



énergie atomique • énergies alternatives

Transferts hydriques en milieu poreux insaturé

Stéphane POYET

CEA Saclay

Laboratoire d'Étude du Comportement des Bétons et Argiles

Contexte



energie atomique • énergies alternatives

- ☐ Durabilité des structures en béton armé
 - Exemple de la corrosion des armatures

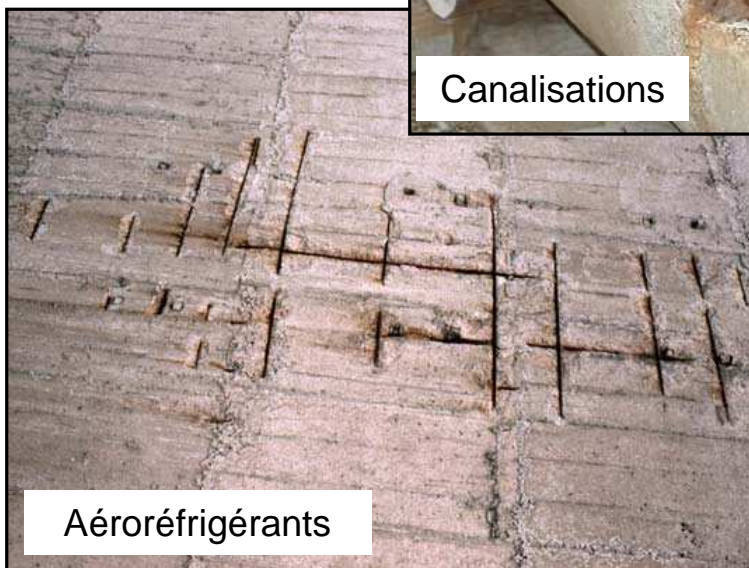
www.concretecorrosion.net



Canalisations



Ouvrages d'art



Aéroréfrigérants



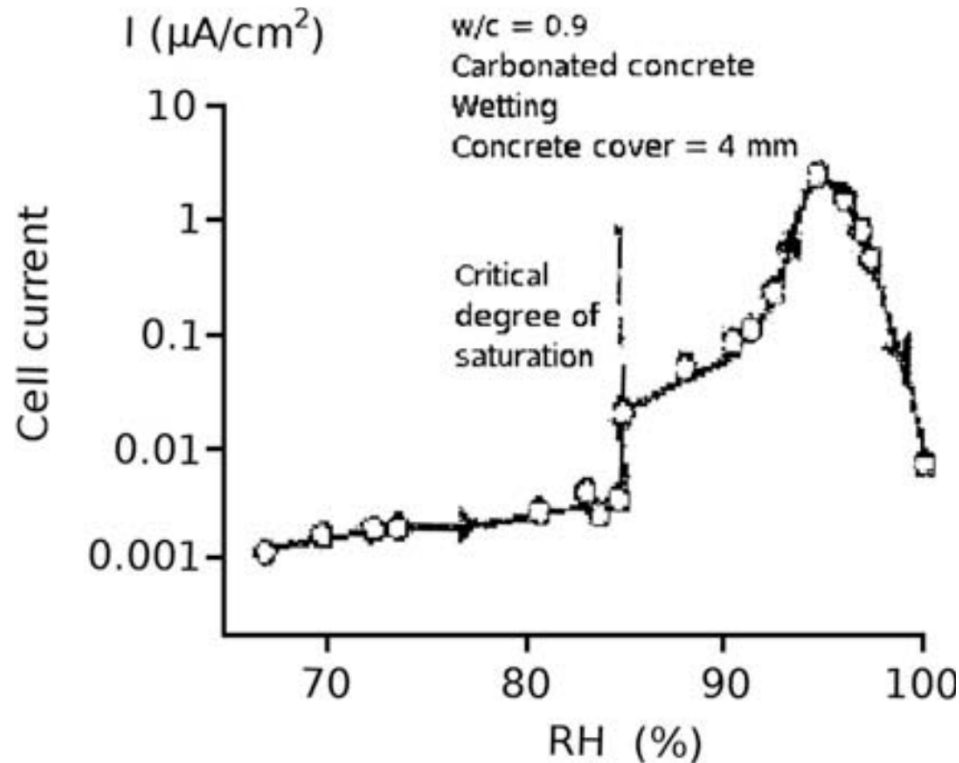
Bâtiments

Contexte



energie atomique • énergies alternatives

- Durabilité des structures en béton armé
 - Exemple de la corrosion des armatures

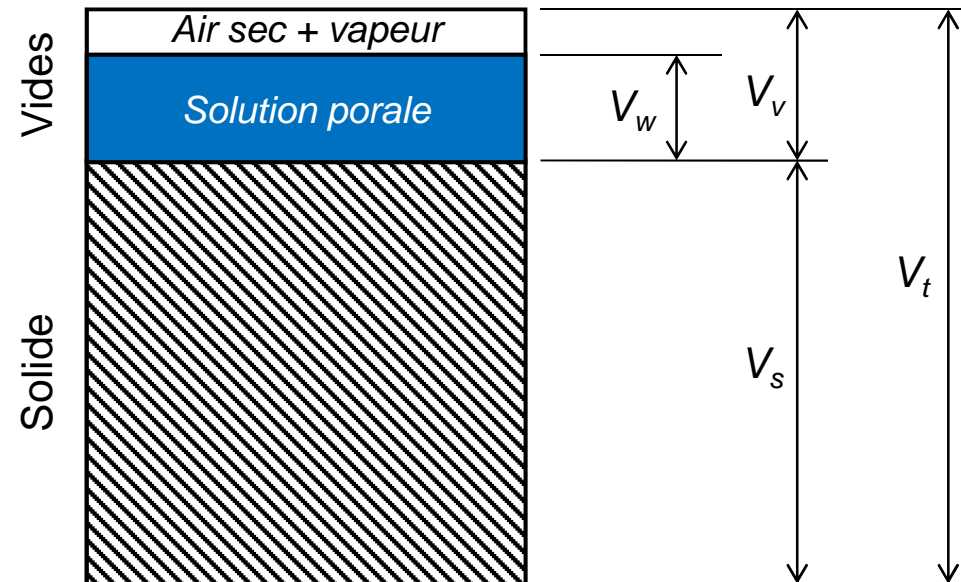


Tuutti (1982) "Corrosion of steel in concrete."
Swedish Cement and Concrete Research
Institute.

- Forte dépendance à l'humidité relative (teneur en eau)
- Nécessité de décrire le transport d'eau pour l'évaluation de la durabilité

Description du transport d'eau

- ❑ Béton = milieu poreux contenant de l'eau



Porosité totale $\phi = \frac{V_v}{V_t}$

Saturation $S = \frac{V_w}{V_v}$

Teneur en eau massique $w = \frac{m_w}{m_s}$

Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

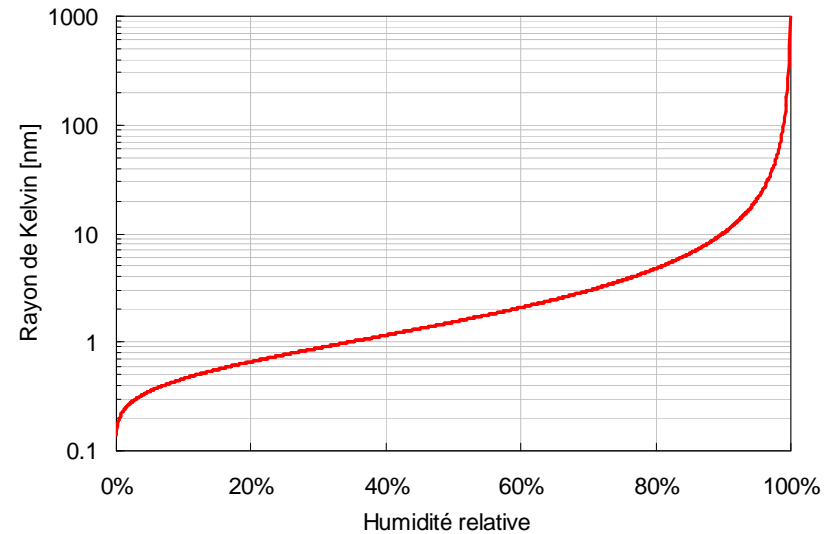
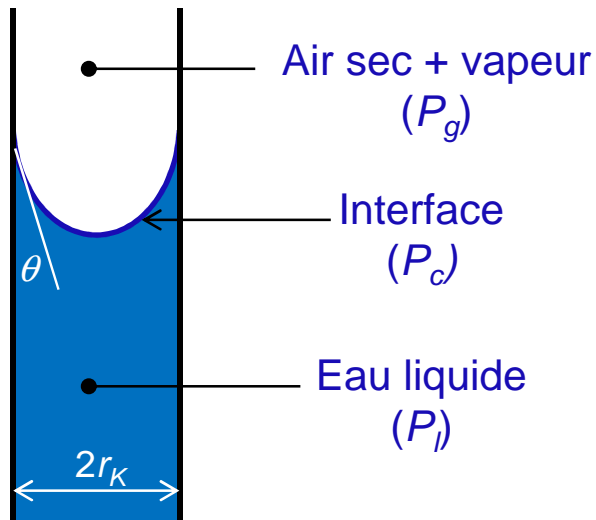
☐ Rappels sur la condensation capillaire :

- Condensation d'eau dans les pores en fonction de l'HR

Loi de Kelvin

$$r_K = -2 \frac{\mathcal{M} \sigma \cos(\theta)}{\rho R T \ln(h)}$$

- Pression capillaire P_c



Loi de Kelvin-Laplace

$$P_c = P_g - P_l = -\rho \frac{RT}{\mathcal{M}} \ln(h)$$

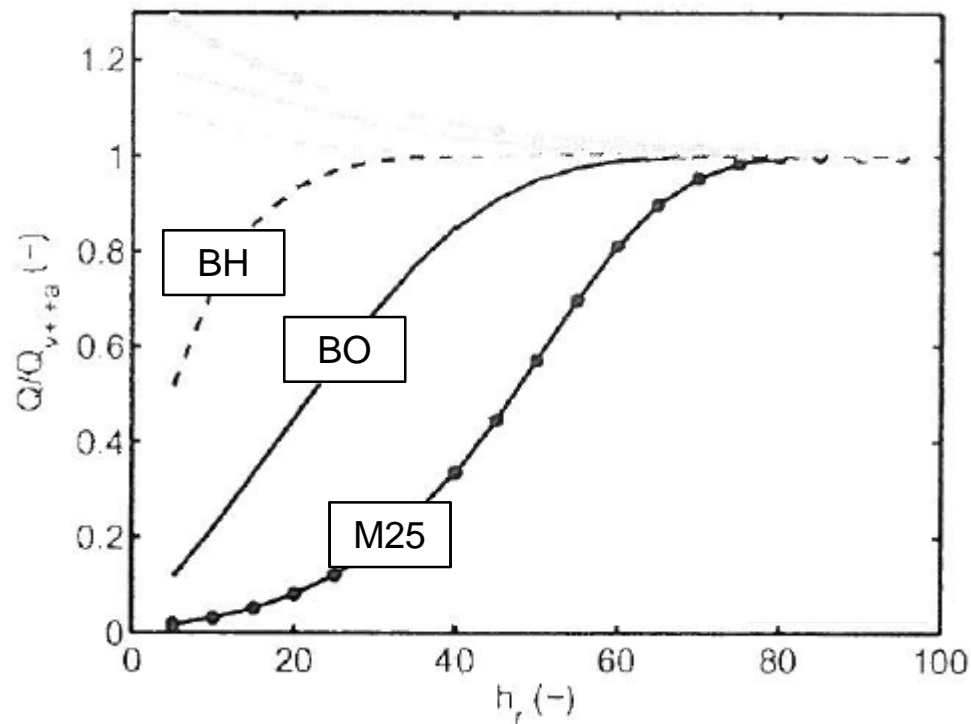
$$(P_l \leq 0 \text{ et } P_c \approx P_l)$$

Description du transport d'eau



□ Les trois moteurs du transport d'eau :

- Perméation de la phase gazeuse → *pression de gaz*
- Diffusion de la vapeur au sein de la phase gazeuse → *pression partielle*
- Perméation de l'eau liquide → *pression d'eau liquide*



M25 → $e/c=0,84$

BO → $e/c=0,49$

BH → $e/c=0,27$

Thiery *et coll.* (2007), European Journal of Environmental and Civil Engineering 11(5), 541-577.

⇒ Transport par perméation eau liquide prépondérant

Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

□ Description simplifiée du transport d'eau :

➤ Perméation eau liquide uniquement

Loi de Darcy (insaturé) $\rho \underline{v} = -\rho \frac{Kk_r}{\eta} \underline{grad}(P_l)$

Richards (1931),
Physics 1(5), 318-333.

➤ Conservation de la matière

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi S) = -div(\rho \underline{v}) = -div \left[-\rho \frac{Kk_r}{\eta} \underline{grad}(P_l) \right]$$

➤ Equation de fermeture $S = S(P_l)$

$$\phi \left(\frac{\partial S}{\partial P_l} \right) \frac{\partial P_l}{\partial t} = div \left[\frac{Kk_r}{\eta} \underline{grad}(P_l) \right]$$

Mainguy *et coll.* (2001),
Journal of Engineering
Mechanics 127(6), 582-592.

$$\left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = div \left[D(S) \underline{grad}(S) \right]$$

$$\left[D(S) = K \frac{k_r}{\phi \eta} \left(\frac{\partial P_l}{\partial S} \right) \right]$$

Description du transport d'eau

□ Description simplifiée du transport d'eau :

- Une seule équation différentielle
- 4 propriétés physiques (seulement)

$$\phi \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{K}{\eta} k_r \text{grad}(P) \right]$$

Porosité totale

Isotherme de désorption

Perméabilité intrinsèque à l'eau liquide

Perméabilité relative à l'eau liquide

Description du transport d'eau



☐ Mesure de la porosité totale à l'eau

- Pesée d'échantillons saturés
- Mesure du volume et de densité
 - Pesée sous eau → M_{eau}
 - Pesée dans l'air → M_{air}

$$V_t = (M_{air} - M_{eau})$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_{air}}{V_t} = \frac{M_{air}}{M_{air} - M_{eau}}$$

- Séchage complet puis pesée (dans l'air) → M_{sec}
 - Béton → four à 105°C
 - Pâte de ciment → 50-60°C + dessicant

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

- Ordre de grandeur
 - Bétons → 8-15%
 - Pâtes de ciment → 25-40%

Description du transport d'eau

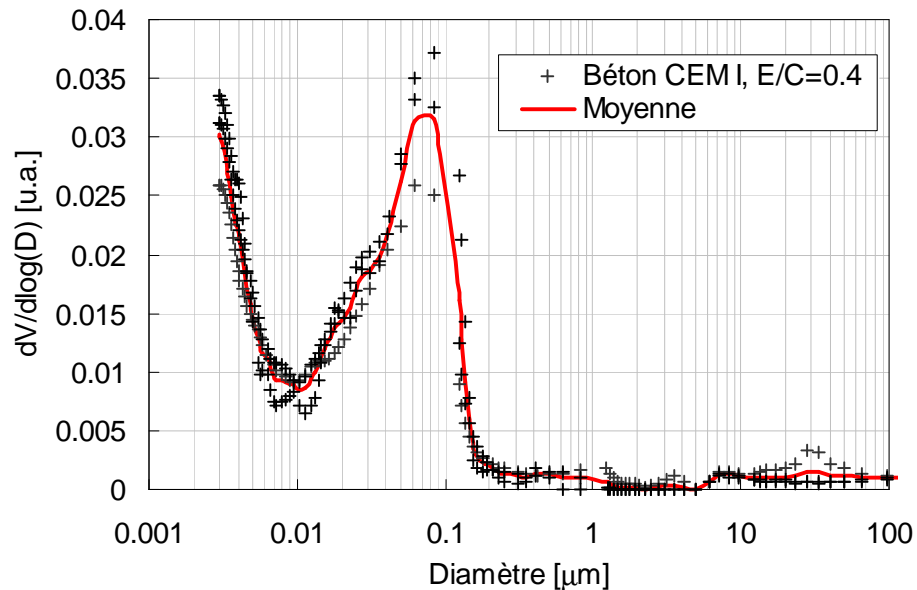


❑ Porosimétrie par intrusion de Mercure (MIP)

- Injection de mercure (liquide) sous pression dans un réseau poreux complètement désaturé
- Relation de Washburn

$$P_m = 2 \frac{\sigma_m}{r} \cos(\theta_m)$$

- Limitation à $r > 1,5 \text{ nm}$
 - ➔ Sous-estimation de la porosité
 - ➔ Distribution des pores (cylindriques)



Poyet (2009), Cement and Concrete Research 39(11), 1052-1059.

