

UNIVERSITE DE TLEMCEN
FACULTE DE TECHNOLOGIE
COURS POUR MASTER « TRANSFERT DANS LES MILIEUX POREUX »
Version 1 : 2025

CHAP. 1

LA POROSITÉ DES BÉTONS

Dr BENACHENHOU K. A.





Pourquoi la porosité est-elle un enjeu majeur pour le béton ?

Le béton est un matériau poreux, ce qui influence sa résistance, sa perméabilité et sa durabilité.

Une porosité excessive peut entraîner :

- ✓ Une fragilisation mécanique.**
- ✓ Une pénétration d'eau et d'agents agressifs**
- ✓ Une réduction de la durée de vie des ouvrages.**



OBJECTIFS

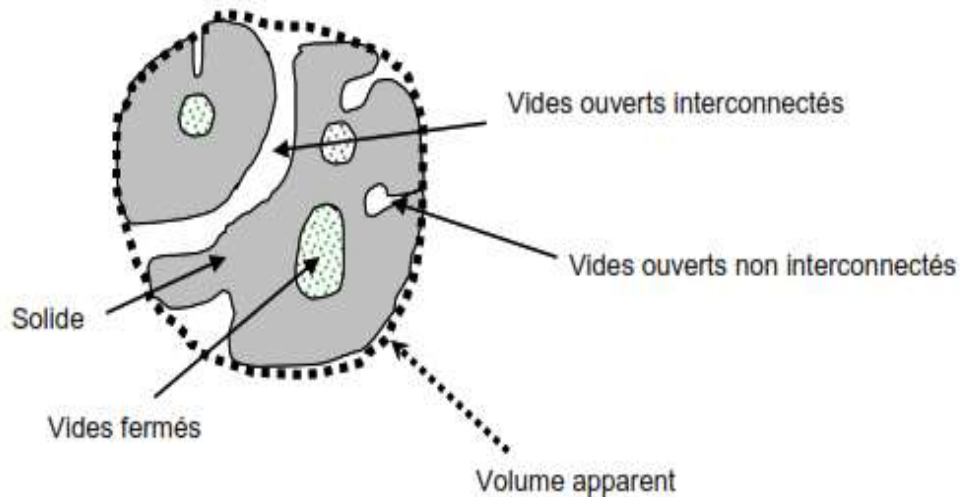


- ❑ **Comprendre la nature et l'impact de la porosité sur les bétons.**
- ❑ **Identifier les facteurs influençant la porosité.**
- ❑ **Explorer les techniques de mesure et de réduction.**

DEFINITION DU BETON

□ Le béton est un matériau polyphasique. Il est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. Le solide est constitué des granulats, des hydrates et des parties du liant non hydratées. La phase liquide est la solution interstitielle et la phase gazeuse est un mélange d'air et de vapeur d'eau.

Description schématique d'un matériau poreux



V_a , le volume apparent contenu dans l'enveloppe du matériau

v_s , le volume de la partie solide du matériau

v_o , le volume des pores « ouverts », c'est à dire communiquant avec l'extérieur,

$v_{o,i}$, le volume des pores ouverts interconnectés à travers lesquels un fluide peut traverser le matériau,

$v_{o,ni}$, le volume des pores ouverts non interconnectés,

v_f , le volume des pores fermés.

On peut écrire les relations suivantes entre ces volumes :

$$V_a = v_s + v \quad \text{où} \quad v = v_o + v_f \quad \text{et} \quad v_o = v_{o,i} + v_{o,ni}$$

DEFINITION DE LA POROSITE [1]

□ La porosité est la mesure de l'espace vide dans un matériau, exprimée sous forme de pourcentage ou de fraction du volume total.

$$\text{Porosité ouverte interconnectée : } p_{o,i} = \frac{V_{o,i}}{V_a} \quad \text{Porosité ouverte non interconnectée : } p_{o,ni} = \frac{V_{o,ni}}{V_a}$$

$$\text{Porosité ouverte : } p_o = \frac{V_o}{V_a} = p_{o,i} + p_{o,ni} \quad \text{Porosité fermée : } p_f = \frac{V_f}{V_a}$$

$$\text{Porosité (totale) : } p = \frac{V}{V_a} = p_o + p_f$$

DEFINITION DE LA POROSITE [2]

- ❑ la porosité d'un béton courant est de l'ordre de 15% à 28 jours,
- ❑ Le béton à hautes performances de 10 à 12 % et celle d'
- ❑ Le béton à très hautes performances peut varier entre 7 et 9%.

