

Comportement des bétons : Identification numérique des propriétés effectives.

Ch. Toulemonde, Y. Le Pape, R. Masson (EDF R&D/IMMC)

J. El-Gharib (EDF R&D/IAMA)

Contexte industriel

En tant que maître d'ouvrage EDF est tenu de garantir la sûreté et la disponibilité de ses sites de production. Les nombreux ouvrages de génie civil concernés (enceintes, barrages, ...) sont soumis à des phénomènes de vieillissement associés aux conditions environnementales (température, humidité), aux conditions d'utilisation, et parfois pathologies internes.

La maîtrise des propriétés des bétons est un point crucial des dossiers. EDF R&D s'engage avec Code Aster dans une démarche de type « laboratoire virtuel » pour identifier les propriétés que les autres méthodes ne permettent pas de mesurer.

Traits spécifiques du béton

Les approches classiques peuvent être mises en échec par les bétons, quatre caractéristiques l'expliquent :

- Les formulations varient : on estime le nombre de bétons différents se situant autour du millier! On ne peut faire un plan d'expérience pluriannuel pour chacun.

- le béton est hétérogène, poreux et multiphasique.

- Caractère multi-échelle : a minima on distingue (i) la pâte de ciment (1 mm), (ii) le mortier (2 à 5 cm), (iii) le béton associant le mortier au gravier (15 cm environ). La transposition d'une échelle s'avère délicate par les méthodes d'homogénéisation analytiques lorsque les contrastes entre phases sont forts.

- Les propriétés évoluent sous l'effet des mécanismes de vieillissement généralement couplés, elles sont difficilement prédictibles par les modèles macroscopiques.

Laboratoire virtuel 3D

Sans être exhaustive l'énumération qui précède souligne des caractéristiques de ces matériaux qui posent des difficultés aux approches

macroscopiques lorsqu'il s'agit de saisir des comportements comme celui du fluage. Pour cette raison, mais aussi pour des questions de compréhension, l'expérimentation virtuelle par des approches numériques 3D est indispensable.

Difficultés

L'expérimentation virtuelle numérique 3D des bétons s'avère extrêmement complexe. Les problèmes posés par leurs microstructures sont importants : nombre important de granulats, compacité forte, formes complexes et fuseau granulaire continu.

Les bétons mettent en échec les méthodes classiques d'expérimentation virtuelle par calculs EF de microstructures. En effet, la distance minimale entre les granulats étant près de 500 fois inférieure aux dimensions caractéristiques du VER, le maillage de microstructures représentatives est en pratique impossible. Pour ces raisons EDF R&D a dû développer sa propre approche.

Béton Homogénéisé Numérique (BENHUR)

La première ambition de BENHUR a été de réaliser avec Code Aster des calculs visant à retrouver les propriétés élastiques et visqueuses des bétons, pour estimer le comportement asymptotique du fluage par exemple. Les contraintes retenues sont les suivantes :

- Tailles de maillages raisonnables (1 à 2 millions d'éléments au maximum).

- Eviter des mailles distordues ou grossières dans la matrice où se localisent les phénomènes importants.

- Réussir malgré tout à capter les effets de micro-structures.

Ces contraintes conduisent à choisir un maillage homogène en densité et à y « projeter » la CAO des granulats. Partant d'un maillage libre constitué de tétraèdres, on obtient ainsi des éléments volumiques contenant des phases différentes

Comportement des bétons : identification numérique des propriétés effectives.

Ch. Toulemonde, Y. Le Pape, R. Masson (EDF R&DIMMC) J. El-Gharib (EDF R&DIAMA)

(éléments « intermédiaires ») qui sont classés en 3 catégories en fonction du nombre de sommets intersectant des granulats.

On affecte des propriétés homogénéisées aux éléments au prorata de ce nombre de sommets. Ce processus de projection est flou car il ne contraint pas arbitrairement les éléments intermédiaires à rejoindre l'une ou l'autre des deux phases mais, au contraire, il pondère en eux le poids de chacune

Le choix du schéma d'homogénéisation retenu pour déterminer les propriétés des éléments intermédiaires est un élément important de la méthode. Nous avons abordé cette question sous deux angles :