Description du transport d'eau

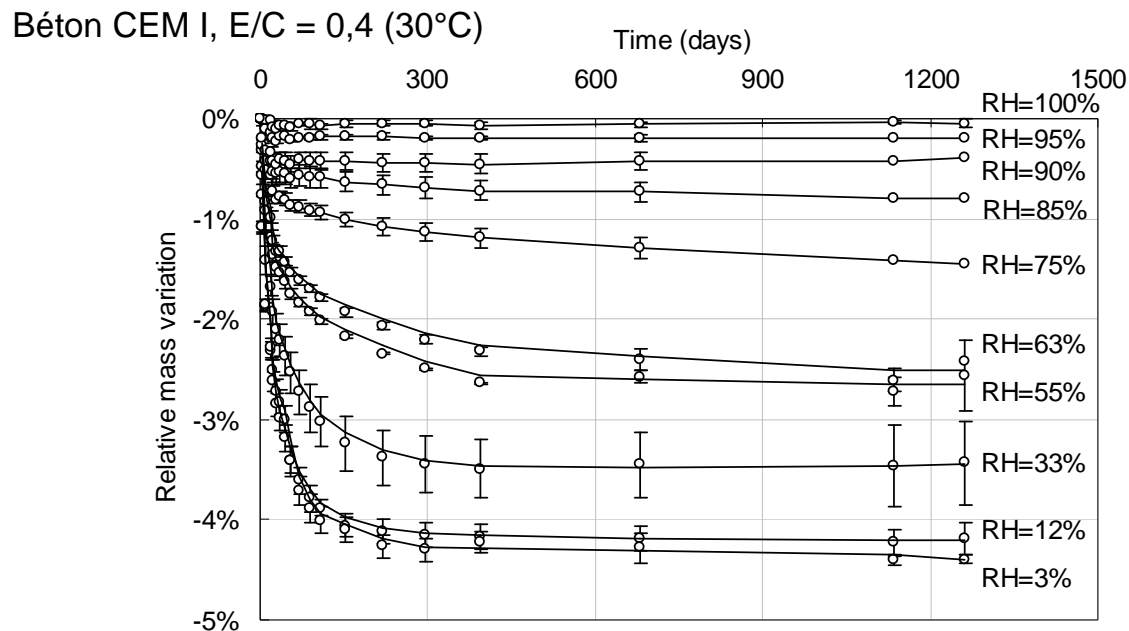
☐ Isotherme de désorption

➤ Relie la quantité d'eau retenue dans le matériau en équilibre avec l'humidité relative extérieure (pour une température donnée)

➤ Caractérisation expérimentale classique

- Utilisation de solutions salines saturées
- Suivi de masse régulier → équilibre

Poyet (2009), Cement and Concrete Research 39(11), 1052-1059.



Description du transport d'eau



energie atomique • énergies alternatives

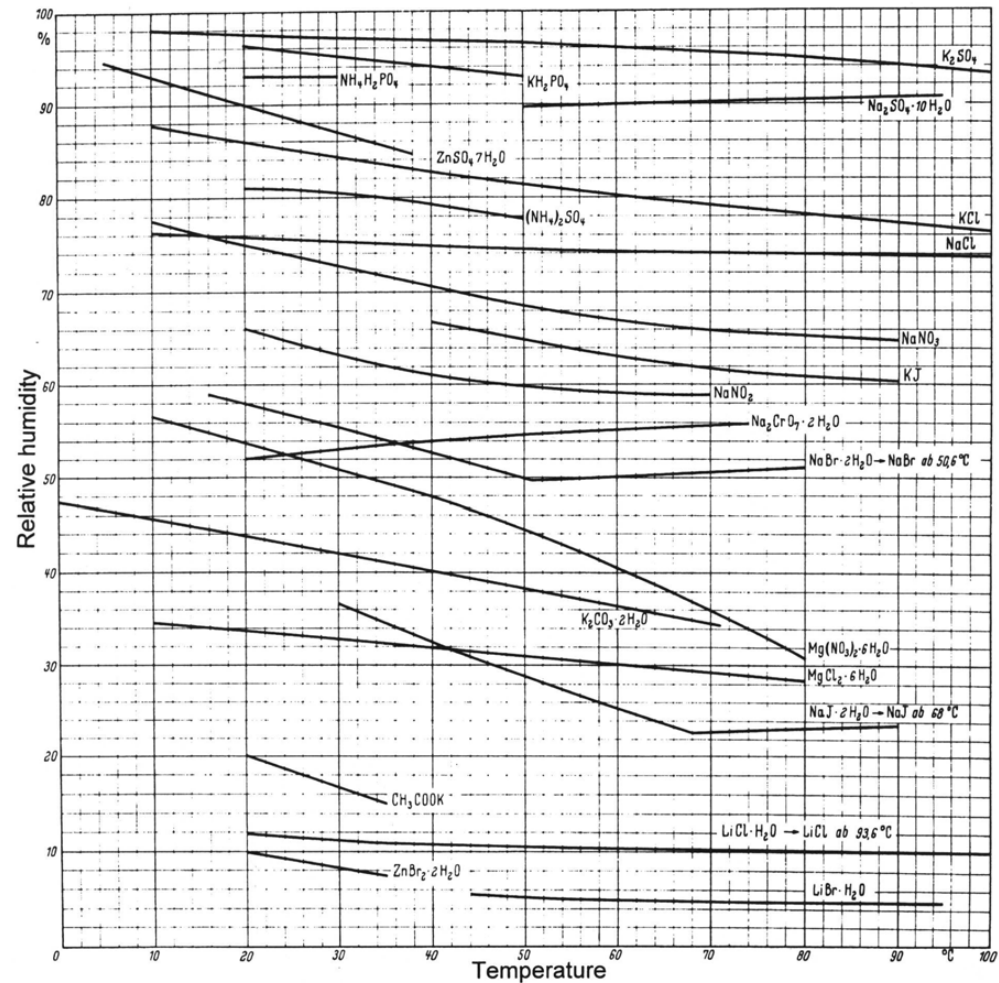
☐ Isotherme de désorption

➤ Solutions salines

Norme NF X 15-119 (1999)

Solution saline saturée (20°C)		HR
K ₂ SO ₄	Sulfate de potassium	98%
KCl	Chlorure de potassium	85%
NaCl	Chlorure de sodium	75%
NaBr	Bromure de sodium	59%
K ₂ CO ₃	Carbonate de potassium	43%
MgCl ₂	Chlorure de magnésium	33%
LiCl	Chlorure de lithium	12%

Scheider (1960), Holz als Roh- und Werkstoff 18(7), 269-272.

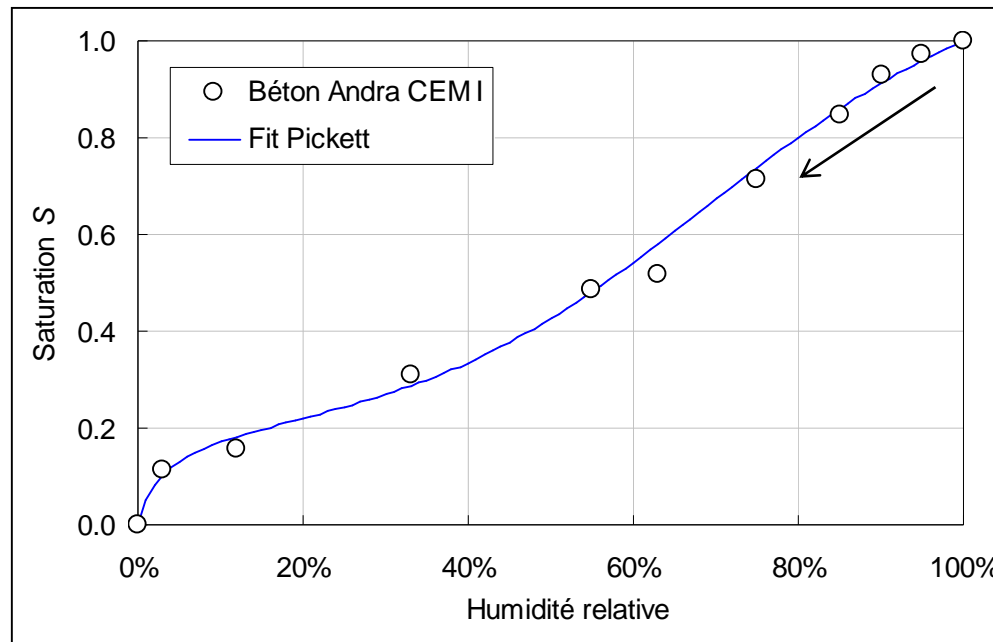


Description du transport d'eau



☐ Isotherme de désorption

- Exemple de résultat obtenu → béton CEM I, E/C=0,4 (30°C)
- Relation $S = S(h)$



Poyet (2009), Cement and Concrete Research 39(11), 1052-1059.

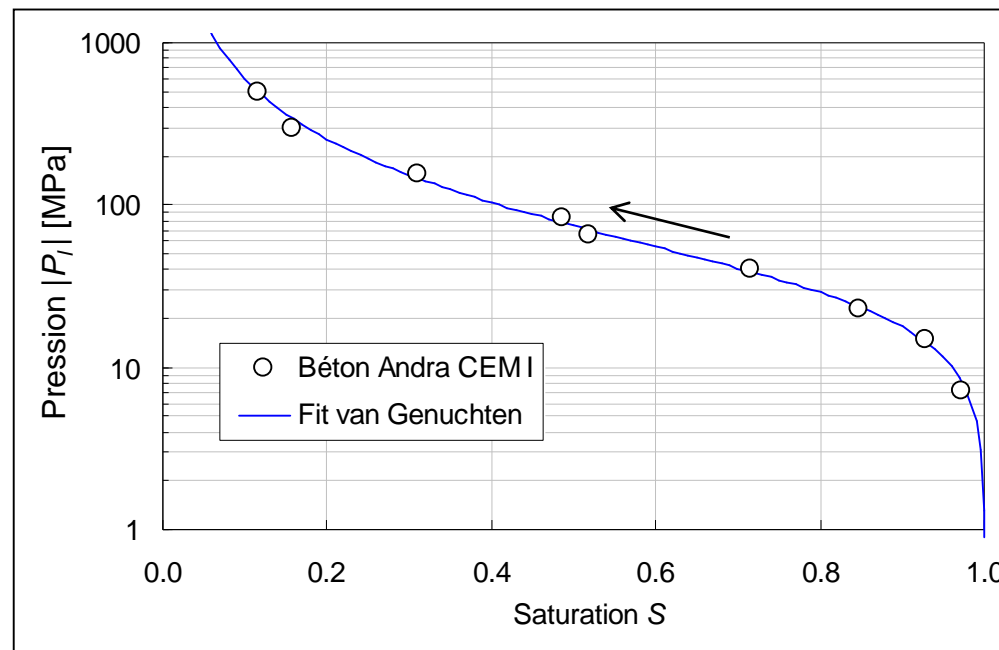
Description du transport d'eau



☐ Isotherme de désorption

- Relation $P_i = P_i(S)$
→ utilisation de la loi de Kelvin-Laplace
- Courbe capillaire

$$P_i = \rho \frac{RT}{\mathcal{M}} \ln(h)$$



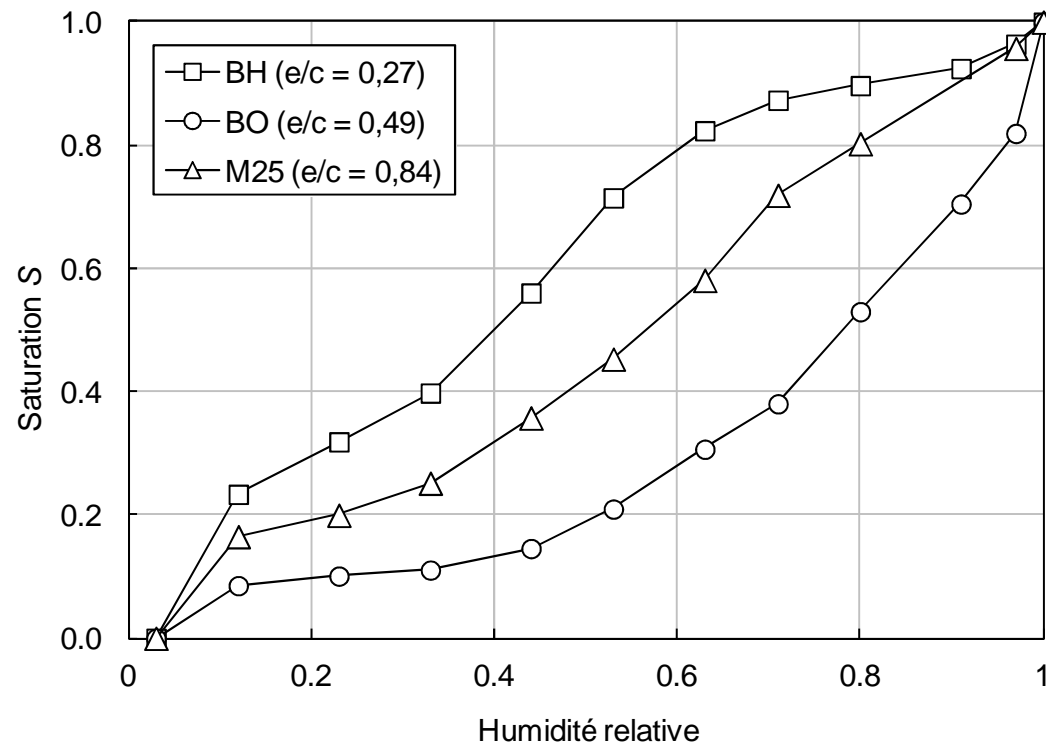
Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

☐ Isotherme de désorption

- Exemple de trois bétons (~23°C)
- Influence du béton → dépendance au réseau poreux



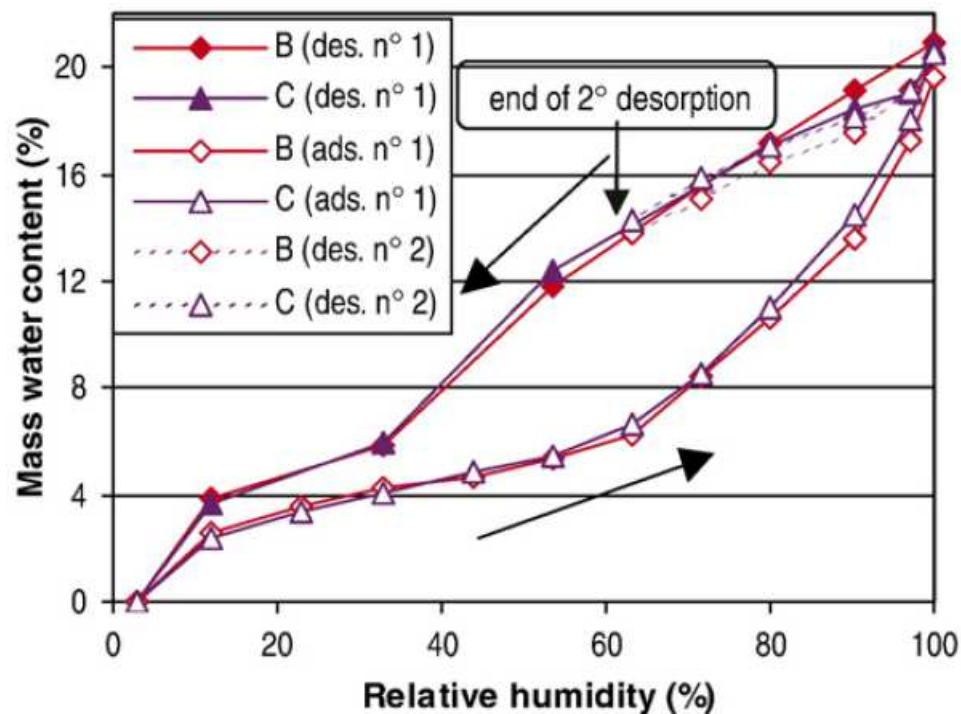
Baroghel-Bouny (2007),
Cement and Concrete
Research 37(3), 414-437.