Les différentes propriétés d'usage des bétons dépendent des porosités définies . En particulier la durabilité est associée à la porosité ouverte et plus particulièrement à la porosité ouverte interconnectée qui autorise la pénétration des agents agressifs extérieurs dans le béton.

L'ETAT D'HUMIDITE DU BETON

La teneur en eau, $w = \frac{m_e}{m_s}$, où m_e est la masse d'eau liquide contenue dans le béton et m_s la masse du béton sec,

Le degré de saturation, $s = \frac{v_e}{v_o}$, où v_e est le volume d'eau contenu dans les vides ouverts.

CARACTÉRISATION DE LA GÉOMÉTRIE D'UN RÉSEAU POREUX D'UN MATÉRIAU

- ❑ **La tortuosité T**
- ❑ **La constrictivité δ**
- ❑ **Le facteur de formation F**

LA TORTUOSITÉ T [1]

❑ la tortuosité T, est définie comme le carré du rapport entre la longueur moyenne de l'écoulement dans le milieu poreux L_e à la longueur du matériau mesurée dans la direction macroscopique de l'écoulement L :

$$T = \frac{L_e^2}{L}$$

LA TORTUOSITÉ T [2]

- ❑ Un béton très poreux avec des pores interconnectés aura une tortuosité plus faible ($T \approx 1$), facilitant la diffusion de l'eau et des gaz.
- ❑ Un béton dense avec peu de connexions entre les pores aura une tortuosité élevée ($T > 2$), ce qui ralentit la pénétration des agents agressifs (CO_2 , chlorures).

LA CONSTRICTIVITÉ δ [1]

❑ La constrictivité (δ) est un paramètre caractérisant la variation de section des pores dans un matériau poreux comme le béton. Elle décrit la réduction de l'espace disponible pour l'écoulement d'un fluide à travers les pores ($\delta < 1$).

$$\delta = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$$

où :

- $S_{\max}$ est la plus grande section transversale d'un pore,
- $S_{\min}$ est la plus petite section transversale d'un pore.

- Si δ est proche de 1 : les pores ont une section relativement constante → écoulement fluide facile.
- Si δ est proche de 0 : les pores ont des étranglements sévères → fortes résistances à l'écoulement.
- Dans des arrangements compacts de sphères identiques isotropes, elle est proche de 0,75 (béton dense)

LA CONSTRICTIVITÉ δ [2]

- ❑ **Impact sur la perméabilité : une faible constrictivité (δ faible) réduit la facilité d'écoulement des fluides dans le béton.**
- ❑ **Influence sur la diffusion des ions : un béton avec une faible constrictivité limite la pénétration des agents agressifs (chlorures, sulfates).**
- ❑ **Effet sur la durabilité : un béton avec une forte constrictivité favorise la rétention d'eau et limite le séchage rapide, réduisant ainsi les risques de fissuration.**

LE FACTEUR DE FORMATION F [1]

❑ Le facteur de formation F est un paramètre utilisé pour caractériser l'aptitude d'un milieu poreux (comme le béton) à conduire l'électricité lorsqu'il est saturé d'une solution conductrice.

$$F = \frac{\sigma}{\sigma_e}$$

où :

- σ est la conductivité électrique de la solution interstitielle contenue dans les pores du béton.
- σ_e est la conductivité électrique du béton saturé avec cette solution.

- Si FF est élevé, cela signifie que le milieu poreux offre une forte résistance au passage du courant électrique (c'est-à-dire que la conductivité du béton saturé est faible).
- Si FF est faible, cela signifie que les pores sont bien connectés et permettent un transfert facile des charges électriques, indiquant une porosité élevée et une plus grande perméabilité aux fluides.

LE FACTEUR DE FORMATION F [2]

❑ Le facteur de formation est lié à la porosité ouverte δ_p et à la tortuosité T du réseau poreux par la relation :

$$F = \frac{1}{\delta_p T}$$

- Si δ_p est élevé (beaucoup de pores connectés) et/ou T est faible (chemins directs et courts), alors F est faible, indiquant une meilleure conductivité.
- Si δ_p est faible (peu de pores connectés) et/ou T est élevé (chemins complexes et allongés), alors F est élevé, indiquant une forte résistance au passage des ions.

