

Master 2 Recherche ECD

Module de méthodes expérimentales

K. ABAHRI - F. BENBOUDJEMA - A. BOURDOT - S. CARE - T. HONORIO

EXAMEN

Vendredi 25/02/2022

Tous documents autorisés - durée 3h

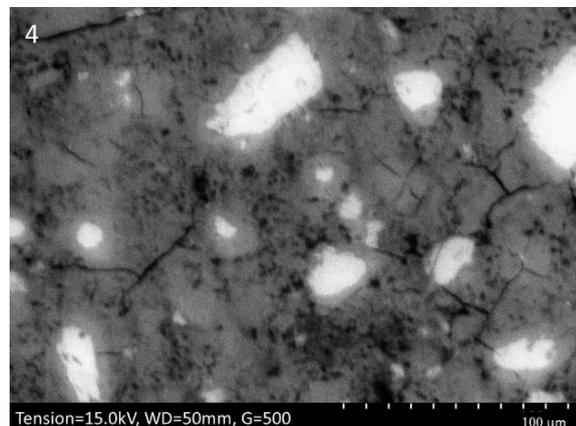
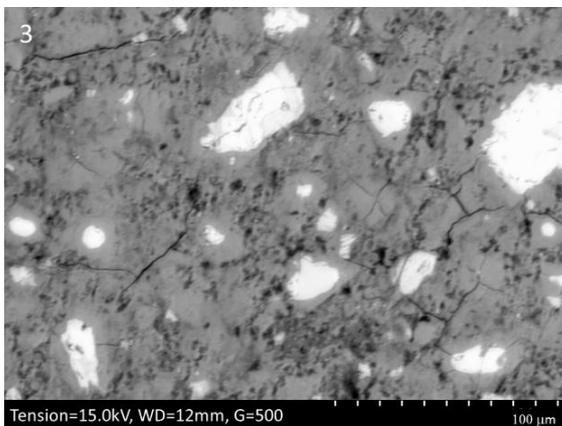
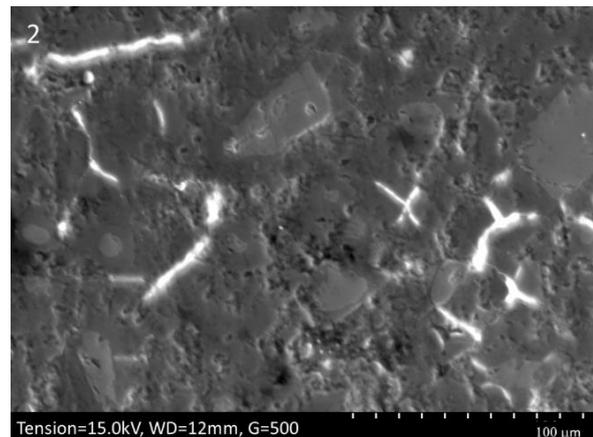
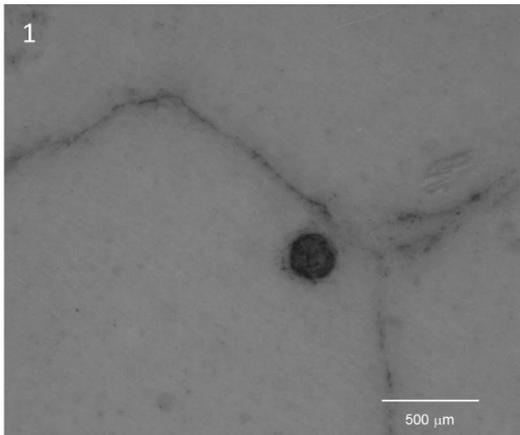
Il est conseillé de traiter chacun des exercices (indépendants)
Chacun des exercices sera rédigé sur une copie séparée
Donner des réponses concises en les justifiant.

