, le degré de saturation, la pression capillaire, la porosité, la perméabilité intrinsèque, la perméabilité relative et la viscosité de l'eau liquide. Ainsi le modèle décrit présente une quantité de paramètres à identifier non négligeable. Certains peuvent être caractérisés simplement par des essais comme la porosité d'autres sont plus difficiles à déterminer. Dans ce cadre, une méthode d'identification basée sur le recalage de modèle éléments finis [NEG 15] a été développée. Enfin après identification des paramètres, il est possible de caractériser précisément l'état hydrique de l'éprouvette au moment de l'essai mécanique (figure 7(a)).



(a) Pertes en masse simulées (traits pleins)



(b) Modélisation du retrait de dessiccation.

**Figure 7.** Caractérisation de l'état hydrique

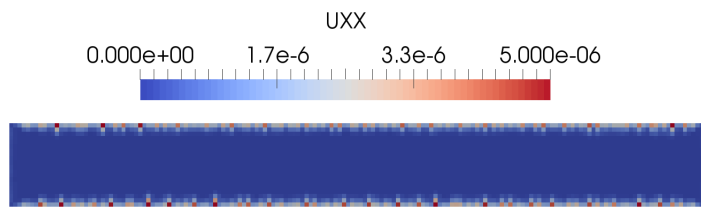
Le retrait de dessiccation quant à lui peut-être modélisé par différentes approches. Certaines de ces modélisations sont basées sur les théories de la poro-mécanique [THI 07]. D'autres modèles sont eux basés sur des observations phénoménologiques. En effet, les résultats expérimentaux trouvés dans [BAR 99] montrent une relation proportionnelle entre la variation de la teneur en eau et la vitesse de retrait de dessiccation :

$$\dot{\epsilon}_{ds} = k_{ds} \dot{\theta} \underline{\underline{1}} \quad (2)$$

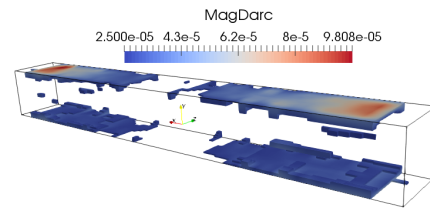
Où  $k_{ds}$  est la compressibilité hydrostatique et  $\underline{\underline{1}}$  est la matrice unité. Ainsi en se basant sur l'état hydrique déterminé préalablement en figure 7(a), il est possible de simuler le retrait de dessiccation. La figure 7(b) montre la différence entre les différentes approches. Dans le cadre de cette thèse qui n'est pas orientée uniquement sur les effets du retrait de dessiccation, une approche la plus efficace possible est recherchée. La modélisation phénoménologique illustrée sur la figure 7(b) illustre la cohérence de cette modélisation vis à vis des résultats expérimentaux.

### 3.3 Modélisation des effets mécaniques

L'état de déformation et d'endommagement post-retrait déterminés, l'essai mécanique est réalisé en tenant compte cet état initial. Les modélisations effectuées sont basées sur des simulations trois dimensions à l'aide d'un modèle d'endommagement de type Mazars, avec une régularisation énergétique. De plus pour prendre en compte l'hétérogénéité du béton, les simulations sont réalisées en prenant en compte un aléa sur la résistance en traction (coefficient de variation de 10 % et longueur de corrélation de trois fois la taille du plus gros granulat, ici 16 mm).



(a) Ouverture post-retrait suivant  $\bar{x}$  en [m]



(b) Norme de la vitesse de Darcy

**Figure 8.** Ouverture de fissure

Après avoir identifié les paramètres du modèle mécanique sur les éprouvettes humides (résistance, module, énergie de fissuration...) voir figure 9(a), les éprouvettes en condition séchante sont simulées (figure 9(b)). Ainsi, la prise en compte de l'état post-retrait influe fortement sur le comportement macroscopique. Des non-linéarités apparaissent très rapidement, diminuant la raideur ainsi que l'effort au pic. Actuellement, la modélisation présentée n'est pas représentative de l'état rencontré. En effet, le retrait de dessiccation génère bien un endommagement dans l'éprouvette néanmoins sans prise en compte du fluage, les contraintes présentes au sein du matériau sont surestimées. L'implémentation du fluage redistribue la contrainte, et diminue l'endommagement. Enfin, afin de quantifier les ouvertures de fissures, une procédure reposant sur le posttraitement de l'endommagement a été développée (figure 8(a)). L'impact de cette fissuration sur les débits traversant est quantifié (figure 8(b), pression imposée suivant l'axe z). Ainsi on note une augmentation du débit traversant de 16 % par rapport à un cas sain.