TYPES DE POROSITÉ DANS LES BÉTONS

POROSITÉ CAPILLAIRE

- Due à l'évaporation de l'eau non utilisée,
- Dépend du rapport eau/ciment (E/C) : plus il est élevé, plus la porosité capillaire est importante.

POROSITÉ GÉLATINEUSE

- Liée au gel C-S-H (silicate de calcium hydraté).

POROSITÉ INTERFACIALE

- Située à l'interface granulats / pâte de ciment..

POROSITÉ RÉSIDUELLE

- Présence de bulles d'air non évacuées lors du malaxage ou du coulage.

LES FACTEURS INFLUENÇANT LA POROSITÉ

Rapport eau/ciment (E/C)

- Un rapport E/C élevé entraîne plus de porosité capillaire.
- Un E/C trop bas peut nuire à la maniabilité du béton.

Type et dosage du liant

- Ciment à haute résistance = porosité plus faible après durcissement.
- Ajouts minéraux (fumée de silice, pouzolane) : combler les vides et réduisent la porosité.

Compaction et cure

- Une mauvaise compaction laisse des bulles d'air dans le béton.
- Une cure insuffisante empêche une hydratation complète, augmentant la porosité.

IMPACT DE LA POROSITÉ SUR LES PERFORMANCES DU BÉTON

Résistance mécanique

- Une faible porosité améliore la résistance à la compression.
- La porosité excessive réduit l'adhérence pâte de ciment/granulats.

Perméabilité et durabilité

- Un béton poreux laisse pénétrer l'eau, les sulfates et les chlorures.
- Risque de corrosion des armatures dans un environnement humide.

Gel/Dégel et fissuration

- Les pores remplis d'eau gèlent et augmentent de volume, créant des fissures internes.

TECHNIQUES DE MESURE DE LA POROSITÉ

Porosimétrie au mercure

- Injection de mercure sous pression pour mesurer le volume des pores.

Méthode gravimétrique

- Saturation d'un échantillon en eau, puis pesée.

Absorption capillaire

- Observation du taux d'absorption d'eau dans le béton.

COMMENT RÉDUIRE LA POROSITÉ ?

☐ Optimisation du rapport eau/ciment

- Trouver un équilibre entre maniabilité et réduction de la porosité.

☐ Utilisation d'additions minérales

- La fumée de silice améliore la compacité du béton.

☐ Amélioration de la cure

- Cure prolongée = meilleure hydratation du ciment.

CONSLUSION

- ☐ La porosité influence la résistance, la durabilité et la perméabilité
- ☐ Elle dépend de la formulation du béton et des conditions de mise en œuvre
- ☐ Plusieurs techniques permettent de la mesurer et de la réduire

ETUDE DE CAS

Le béton utilisé dans un tunnel ferroviaire présente une porosité excessive. Cette porosité élevée entraîne :

- **Une infiltration d'eau indésirable.**
- **Une corrosion accélérée des armatures (armatures en acier).**

Quelles sont les solutions et les facteurs qui pourraient influencer la porosité dans ce cas ?

EXERCICES

- **EXO 1** : Une roche d'une masse de 1,3 Kg a été placée dans un récipient d'eau. On a constaté un déplacement de volume d'eau de 0,5 litres.

Calculer la porosité de la roche sachants que sa densité apparente est de 2.

- **EXO 2** : Calculer l'indice des vides « e » sachant que la porosité est de 35%.
- **EXO 3** : Une pierre granitique de $M_{vapp} = 2500 \text{ Kg/m}^3$, pèse 1325 g. Après 7 jours d'immersion totale dans l'eau (sous vide), elle pèse 1334 g ($S_r = 1$). Calculer la porosité, la compacité, sa teneur en eau de saturation et son indice des vides.
- **EXO 4**: Pour 1 Kg de gravier sec, l'absorption en eau est de 40 g. Calculer la porosité. On donne $M_{vabs} = 2727 \text{ kg/m}^3$
- **EXO 5**: En utilisant le banc d'essai LCP62, donner la porosité du sable sachant que la hauteur trouvée avec les 100 secousses est de 21 cm. On donne la densité absolue du sable : 1,5.

MERCI DE VOTRE AIMABLE ATTENTION