1	<u>IMAGERIE ET POROSIMETRIE MERCURE (S. CARE)</u>	<u>2</u>
2	<u>CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE DU MORTIER DE POLYSTYRENE (K.ABAHRI)</u>	<u>3</u>
3	<u>CONDUCTIVITE THERMIQUE DES MATERIAUX (K.ABAHRI)</u>	<u>5</u>
4	<u>INCERTITUDES ASSOCIEES A LA MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE (F. BENBOUJEMA)</u>	<u>6</u>
5	<u>ESSAIS DE PERMEATION (T. HONORIO)</u>	<u>6</u>
6	<u>DIFFUSION DES CHLORURES (A. BOURDOT)</u>	<u>7</u>

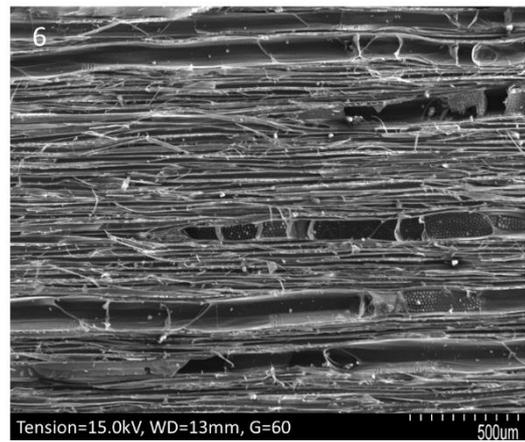
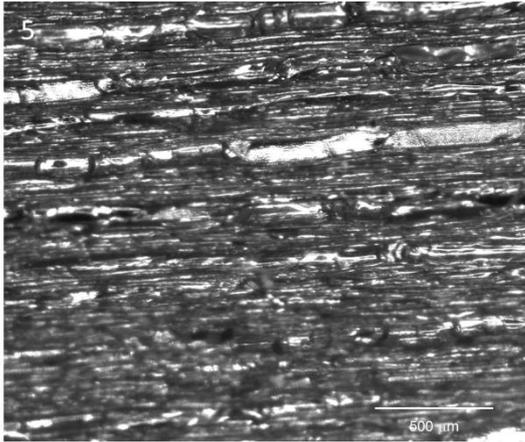
1 Imagerie et Porosimétrie Mercure (S. CARE)

Exercice 1 : Techniques d'imagerie

- 1.1.1. Pour chacune des images 1, 2, 3 et 4 décrire ce qui est observé et préciser quelles sont les méthodes d'imagerie utilisées ainsi que les méthodes de préparations pour obtenir ces images.
- 1.1.2. Donner la définition de WD et G (images 2, 3 et 4).
- 1.1.3. Expliquer pourquoi les « rendus » des images sont différents :
 - Entre l'image « 2 » et l'image « 3 »
 - Entre l'image « 3 » et l'image « 4 »



- 1.1.4. Pour chacune des images 5 et 6, décrire ce qui est observé et préciser quelles sont les méthodes de d'imagerie utilisées ainsi que les méthodes de préparations pour obtenir ces images.
- 1.1.5. Expliquer pourquoi les « rendus » des images 5 et 6 sont différents.



Exercice 2 : Tomographie aux rayons X et Imagerie par Résonance Magnétique

- 1.2.1. Expliquer le principe de ces 2 méthodes et quelles informations elles peuvent apporter. Expliquer en quoi elles sont complémentaires.
- 1.2.2. Des images 3D sont réalisées par tomographie aux rayons X et par Imagerie par résonance magnétique. On rappelle que pour la tomographie aux rayons X, la résolution est environ de $X/1000$ avec X taille de l'échantillon et pour l'IRM, elle est de $X/100$. En supposant que la dimension X de l'échantillon est de 5cm, pour quelle méthode sera-t-il possible d'imager des porosités de 100 micromètres de diamètres ?

Exercice 3 : Porosimétrie au Mercure

- 1.3.1. Expliquer le principe de cette méthode, en précisant comment la mettre en œuvre (taille échantillon, conditionnement, etc...)
- 1.3.2. Expliquer pourquoi les résultats présentés dans la figure 1.1, pour le même matériau, sont différents avec 4 techniques de conditionnement.

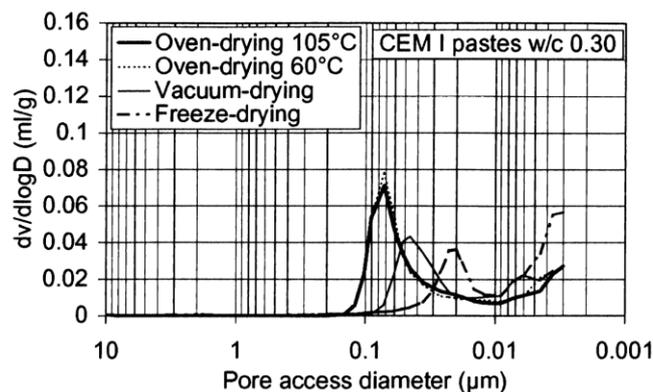


Figure 1.1

2 Caractérisation microstructurale du mortier de polystyrène (K.Abahri)

Dans cette partie, nous proposons d'utiliser des techniques d'imagerie non destructives, plus précisément la micro-tomographie à rayons X, pour caractériser la morphologie du mortier à

Polystyrène expansé. Afin de vérifier la répétabilité des mesures, nous avons réalisé les essais sur 4 échantillons de dimensions différentes.