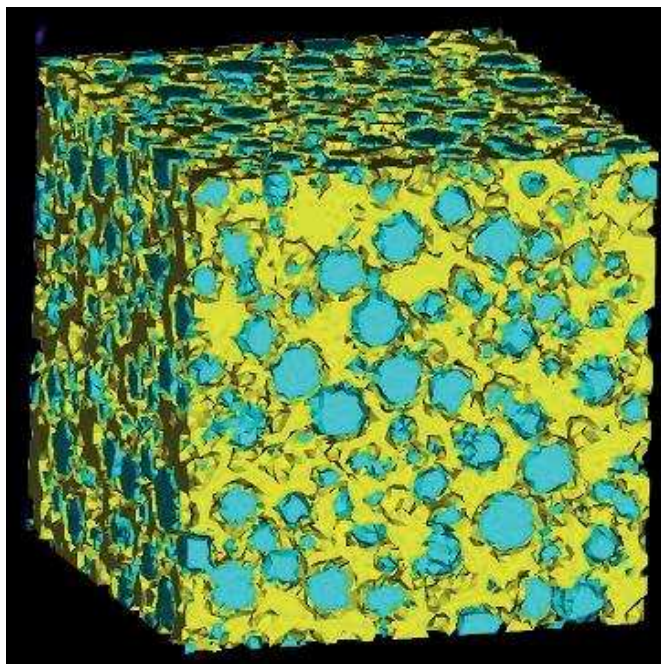
- Un angle empirique exploitant différents schémas classiques : auto-cohérent, Mori-Tanaka,...
- Un angle théorique en appliquant dans les éléments intermédiaires une polarisation

bornes (Hashin-Strikman Type Bounds). Ces bornes encadrent les propriétés effectives élastiques d'un VER de béton plus finement que celles, plus anciennes, proposées par Hill.

Enfin, la méthode permet d'affiner le calcul des propriétés effectives en réalisant, pour un même schéma d'homogénéisation, des calculs sur des mailles de tailles différentes. La dépendance à la fraction volumique d'éléments intermédiaires est linéaire en moyenne, la pente est fonction du schéma, le schéma optimal est donc celui associé à la pente la plus faible en valeur absolue, ce dernier dépend du problème traité. Des travaux théoriques en cours consolident cet aspect.

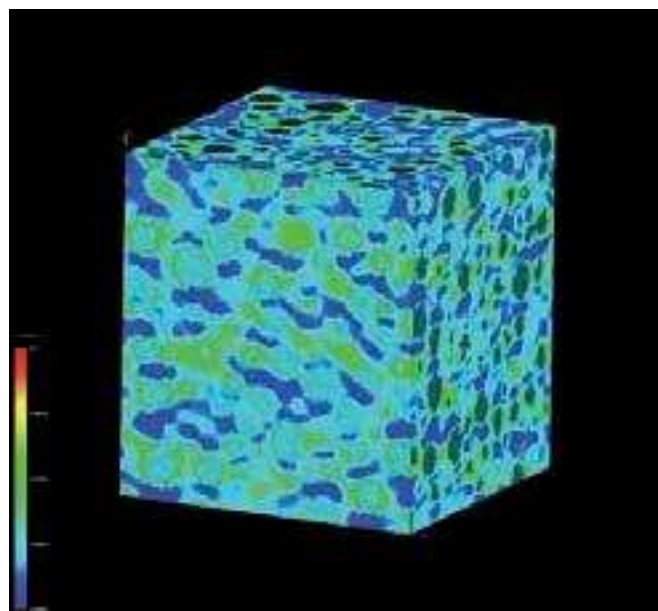
Perspectives

Au final BENHUR et Code Aster ont permis à EDF R&D d'amorcer avec l'identification des propriétés effectives des bétons. La méthodologie progresse et de nouvelles applications viendront, sur la modélisation des pathologies de gonflement par exemple. Pour améliorer la précision des calculs nous envisageons de recourir à des éléments finis étendus (X-FEM).



Maillage BENHUR 3D
(1 million d'éléments) d'un VER de béton de type B11 constitué de 2024 inclusions (fraction volumique = 40% : pour plus de clarté seuls les éléments "purs" G0 (mortier en jaune) et G100 (granulats en bleu) sont représentés)

homogène permettant de contrôler l'erreur commise puis en optimisant cette polarisation de façon à obtenir un encadrement de l'énergie élastique du VER le plus resserré possible. Ces travaux ont permis d'exhiber de nouvelles



Calcul BENHUR réalisé avec Code Aster illustrant la localisation de la déformation dans la pâte pour un chargement en compression uniaxiale