Description du transport d'eau



☐ Isotherme de désorption

- Exemple de béton (disques fins) et pâte de ciment (broyée) (E/C = 0,45 et 23°C)
- Différence entre l'adsorption et la désorption
- Pas d'influence des granulats (dans ce cas)



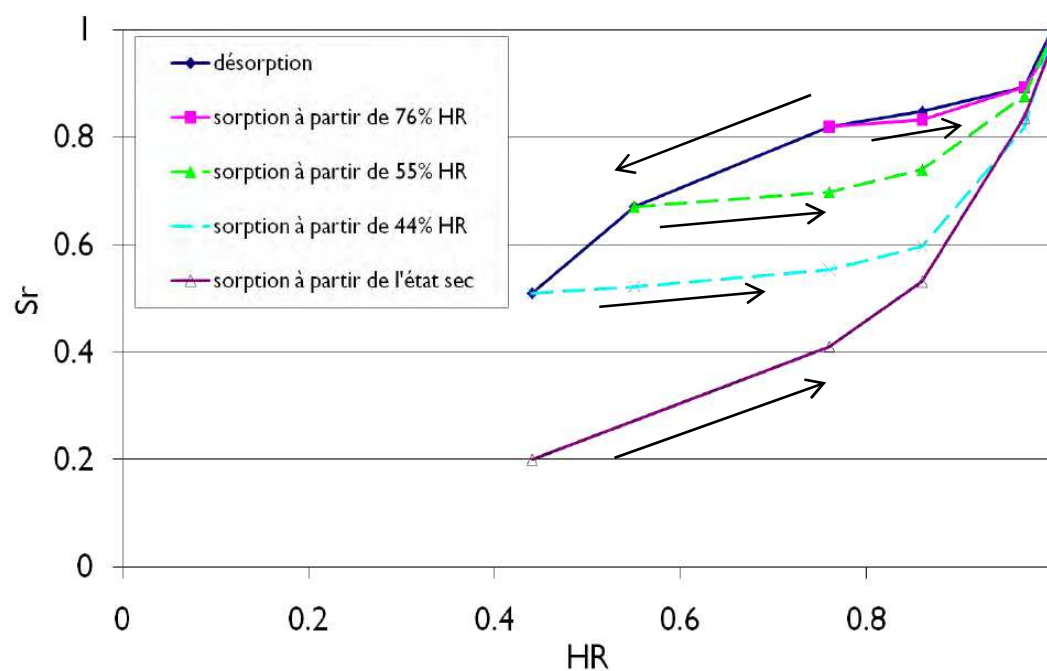
Baroghel-Bouny (2007),
Cement and Concrete
Research 37(3), 414-437.

Description du transport d'eau



☐ Isotherme de désorption

- Différence entre l'adsorption et la désorption
- Influence du chemin parcouru



Ranaivomanana *et coll.* (2011),
Cement and Concrete
Research 41(8), 817-827

Description du transport d'eau



❑ Perméabilité relative à l'eau liquide

➤ Décrit l'influence de la saturation sur la perméabilité (percolation, tortuosité du réseau poreux saturé)

- Etat saturé $\rightarrow k_r(1) = 1$
- Etat sec $\rightarrow k_r(0) = 0$

➤ Mesure directe impossible

➤ Estimation indirecte difficile et fastidieuse

❑ Utilisation du modèle de Mualem

➤ Description simplifiée du réseau poreux \rightarrow cylindres

➤ Estimation de k_r à partir de l'isotherme

$$k_r(S) = S^p \left[\frac{\int_0^S \frac{1}{P(u)} du}{\int_0^1 \frac{1}{P(u)} du} \right]^2$$

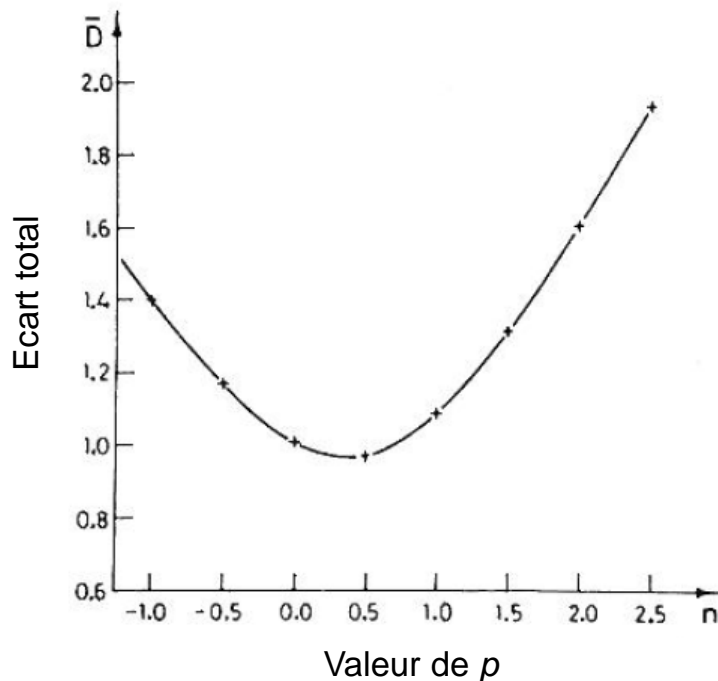
Mualem (1976),
Water Resources Research
12(3), 513-522.

Description du transport d'eau



□ Perméabilité relative à l'eau liquide

- Calage du paramètre p sur 45 sols (littérature)
- Minimisation des écarts entre résultats exp. et modèle
- Proposition d'une valeur (universelle) par défaut $p = +0,5$



Mualem (1976),
Water Resources Research
12(3), 513-522.

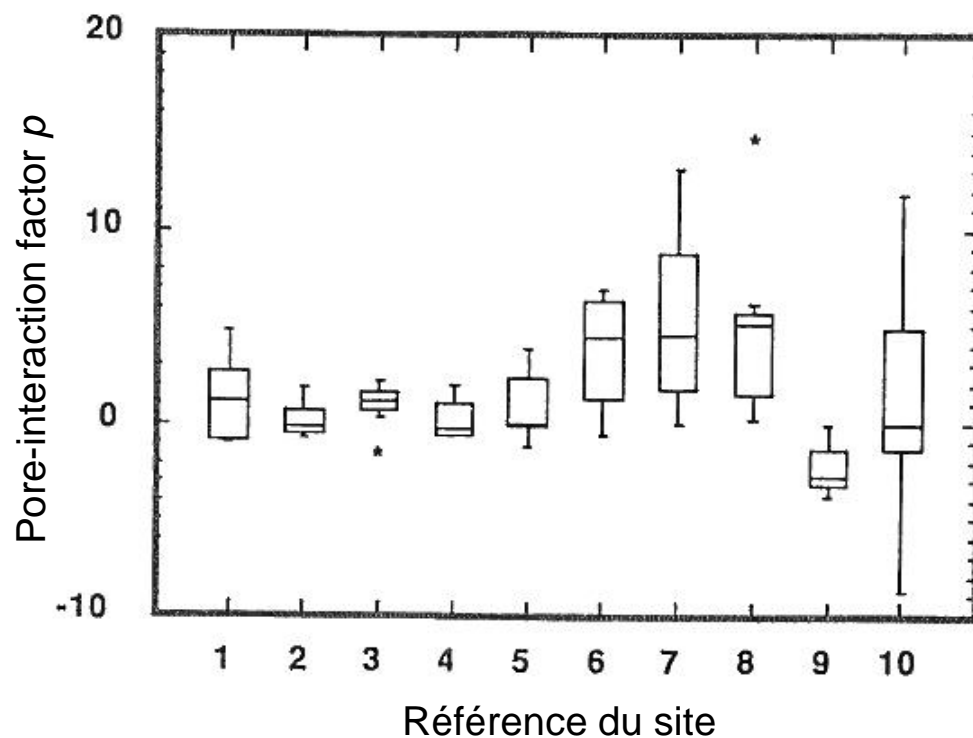
$$k_r(S) = S^p \left[\frac{\int_0^S \frac{1}{P(u)} du}{\int_0^1 \frac{1}{P(u)} du} \right]^2$$

Description du transport d'eau



❑ Perméabilité relative à l'eau liquide

- Proposition d'une valeur universelle $p = +0,5$
- Mais la valeur de p dépend du matériau (exemple des sols)



Schuh & Cline (1990),
Soil Science Society of America
Journal 54(6), 1509-1519.

Kosugi (1999), Soil Science
Society of America Journal
63(2), 270-277.

Leech *et coll.* (2008), ACI
Materials Journal 105(1), 44-51.

- Proposition $p = -0,5$ dans les sols et les bétons

Description du transport d'eau



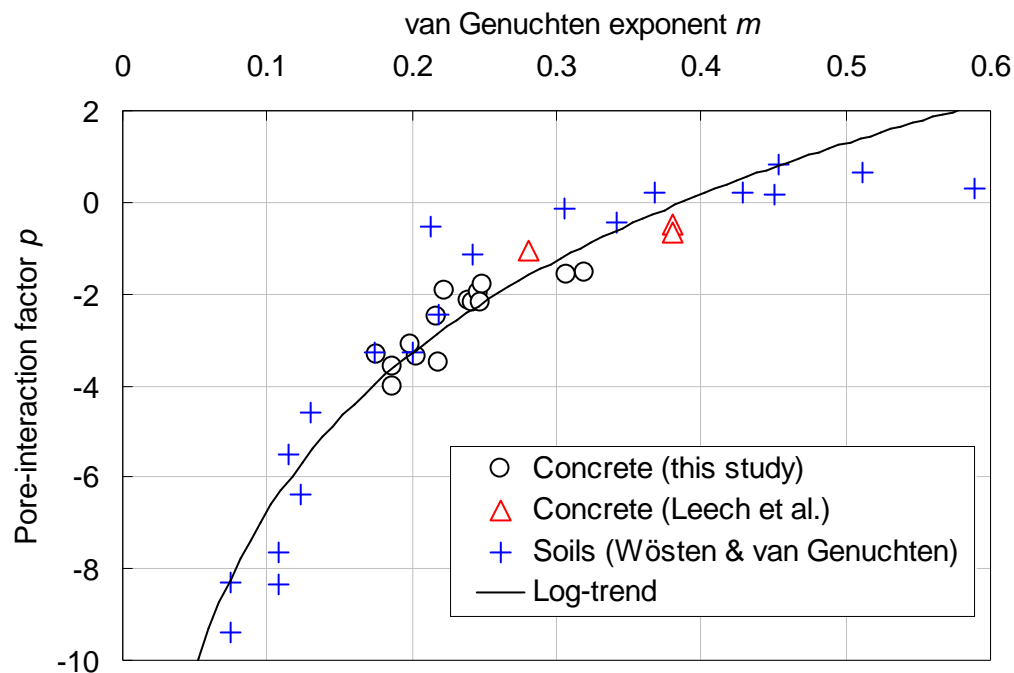
□ Perméabilité relative à l'eau liquide

- Proposition d'une valeur universelle $p = +0,5$
- Mais la valeur de p dépend du matériau (exemple des sols)
- Proposition $p = -0,5$ dans les sols et les bétons

Mualem (1976), Water Resources Research 12(3), 513-522.

Kosugi (1999), Soil Science Society of America Journal 63(2), 270-277.

Leech *et coll.* (2008), ACI Materials Journal 105(1), 44-51.



- Lien entre van Genuchten (m) / Mualem (p) ?

Poyet *et coll.* (2011), Cement and Concrete Research 41(10) 1015-1023

Description du transport d'eau



❑ Perméabilité relative à l'eau liquide

➤ Limites du modèle de Mualem

- Indétermination pour $S = 1$ + pas d'expression analytique !

➤ Modèle de van Genuchten

$$S(P) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{|P|}{P_0}\right)^n\right]^m} \quad \left(m = 1 - \frac{1}{n}\right)$$

Van Genuchten (1980), Soil Science Society of America Journal 44(5), 892-898.