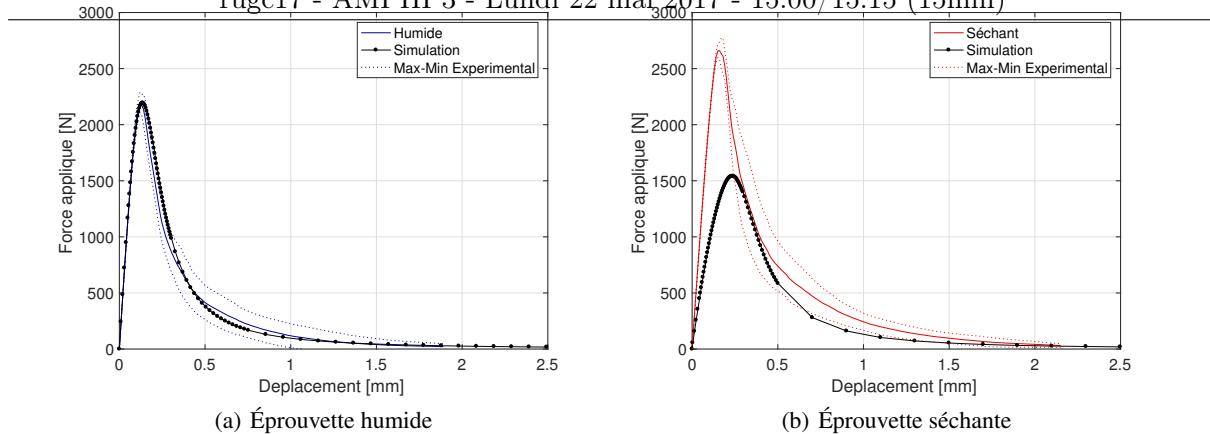


Figure 9. Résultats numériques macroscopiques

#### 4 Conclusion

Les différentes campagnes expérimentales présentées mettent en lumière l'impact de la dessiccation sur les propriétés mécaniques macroscopiques. Bien que souvent négligée dans le calcul de structure, l'influence de l'environnement sur les propriétés mécaniques est non négligeable. Ainsi, la prise en compte de ces phénomènes dans la prédiction du comportement des ouvrages est essentiel pour les structures sensibles (ponts, centrale nucléaire,...). Dans une première étape de modélisation prenant en compte seulement les effets de l'endommagement, les prédictions sous-estiment le comportement du matériau. Il est ainsi nécessaire de prendre en compte les mécanismes de fluage et de rigidification issus des pressions capillaires pour être plus prédictif. Enfin, la méthode proposée permet, pour les différentes conditions environnementales, d'extraire des faciès de fissuration afin d'obtenir des informations sur la perméabilité à l'eau, indice de la durabilité du matériau.

#### 5 Bibliographie

- [BAR 99] BAROGHEL-BOUNY V., MAINGUY M., LASSABATERE T., COUSSY O., « Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials », *Cement and concrete research*, vol. 29, n° 8, p. 1225–1238, Elsevier, 1999.
- [BAZ 87] BAZANT Z. P., SENER S., KIM J.-K., « Effect of cracking on drying permeability and diffusivity of concrete », *ACI materials journal*, vol. 84, n° 5, p. 351–357, 1987.
- [FOU 85] FOURÉ B., « Note sur la chute de résistance à la traction du béton léger consécutive à l'arrêt de la cure humide », *ANN ITBTP*, n° 432 (BETON 227), 1985.
- [GAL 12] GALENNE E., MASSON B., « A new mock-up for evaluation of the mechanical and leak-tightness behaviour of NPP containment building », *Proc., CCSC 2012*, 2012.
- [HAN 68] HANSON J., « Effects of Curing and Drying Environments on Splitting Tensile Strength of Concrete », *Journal Proceedings*, vol. 65, p. 535–543, 1968.
- [THI 07] M. THIERY V. B.-B. A., « Modélisation du séchage des bétons : analyse des différents modes de transfert hydrique », *Revue européenne de génie civil*, vol. 11, n° 5, p. 541–577, Taylor & Francis, 2007.
- [NEG 15] NEGGERS J., HOEFNAGELS J., GEERS M., HILD F., ROUX S., « Time-resolved integrated digital image correlation », *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 103, n° 3, p. 157–182, Wiley Online Library, 2015.
- [PIH 74] PIHLAJAVAARA S., « A review of some of the main results of a research on the ageing phenomena of concrete : Effect of moisture conditions on strength, shrinkage and creep of mature concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 4, n° 5, p. 761–771, Elsevier, 1974.
- [WIT 70] WITTMANN F., « Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf das Kriechen des Zementsteines », *Rheologica Acta*, vol. 9, n° 2, p. 282–287, Springer, 1970.
- [YUR 06] YURTDAS I., PENG H., BURLION N., SKOCZYLAS F., « Influences of water by cement ratio on mechanical properties of mortars submitted to drying », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 7, p. 1286–1293, Elsevier, 2006.