L'histogramme des niveaux de gris de l'image tomographique reconstruite en 3D d'un l'échantillon de dimension $18 \times 19 \times 17 \text{ mm}^3$ et de fraction volumique de : 35% de la matrice cimentaire, 56% de billes de polystyrène est donné sur la figure 2.1.

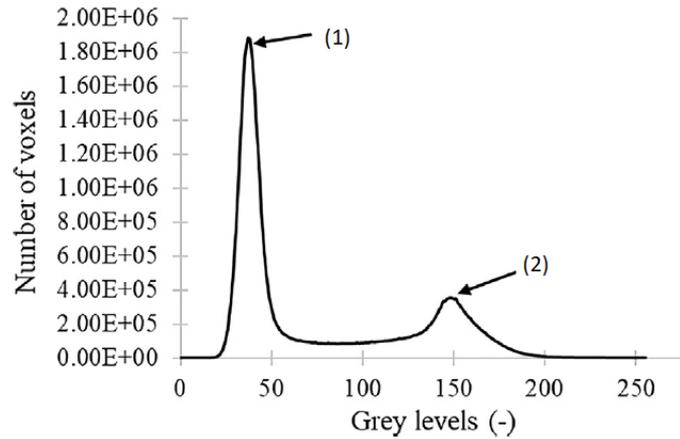


Figure 2.1. Histogramme des niveaux de gris de l'image tomographique reconstruite en 3D, taille de voxel = $17.6 \mu\text{m}$

- 2.1. Identifier les phases 1 et phase 2 du matériau sur l'histogramme. Argumentez votre réponse.
- 2.2. Que peut-on dire sur la phase porosité, dans le cas de ce matériau hétérogène ?
- 2.3. Donnez la valeur de cette porosité en % (fraction volumique).

Afin de déterminer le VER, nous avons mesuré la porosité pour des régions d'intérêt croissantes de volumes cubiques au centre de l'échantillon, et nous l'avons calculée pour les échantillons n°1 et 4 de la figure 2.2.

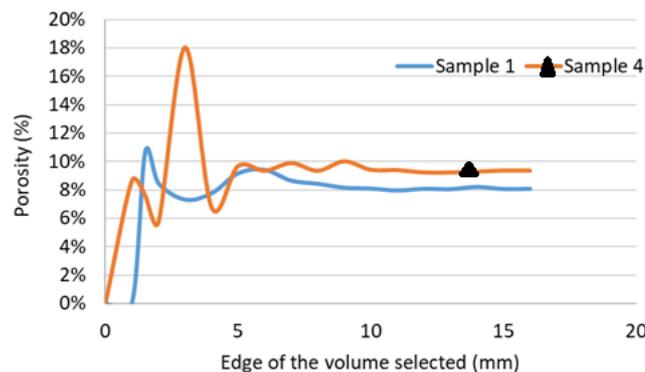


Figure 2.2. Mesure de la porosité pour différents volumes

- 2.4. Interprétez en quelques mots les résultats de la figure 2.2 et donner la valeur du VER.

La distribution de la taille des pores (granulométrie des pores) du matériau, obtenue à l'aide d'un logiciel de traitement d'image, est représentée sur la figure 2.3. La porosité représentée sur la courbe comprend la porosité de la matrice cimentaire et des billes de polystyrène.

- 2.5. Interprétez la granulométrie de ce matériau en se basant sur les résultats de la figure 2.3. Donner une estimation de la taille des billes de polystyrène.