➤ Obtention d'une solution analytique simple par le modèle de Mualem

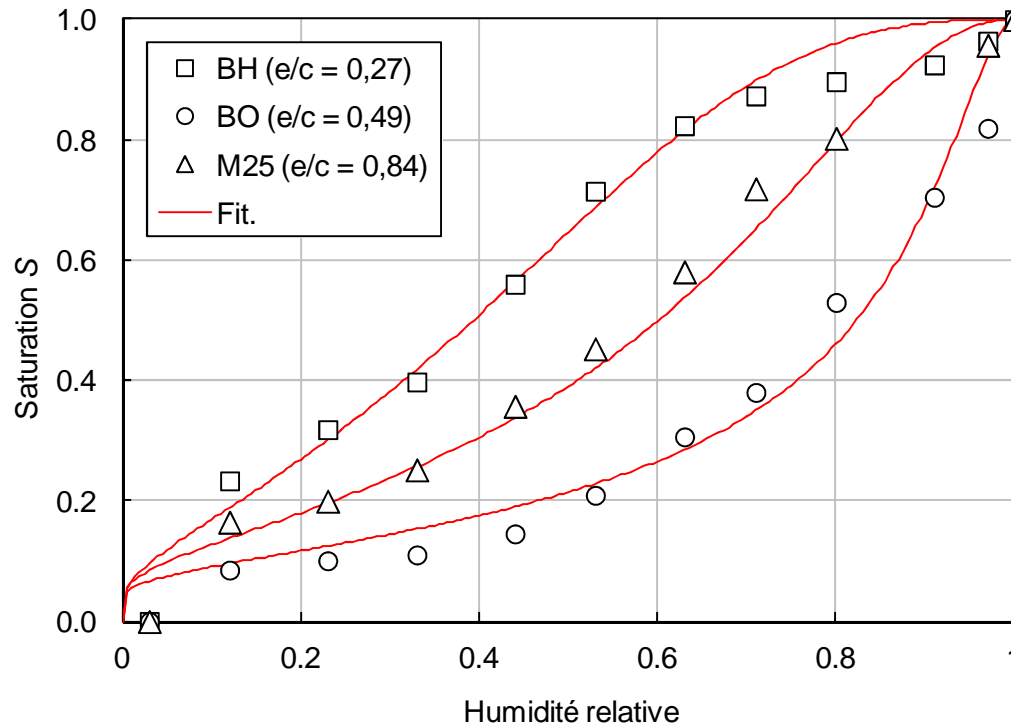
$$k_r(S) = S^p \frac{\left[\int_0^S \frac{1}{P(u)} du \right]^2}{\left[\int_0^1 \frac{1}{P(u)} du \right]^2} \quad \Rightarrow \quad k_r(S) = S^p \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$$

Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

- Utilisation du modèle de Mualem-van Genuchten
 - Calage du modèle sur les isothermes exp.



$$S(P) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{|P|}{P_0}\right)^n\right]^m}$$

$$\left(m = 1 - \frac{1}{n}\right)$$

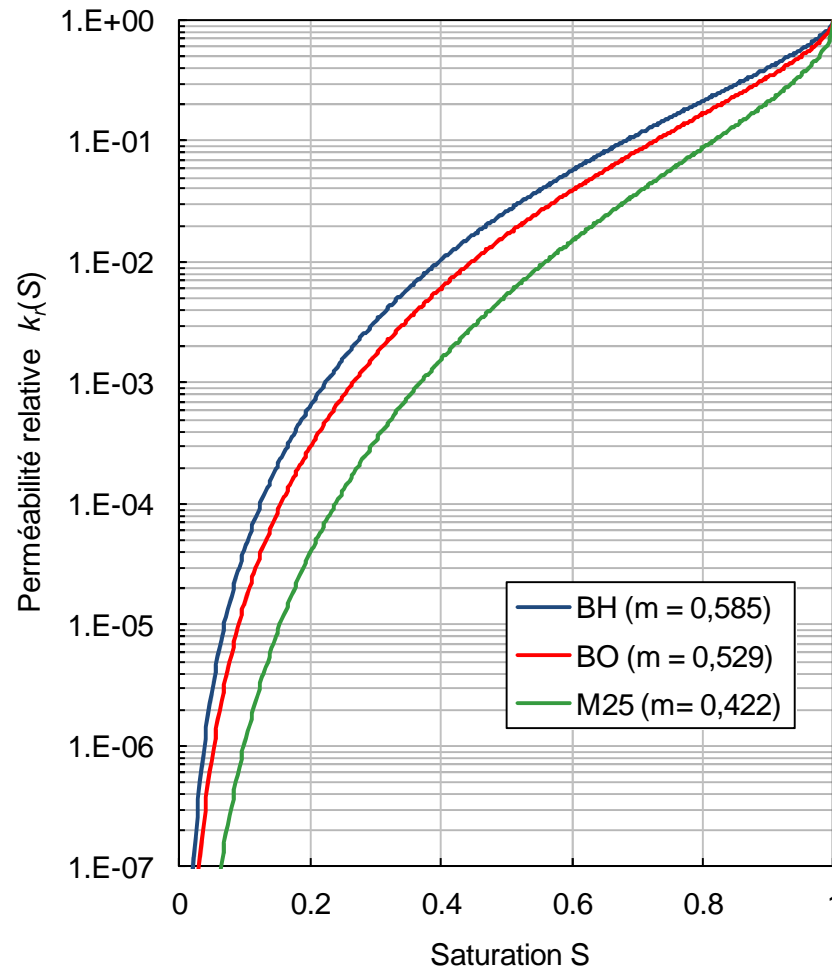
Paramètre	BH	BO	M25	Unité
P_0	90,4	47,5	11,6	MPa
m	0,585	0,529	0,422	-
n	2,409	2,125	1,729	-

Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

- Utilisation du modèle de Mualem-van Genuchten
 - Estimation de la perméabilité relative



$$k_r(S) = S^p \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$$

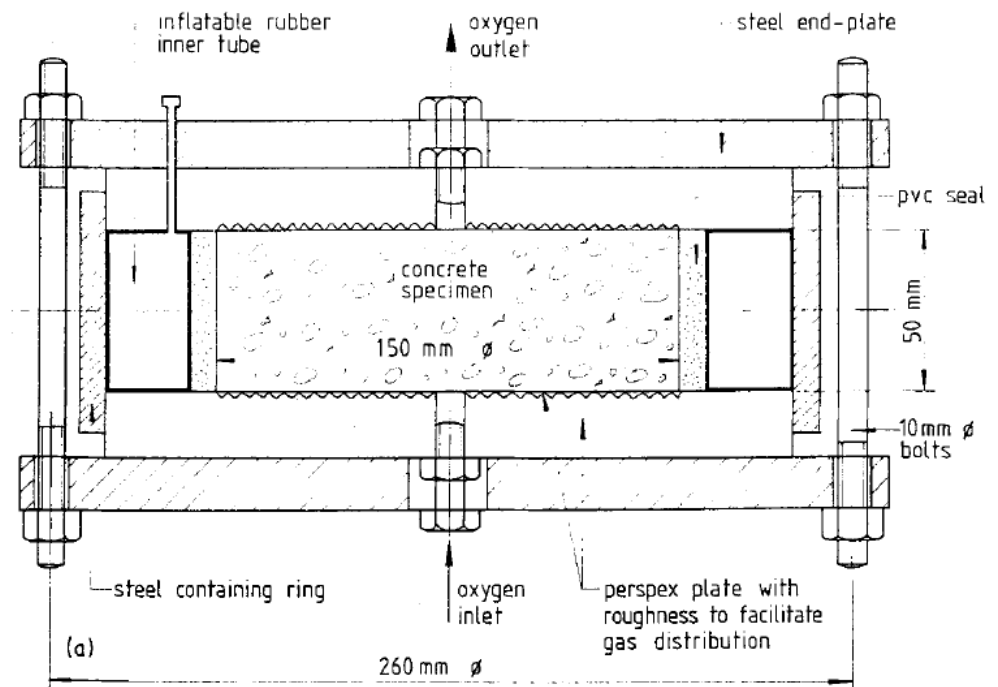
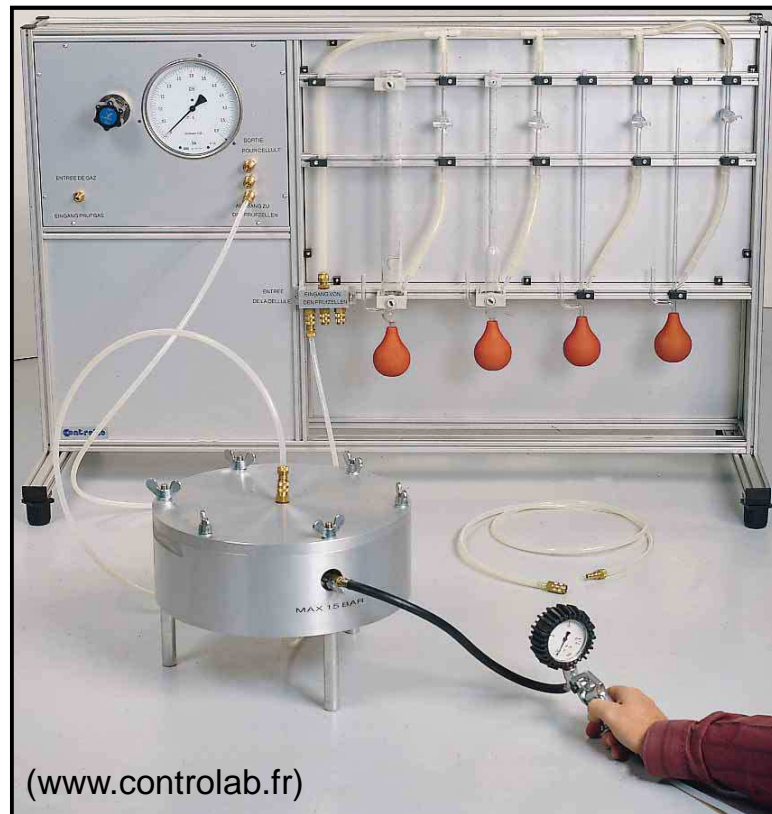
$(p = +0,5)$

Description du transport d'eau

❑ Perméabilité intrinsèque (K)

➤ Mesures directes → percolation d'un fluide (gaz ou liquide) sous pression (positive) à travers un échantillon + application de la loi de Darcy

➤ Perméamètre à gaz (charge constante) → Cembureau



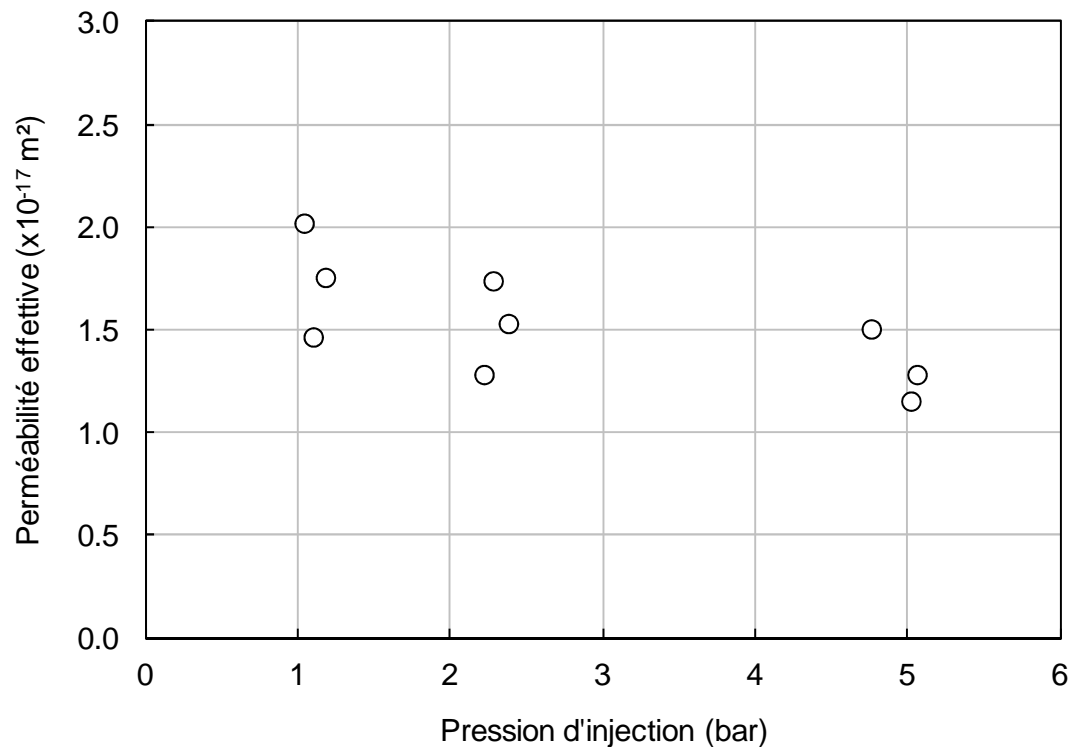
Kollek (1989), Materials and Structures 22(2), 225-230.

Description du transport d'eau



❑ Perméabilité intrinsèque (K)

- Mesure du débit en régime permanent
→ estimation de la perméabilité au gaz
- Effet de compressibilité du gaz
→ baisse perméabilité avec augmentation pression



Loi de Darcy

$$K_e(P) = \frac{2\mu Q L P_o}{S(P_i^2 - P_o^2)}$$

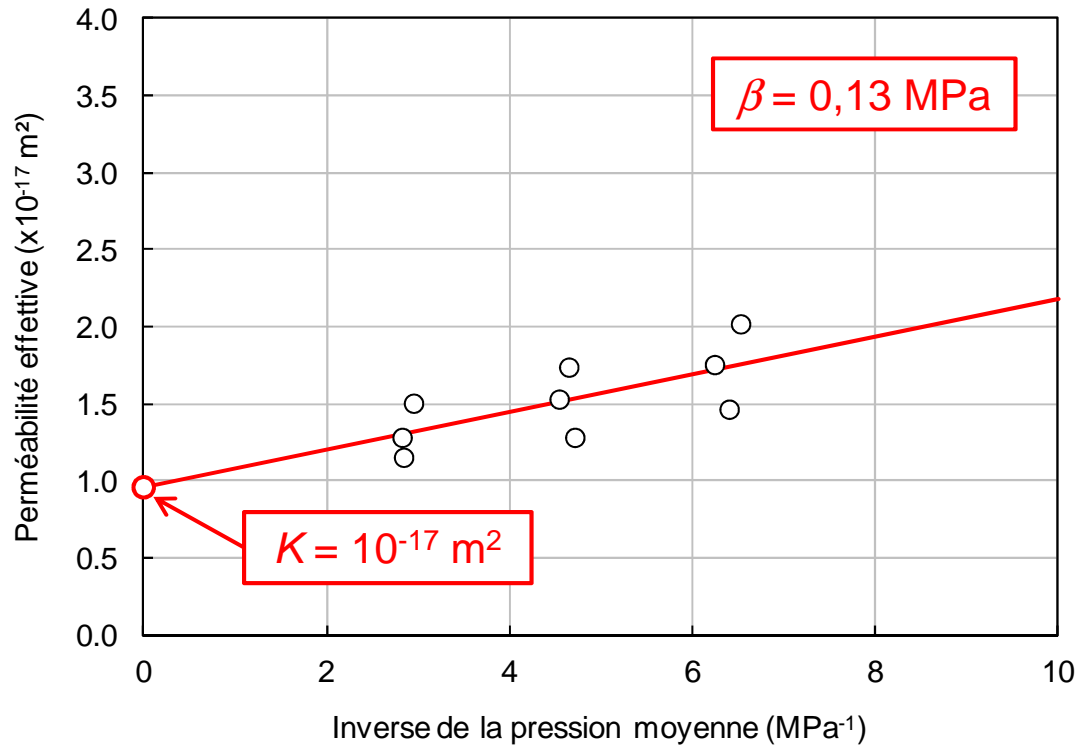
Description du transport d'eau



□ Perméabilité intrinsèque (K)

➤ Approche de Klinkenberg

→ estimation de la perméabilité intrinsèque



$$K_e(P) = K \left(1 + \frac{\beta}{P} \right)$$

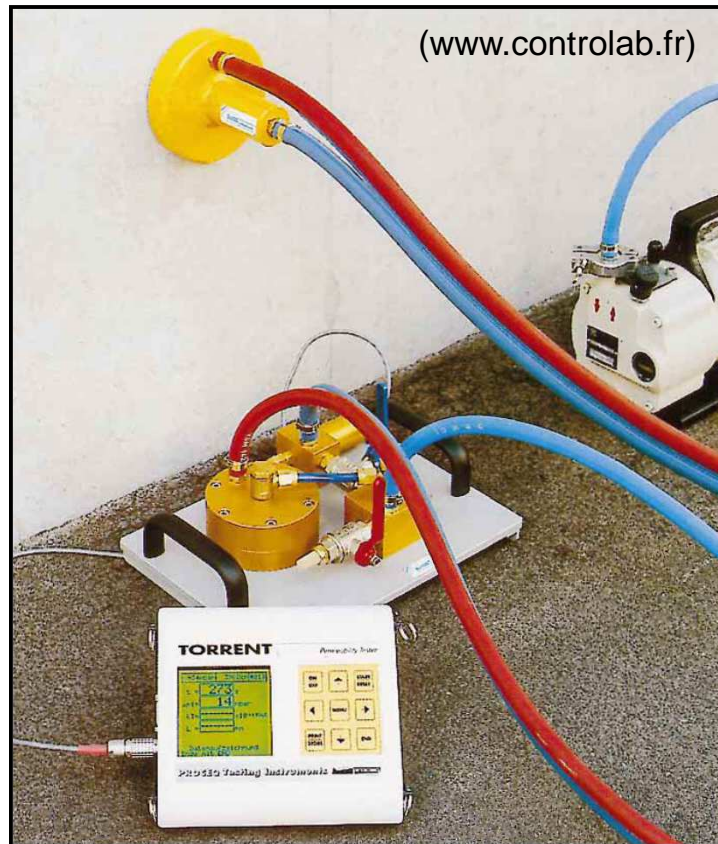
Klinkenberg (1941), American Petroleum Institute, Drilling and Production Practice, 200-214.

Description du transport d'eau



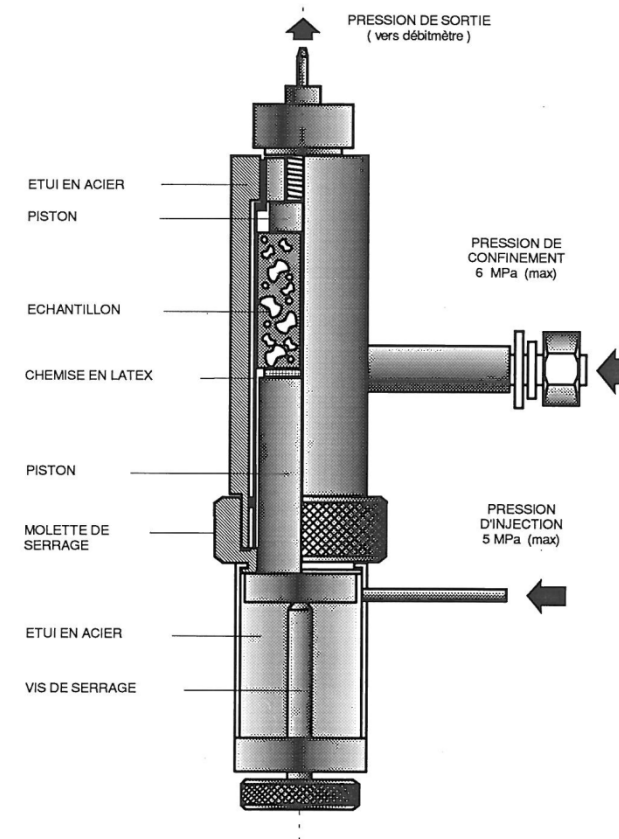
energie atomique • energies alternatives

- ❑ Perméabilité intrinsèque (K)
 - Autres perméamètres...



Perméamètre Torrent

Cellule Hassler



Gallé & Sercombe (2001), Materials and Structures 34(5), 619-628.

Description du transport d'eau



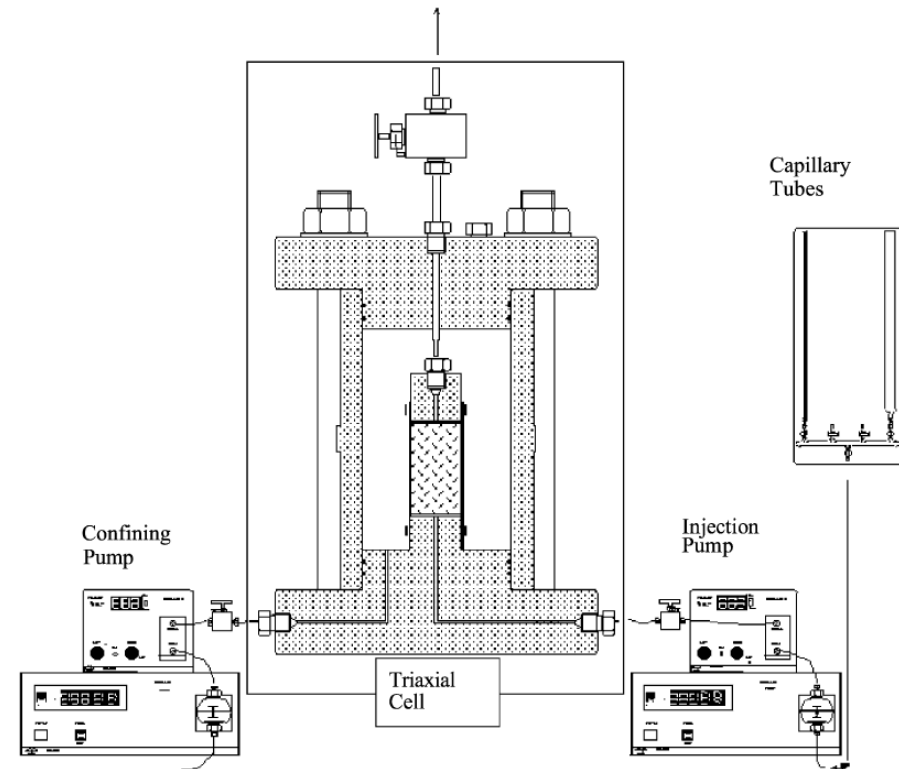
energie atomique • energies alternatives

❑ Perméabilité intrinsèque (K)

➤ Perméamètres à eau



Cellule triaxiale



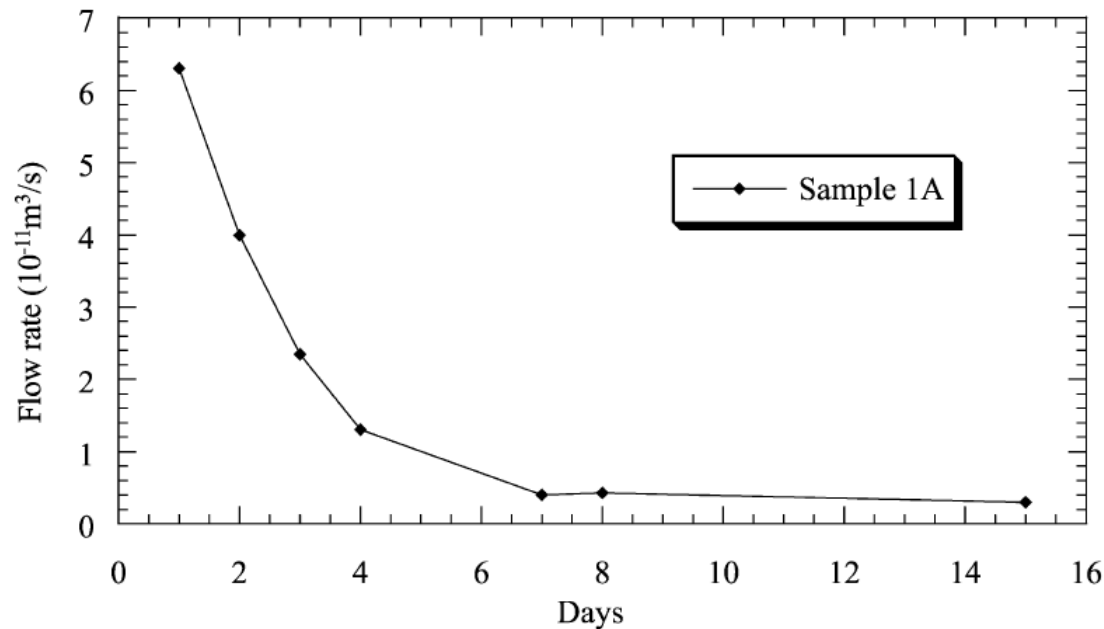
Loosveldt *et coll.* (2002), *Cement and Concrete Research* 32(9), 1357-1363.

Description du transport d'eau



❑ Perméabilité intrinsèque (K)

- Perméamètre à eau (cellule triaxiale + régime permanent)
- Exemple d'un mortier ($P_i = 1,5$ MPa)



Loi de Darcy

$$K = \frac{\mu Q L}{S(P_i - P_o)}$$

Loosveldt *et coll.* (2002), Cement and Concrete Research 32(9), 1357-1363.

Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

❑ Perméabilité intrinsèque (K)

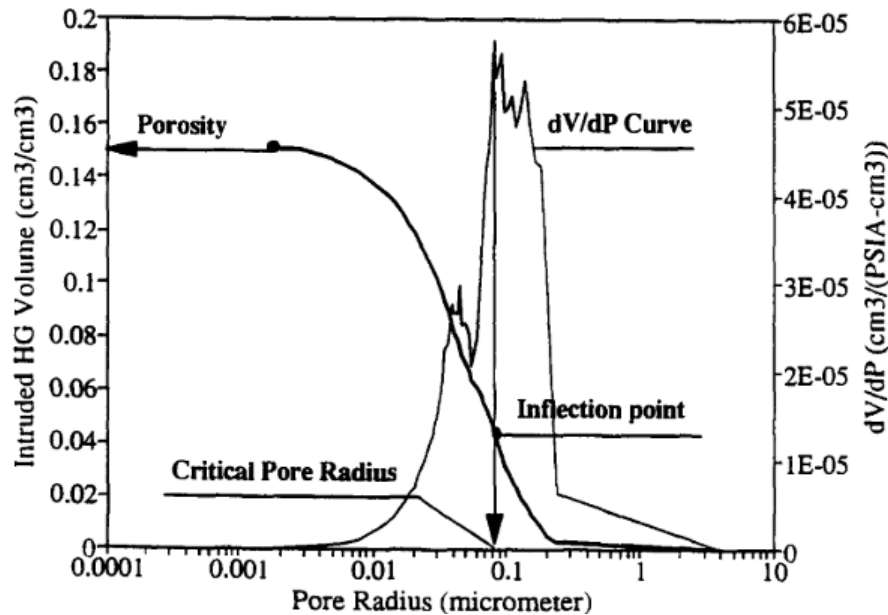
- Méthode analytique de Katz-Thompson
- Théorie de la percolation + MIP

Katz & Thompson (1984), Physical Review B 34(11) 8179-8181

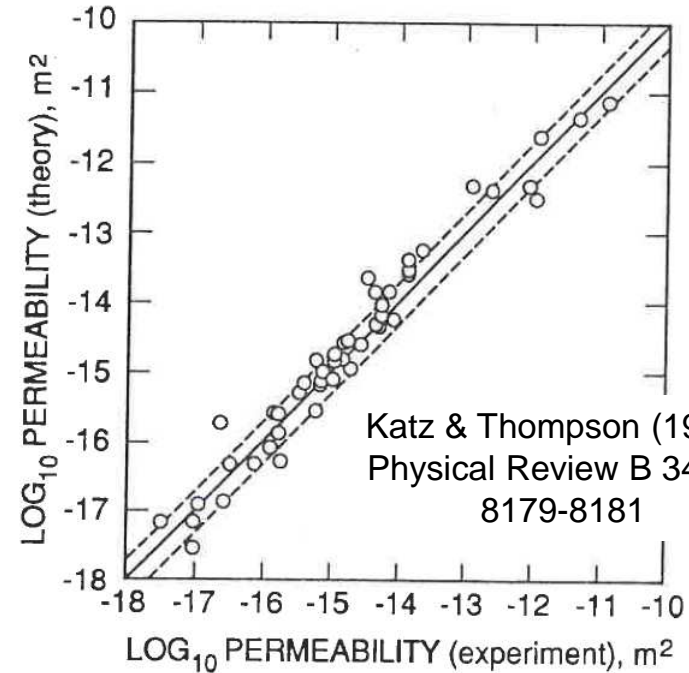
Katz & Thompson (1987), Journal of Geophysical Research 92(B1) 599-607

$$K = \frac{1}{226} d_c^2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \leftarrow \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) = \frac{d_{\max}^e}{d_c} \phi S(d_{\max}^e)$$

➤ Validation pour les roches



El-Dieb & Hooton (1994), Cement and Concrete Research 24(3) 443-455



Katz & Thompson (1984), Physical Review B 34(11) 8179-8181

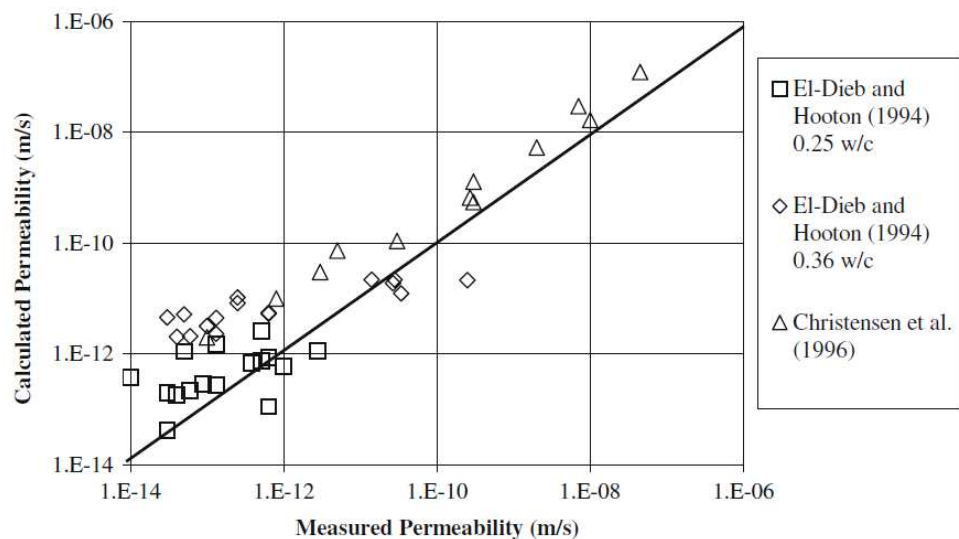
Description du transport d'eau



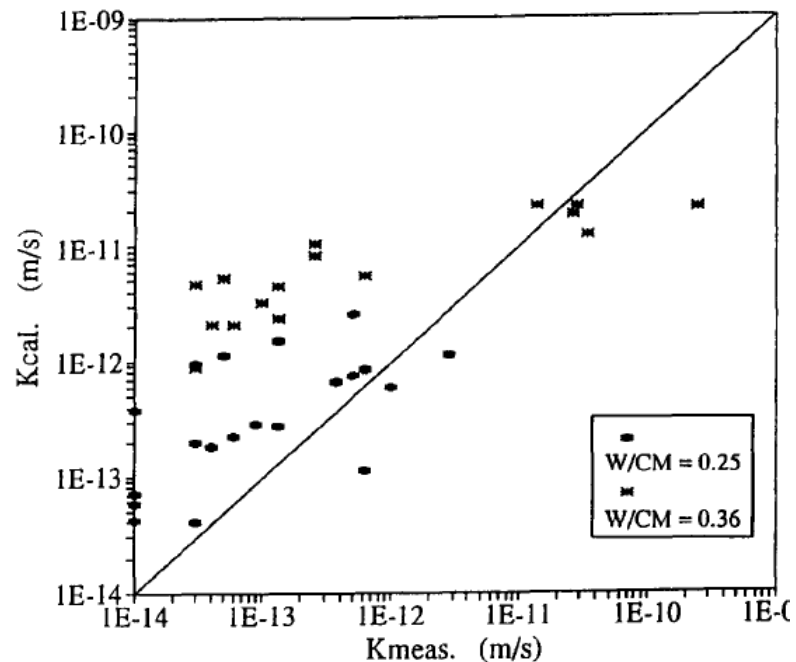
energie atomique • energies alternatives

□ Perméabilité intrinsèque (K)

- Méthode analytique de Katz-Thompson
- Résultats sur des pâtes de ciment



Nokken & Hooton (2008), Materials and Structures 41(1) 1-16



El-Dieb & Hooton (1994), Cement and Concrete Research 24(3) 443-455

Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

❑ Perméabilité intrinsèque (K)

➤ Perméa gaz

- Séchage préliminaire des échantillons (fissuration ?)
- Quelques heures d'essai
- K de l'ordre de 10^{-18} à 10^{-16} m²

➤ Perméa eau

- Saturation initiale
- Quelques semaines d'essai (interaction solide-fluide ?)
- K de l'ordre de 10^{-20} à 10^{-18} m²

➤ Valeur utilisée pour les simulations numériques

- K de l'ordre de 10^{-22} à 10^{-20} m²
- Mesures directes → indicateurs de durabilité
- Valeurs pour codes de calcul → technique alternative

Description du transport d'eau



- ❑ Perméabilité intrinsèque (K)
 - Estimation par analyse inverse
 - Essai supplémentaire → séchage isotherme + suivi de masse

- Simulation numérique (EF)
 - restitution de la cinétique de perte de masse

$$\phi \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{K}{\eta} k_r \underline{\text{grad}}(P) \right]$$

- Identification de la perméabilité intrinsèque qui permet de décrire les résultats expérimentaux
 - tous les autres paramètres sont connus par ailleurs

Coussy *et coll.* (2001), European Journal of Environmental and Civil Engineering 5(2-3), 269-284.