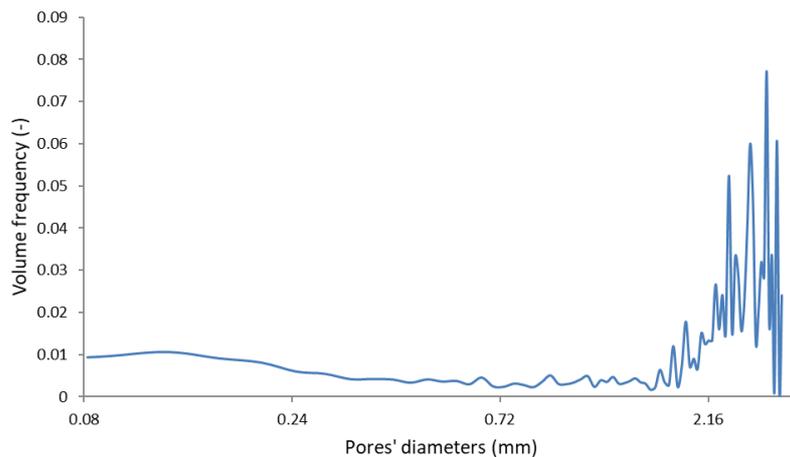


Figure 2.3. Distribution de la taille de la porosité pour un volume de $10.2 \times 10.2 \times 10.2 \text{ mm}^3$ avec une taille de voxel de $20.4 \text{ }\mu\text{m}$

3 Conductivité thermique des matériaux (K.Abahri)

On peut classer les méthodes de mesure thermiques suivant différents critères explicités sur le tableau 3.1.

Géométrie	Régime thermique	Nbre de capteurs / points de mesure	Type de mesure
demi-espace	permanent	1 point	absolue
cylindre	quasi-établie	2 points	différentielle
sphère	variable	n points	

Tableau 3.1 : Critères permettant de distinguer les classes de méthodes dédiées à la caractérisation thermique [Gauthier, 2013].

- 3.1. Expliquer le principe de la méthode du fil chaud (utilisée en travaux pratiques cette année) en vous appuyant sur la réalisation d'un schéma de principe de la méthode.
- 3.2. Sous quel régime thermique, défini dans le tableau 3.1, fonctionne la mesure de conductivité thermique par la méthode du fil chaud ? Justifier votre réponse vis à vis du fonctionnement de cette méthode.
- 3.3. Quels sont les paramètres qui influencent la mesure de conductivité thermique ?
- 3.4. Quelle est l'influence de la puissance de source sur la mesure de conductivité thermique d'un échantillon ?

La méthode du fil chaud implique de modéliser la mesure réelle et après de résoudre l'équation de la chaleur sur le système modélisé.

- 3.5. Exprimer l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques et les équations de conditions aux limites et initiales utilisées pour modéliser la mesure.
- 3.6. Définir toutes les hypothèses qui sont utilisées pour obtenir l'expression de l'écart de température suivant utilisé dans le cadre de l'analyse inverse :

$$T_s(t) - T_s(t=0) \approx \frac{\Phi}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \Phi \left(R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{D}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right)$$

4 Incertitudes associées à la mesure de la conductivité thermique (F. Benboujema)

On décide d'étudier les incertitudes associées à la mesure de la conductivité thermique d'un matériau poreux (cf. Figure 4.1). On applique un flux de chaleur noté φ , et on mesure les températures des 2 faces en régime permanent (T_h et T_b), ainsi que l'épaisseur de l'échantillon notée e .

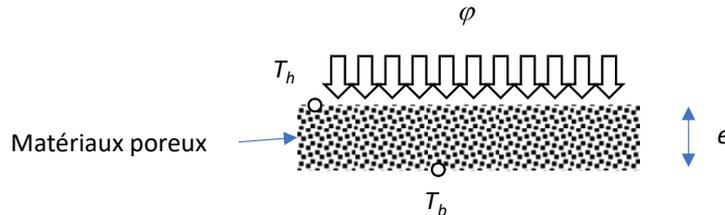


Figure 4.1 – Principe de l'essai de mesure de la conductivité thermique

On étudie 3 échantillons. Les valeurs sont données dans le Tableau 4.1

Tableau 4.1 – Données

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
φ [W.m^{-2}]	55	52	49
T_h [$^{\circ}\text{C}$]	31,3	33,2	30,5
T_b [$^{\circ}\text{C}$]	22,5	24,1	21,5
e [cm]	2,1	2	1,9

4.1. Calculez la conductivité thermique λ pour les 3 échantillons.

4.2. Calculez la valeur moyenne puis le coefficient de variation (en %). Estimez les valeurs associées à l'intervalle de confiance à 95 % puis à 99 %.

4.3. Les incertitudes de mesure sur les différents paramètres sont :

- Le flux de chaleur : $\Delta\varphi = \pm 5 \text{ W.m}^{-2}$
- La mesure de température : $\Delta T = \pm 0,5^{\circ}\text{C}$
- L'épaisseur : $\Delta e = \pm 1 \text{ mm}$

Donnez alors l'incertitude sur la conductivité thermique mesurée.