Description du transport d'eau



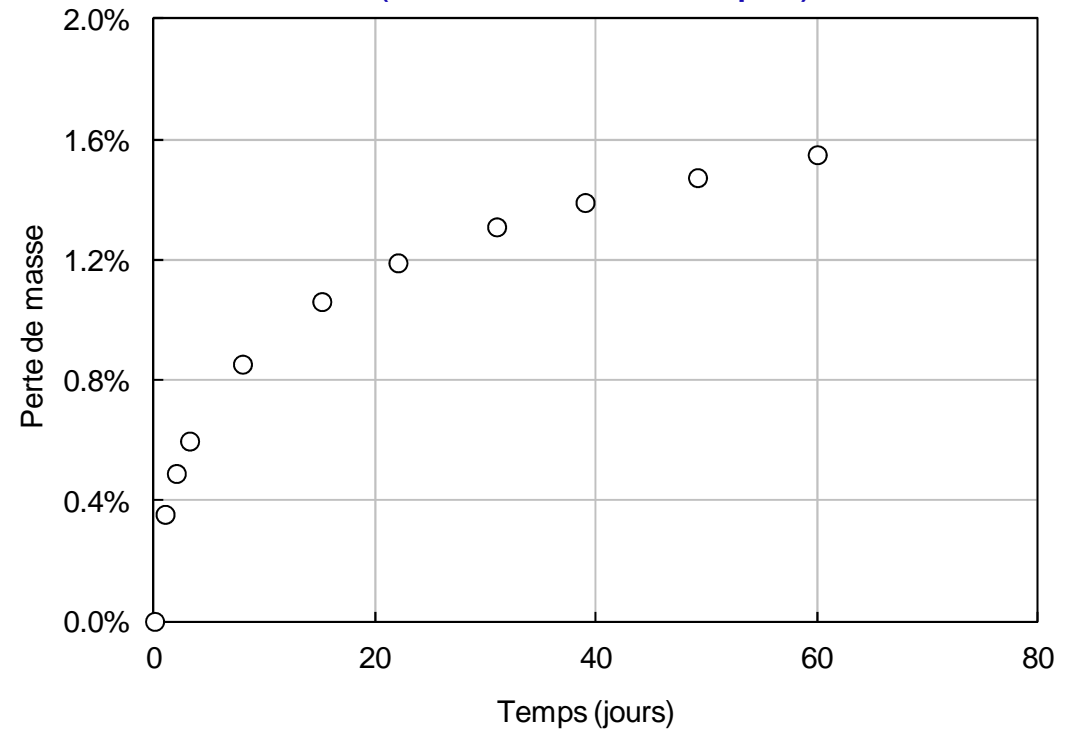
energie atomique • energies alternatives

- ❑ Perméabilité intrinsèque (K)
 - Exemple béton CEM I ($e/c = 0,47$)
 - Essai de séchage isotherme

Echantillons initialement saturés



Séchage à 20°C & HR=54%
(enceinte climatique)



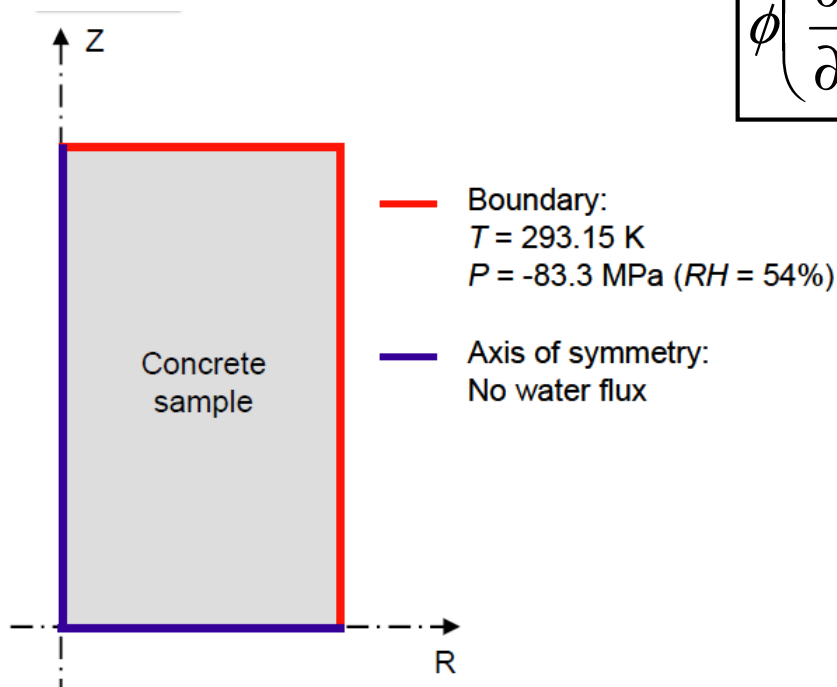
Description du transport d'eau



□ Perméabilité intrinsèque (K)

- Description du séchage de l'échantillon
- Utilisation de Cast3m (EF)
- Calcul axisymétrique

$$\phi \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{K}{\eta} k_r \underline{\text{grad}}(P) \right]$$



➤ Conditions initiales

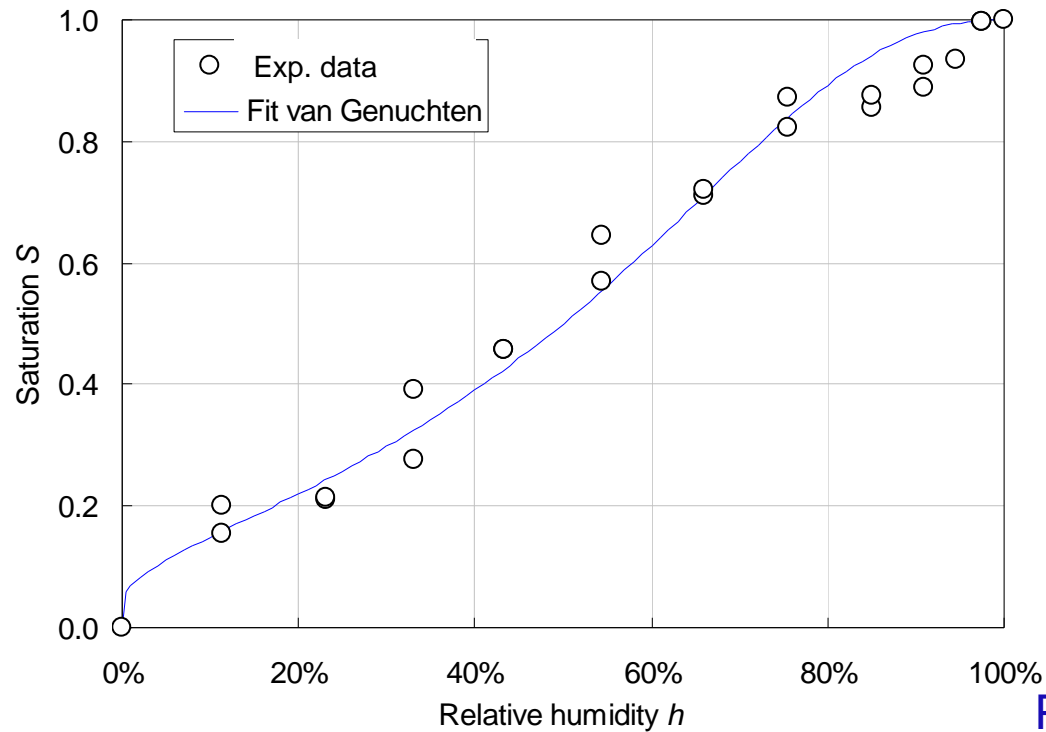
- $T^0 = 293,15 \text{ K}$
- $P^0 = 0 \text{ Pa (saturation)}$

Description du transport d'eau



❑ Perméabilité intrinsèque (K)

- Porosité $\phi = 11,6\%$
- Description de l'isotherme de désorption



$$S(P) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{|P|}{P_0}\right)^n\right]^m}$$

$$\left(m = 1 - \frac{1}{n}\right)$$



Paramètres de van Genuchten :

$$P_0 = 59,05 \text{ MPa} \text{ \& } m = 0,532$$

Description du transport d'eau



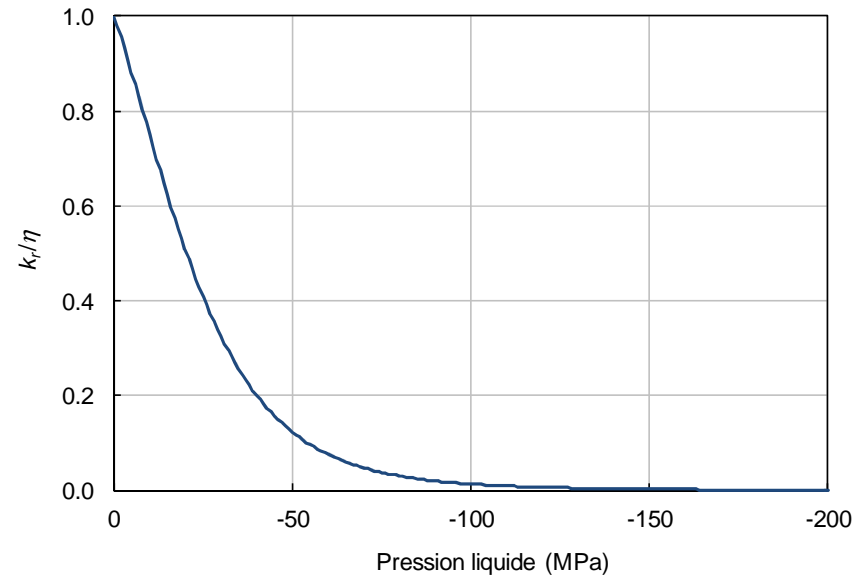
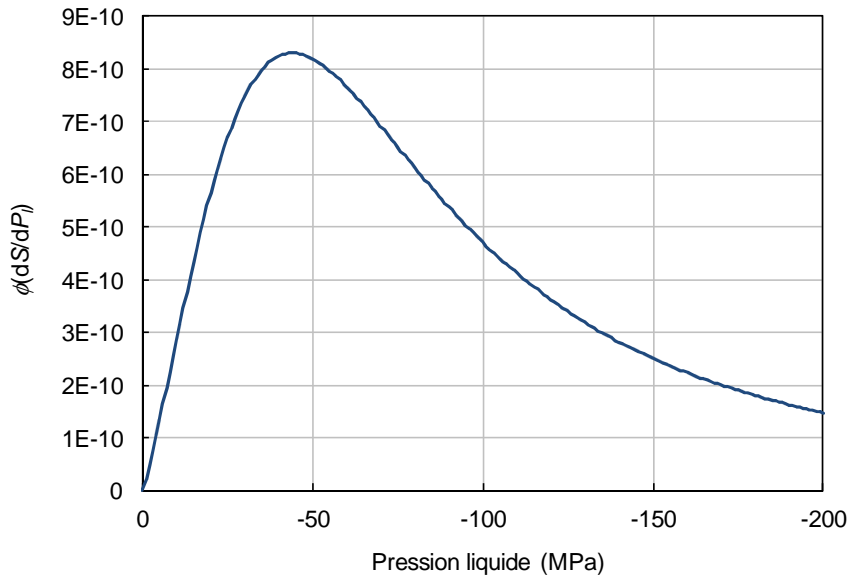
□ Perméabilité intrinsèque (K)

- Porosité $\phi = 11,6\%$
- Paramètres de van Genuchten : $P_0 = 59,05 \text{ MPa} - m = 0,532$

$$\phi \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{K}{\eta} k_r \underline{\text{grad}}(P) \right]$$

$$\phi \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right) = - \frac{m\phi}{(m-1)P_0} \left(\frac{|P|}{P_0} \right)^{\frac{m}{1-m}} \left[1 + \left(\frac{|P|}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-1-m}$$

$$\frac{k_r}{\eta} = \frac{\left\{ 1 - \left(\frac{|P|}{P_0} \right)^{\frac{m}{1-m}} \left[1 + \left(\frac{|P|}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m} \right\}^2}{\eta \left[1 + \left(\frac{|P|}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{mp}}$$



Description du transport d'eau

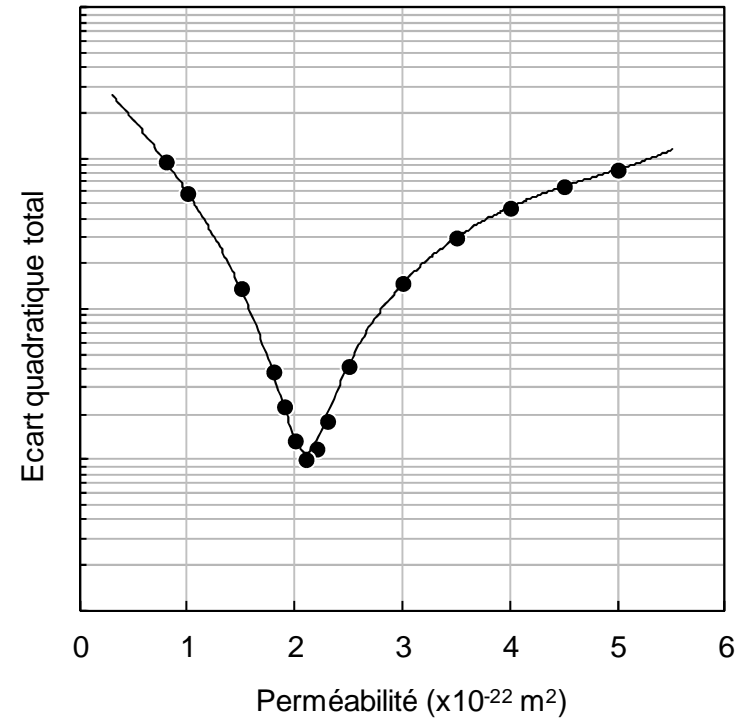
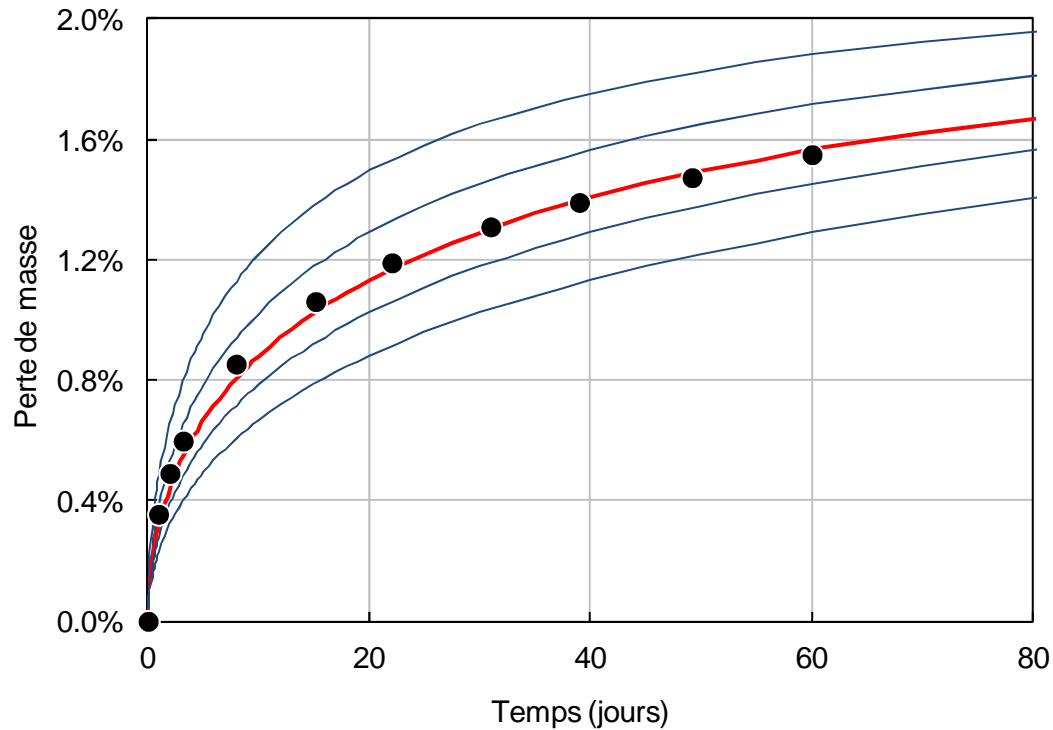


energie atomique • energies alternatives

□ Perméabilité intrinsèque (K)

➤ Minimisation des écarts entre simulation et expérience

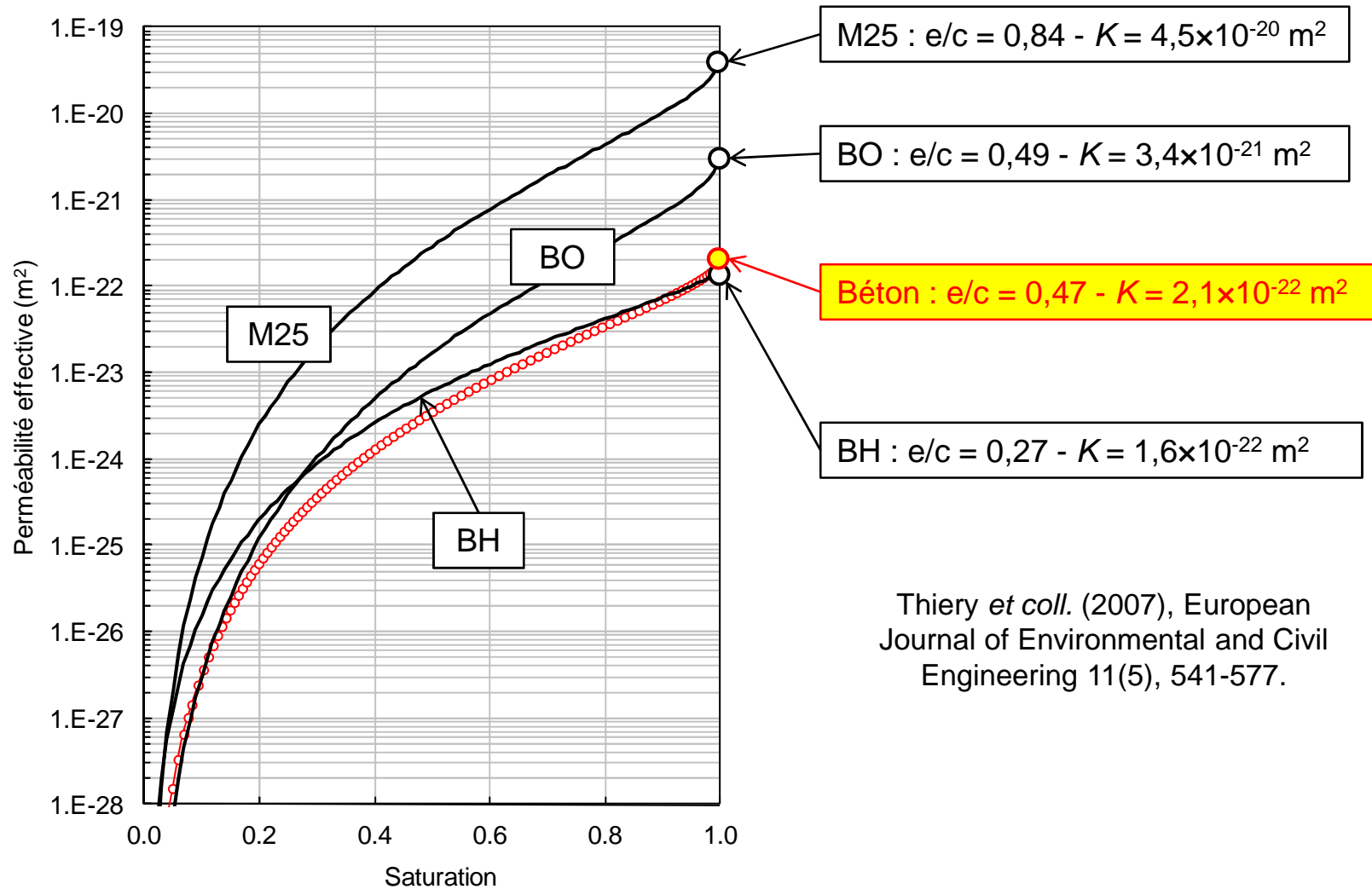
$$E(K) = \sum_i \left[\left(\frac{\Delta m}{m} \right)_i^{\text{exp}} - \left(\frac{\Delta m}{m} \right)_i^{\text{sim}} \right]^2 \quad \Rightarrow \quad K = 2,1 \times 10^{-22} \text{ m}^2$$



Description du transport d'eau



Evolution de la perméabilité effective ($K \times k_r$)



Description du transport d'eau

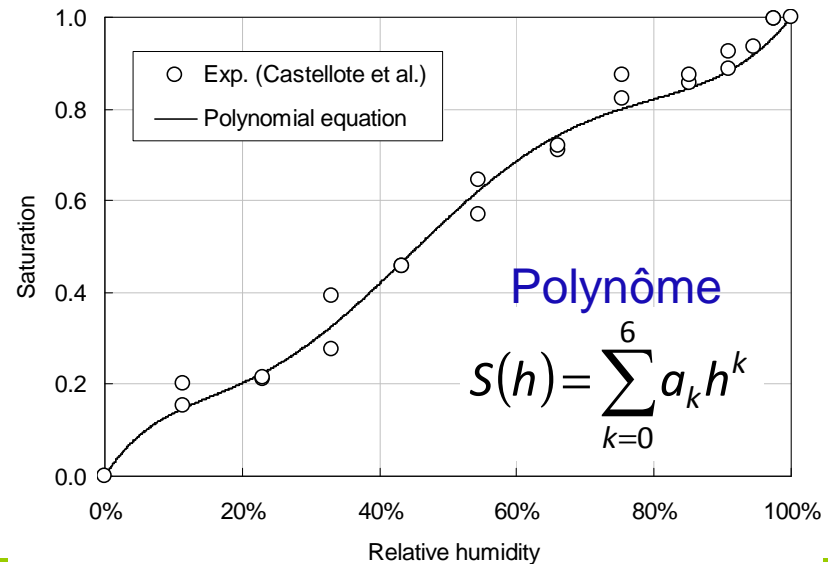
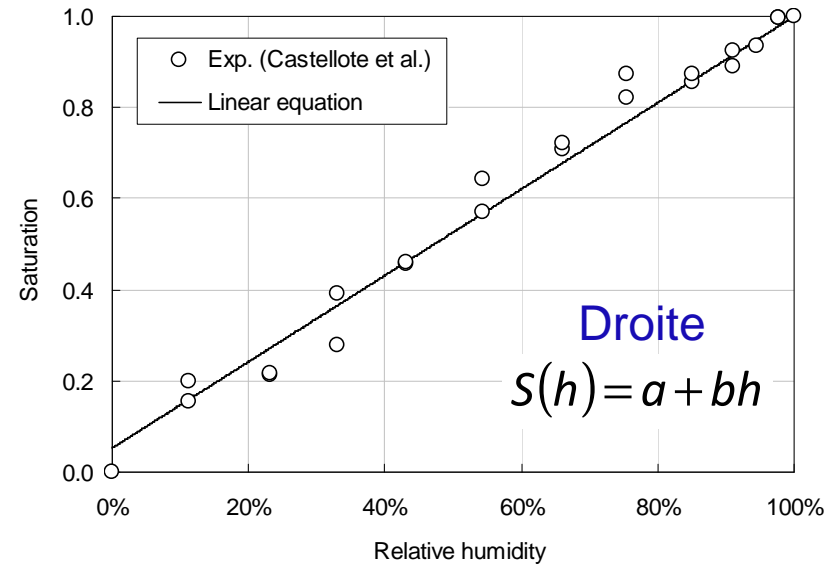
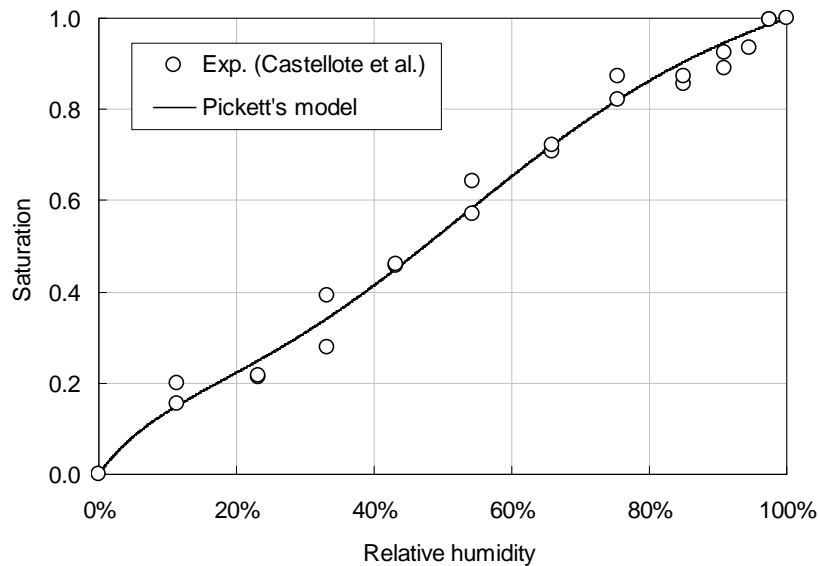
□ Pertinence/robustesse de l'analyse inverse

- Utilisation de diverses fonctions pour la description de l'isotherme



Modèle de Pickett

$$s(h) = CS_m \frac{h(1-h^p) + Dp(1-h)h^p}{(1-h)[(1-h) + C(h + bh^p)]}$$



Description du transport d'eau



energie atomique • energies alternatives

- Evaluation de la perméabilité relative k_r
 - Sur la base des fonctions précédentes

$$k_r(s) = s^p \left[\frac{\int_0^s \frac{1}{P(u)} du}{\int_0^1 \frac{1}{P(u)} du} \right]^2$$

$$k_r \approx \left(\frac{\mathcal{N}^p}{N} \right)^p \left[\frac{\frac{1}{2NP\left(\frac{N-1}{N}\right)} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-2} \frac{1}{P\left(\frac{k}{N}\right)}}{\frac{1}{2NP\left(\frac{\mathcal{N}}{N}\right)} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{\mathcal{N}-1} \frac{1}{P\left(\frac{k}{N}\right)}} \right]^2$$

Estimation numérique des intégrales (sommes de Riemann)

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{1}{2N} [f(a) + f(b)] + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} f\left(a + k \frac{b-a}{N}\right)$$

$$\int_0^1 \frac{1}{P(u)} du \approx \frac{1}{2NP\left(\frac{N-1}{N}\right)} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-2} \frac{1}{P\left(\frac{k}{N}\right)}$$