4.4. Commentez les résultats.

5 Essais de perméation (T. Honorio)

5.1. Quelle est l'utilité de caractériser les matériaux poreux du Génie Civil vis-à-vis de leur perméabilité ?

5.2. Quels sont les effets de l'humidité relative et température sur la perméabilité des matériaux poreux ?

5.3. Discutez comment la micro- et la macro-fissuration affectent la perméabilité des matériaux cimentaires.

5.4. Quelles sont les principales hypothèses adoptées dans l'essai CEMBUREAU pour la mesure de perméabilité ?

5.5. Discutez les concepts de perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque. Quelle est l'intérêt de l'approche Klinkenberg ? Quelle est la limite de validité de cette approche ?

5.6. À partir de la figure 5.1 présentée ci-dessous, donner la valeur de la perméabilité intrinsèque k_{int} [m^2] et du coefficient b d'après l'équation de la régression linéaire présentée sur le graphique.

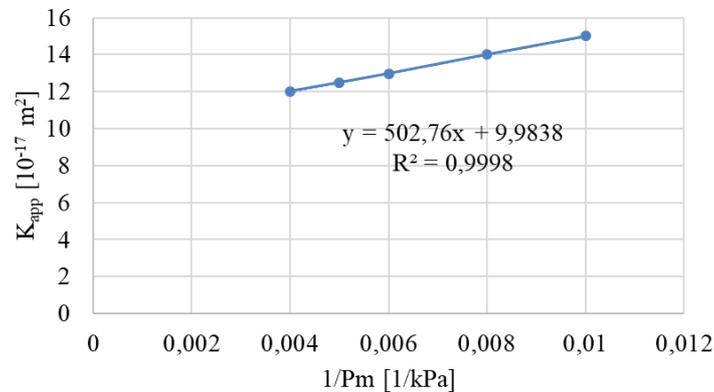


Fig. 5.1. Perméabilité apparente en fonction de l'inverse de la pression moyenne

6 Diffusion des chlorures (A. Bourdot)

L'eau de mer présente des chlorures. Le processus de transport est la diffusion régie par la loi de Fick.

5.1. Nous nous plaçons dans la porosité du béton et considérons dans cette partie la diffusion des chlorures dans le liquide interstitiel. On suppose qu'il n'y a pas d'interaction entre les chlorures et la matrice cimentaire. Le flux d'ions J traversant une surface unité de solution interstitielle est donné par la première loi de Fick. En écrivant la conservation de la masse d'ions sur un volume élémentaire, montrez que l'on obtient la seconde loi de Fick (en uniaxial).

5.2. Nous avons vu en cours et en TP une méthode pour étudier la durabilité de matériaux cimentaires.

- Expliquer l'essai de diffusion étudié. Vous pourrez réaliser un schéma pour appuyer vos propos.
- Après l'essai de diffusion expliquer comment on obtient le front de pénétration ? Quelle solution applique-t-on sur l'échantillon ? Que se passe-t-il dans ce cas ?

5.3. D'après les résultats d'essais réalisés sur des bétons présentés en Figure 6.1 que vous pourrez décrire, discutez de l'effet du rapport E/C et de l'utilisation de laitier de haut fourneau sur la pénétration des ions chlorures et expliquez.

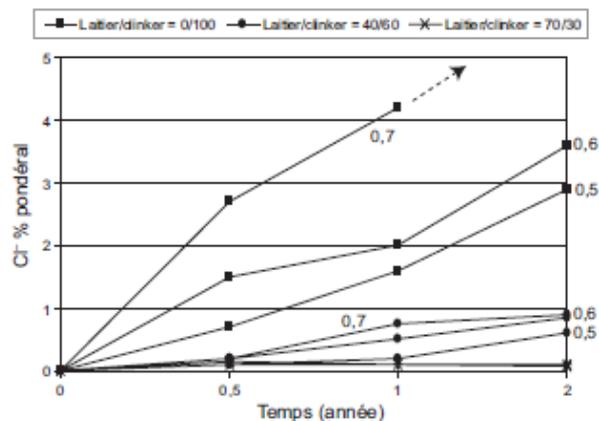


Figure 6.1 : Pénétration des chlorures dans des bétons en fonction de la teneur en laitier du ciment et du rapport E/C, d'après Smolczyk [SMO 80].