Description du transport d'eau

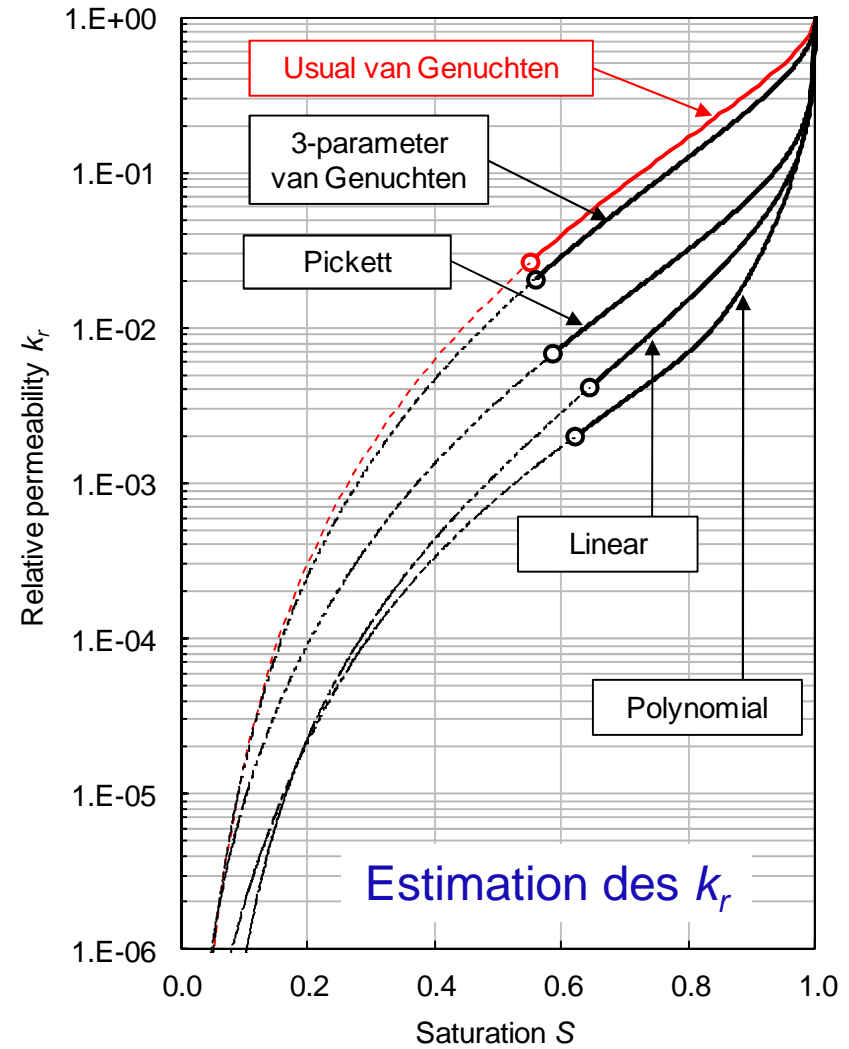
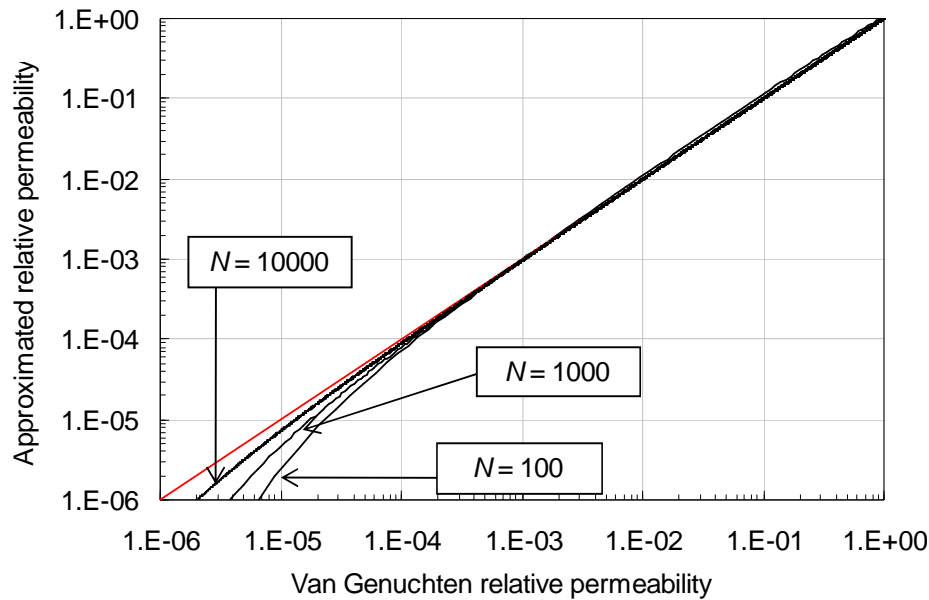
❑ Evaluation de la perméabilité relative k_r



energie atomique • energies alternatives

Validation de l'approximation (relations de van Genuchten)

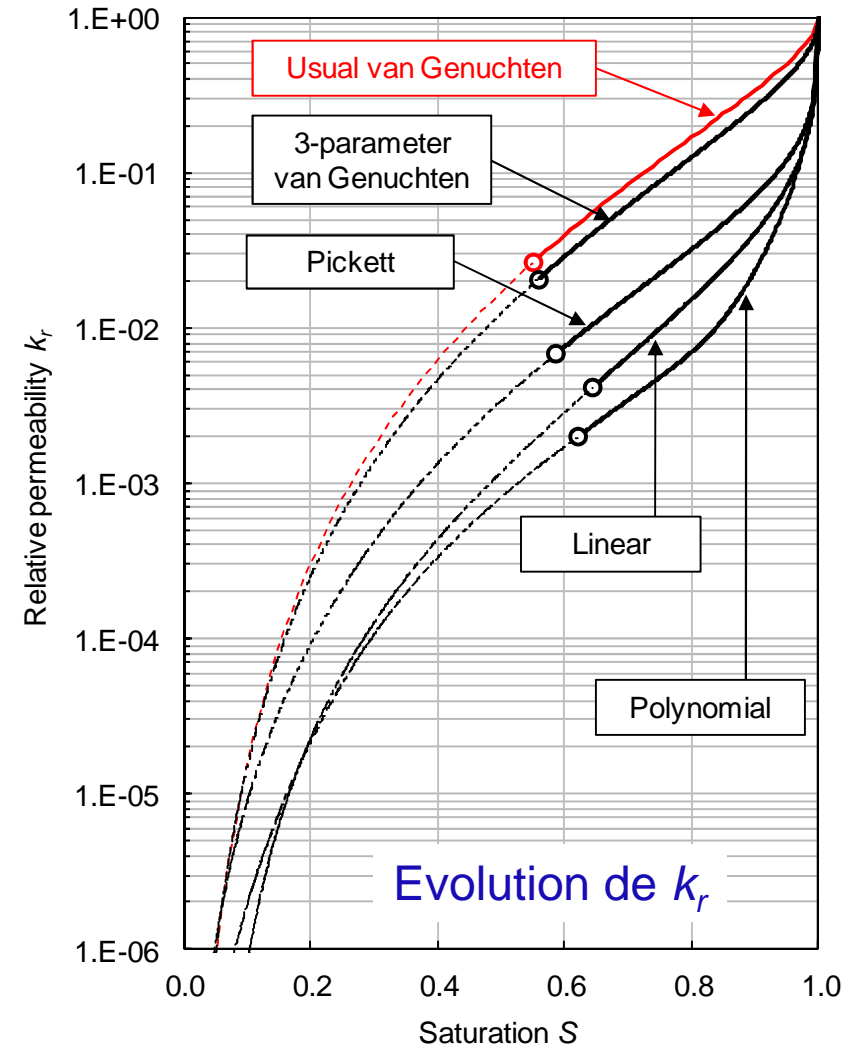
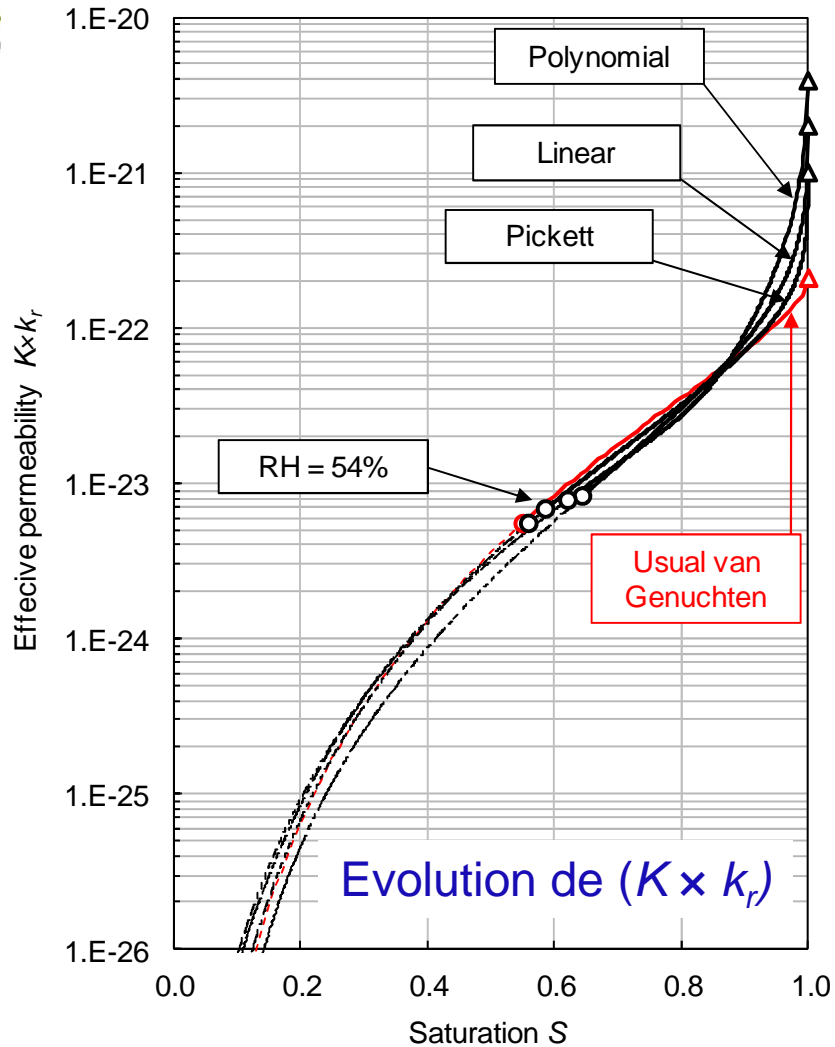
$$k_r(S) = S^p \left[1 - \left(1 - S^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2$$



Description du transport d'eau

Evolution de la perméabilité effective ($K \times k_r$)

Poyet (2013), Cement and Concrete Composites 35(1) 127-135

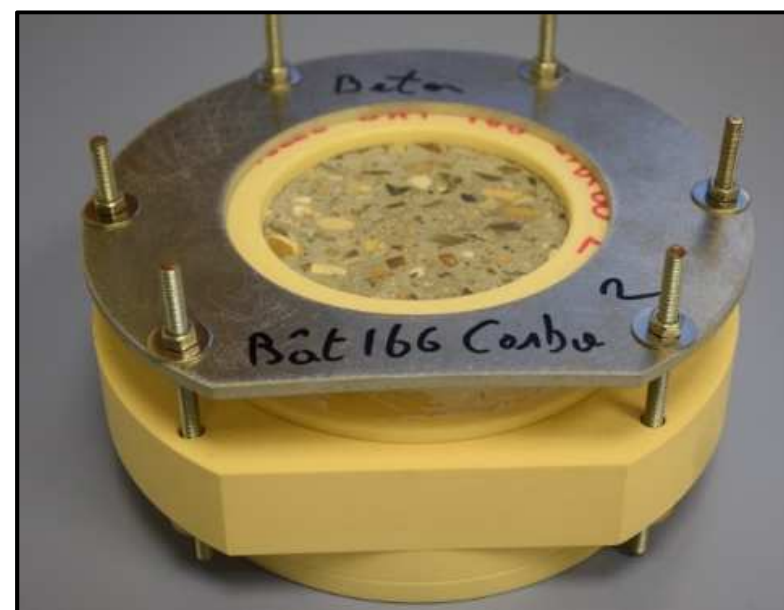
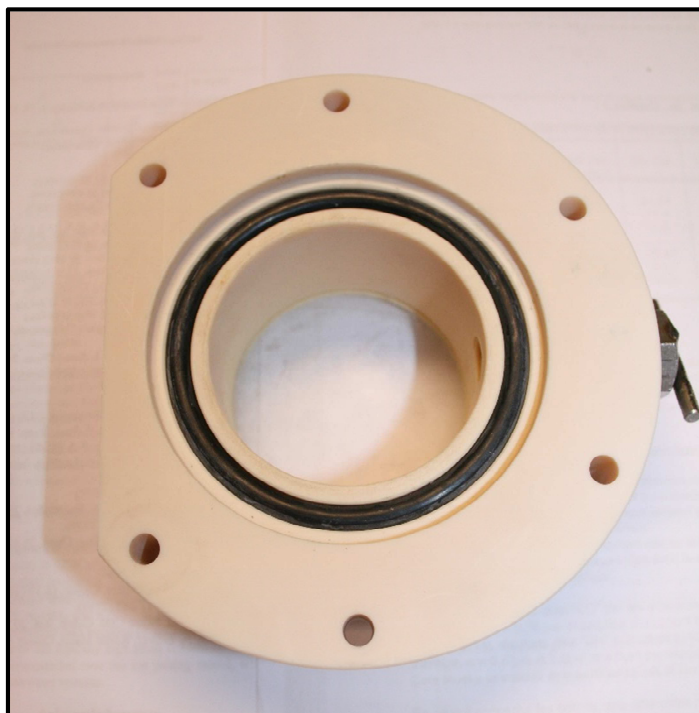
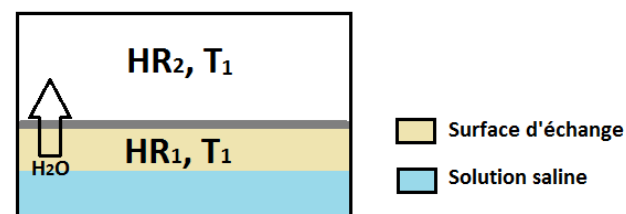


Description du transport d'eau



❑ Evaluation alternative de la perméabilité

- Approche expérimentale → essai à la coupelle
- Béton = frontière séparant deux environnements (HR) ≠
- Flux d'eau traversant l'échantillon



Description du transport d'eau



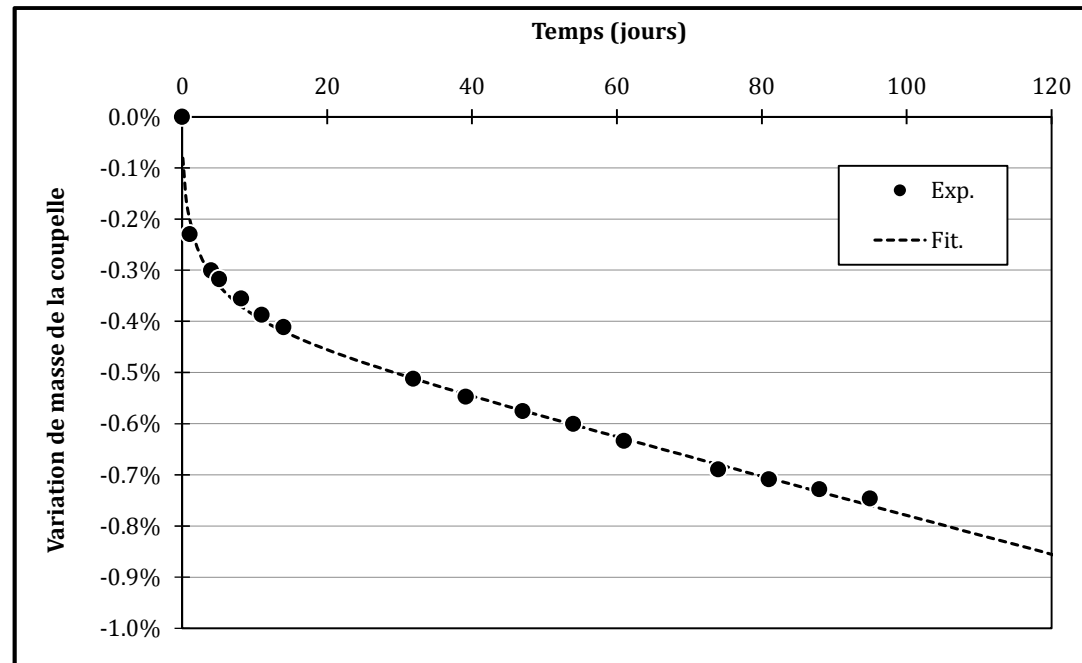
□ Evaluation alternative de la perméabilité

- Approche expérimentale → essai à la coupelle
- Flux d'eau traversant l'échantillon
- Suivi de masse de la coupelle → estimation du flux d'eau

En Régime Permanent
+ K_e cste sur le palier d'HR
+ Loi de d'Arcy

$$K_e = - \frac{\dot{m} \eta}{\rho \Sigma \frac{\Delta P}{t}}$$

$$\Delta P = -\rho \frac{RT}{M} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$



Description du transport d'eau



❑ Evaluation alternative de la perméabilité

- Validation de l'approche
- Comparaison essais à la coupelle / analyse inverse
- Cas d'une pâte de CEM I ($e/c = 0,40$)

Auroy *et coll.* (2015),
Cement and Concrete
Research 74, 44-58

