

Comportement des réparations structurales en béton :

Couplage des effets hydriques et mécaniques

Comportement des réparations structurales en béton :

Couplage des effets hydriques et mécaniques

Laurent Molez

Denis Beaupré

Yves Berthaud

Benoît Bissonnette

Contexte industriel

- Un grand nombre d'ouvrage dégradés
- Des coûts importants
 - Près de la moitié de l'activité dans le secteur des travaux public
- Peu d'expertise dans les techniques et les matériaux *pour* les réparations



Plan de la présentation

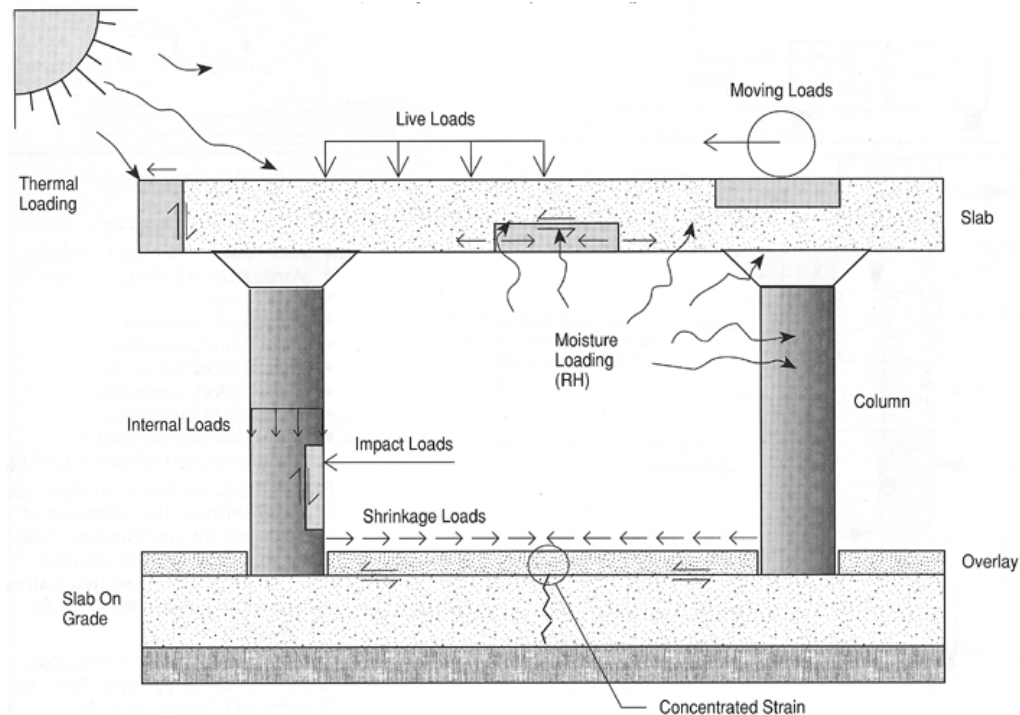
- Mise en contexte
 - Concept d'une réparation mince ancrée
 - Récapitulatif des mécanismes physiques
 - Retrait endogène et de séchage
 - Comportement viscoélastique du béton
- Étude expérimentale
 - Caractérisation des bétons utilisés
 - Réparations soumises au séchage
 - Réparation soumises au séchage et à un chargement mécanique
- Modélisation
 - Description des modèles
 - Identification et validation
 - Étude d'influence
- Conclusions

Objectifs principaux

- Compréhension du comportement à court terme et à long terme des réparations structurales en béton
- Conséquences / influence du retrait et du fluage
- Quels types de dégradations peut-on observer ?
- Capacité portante des éléments réparés
- ...

Concept d'une réparation mince ancrée

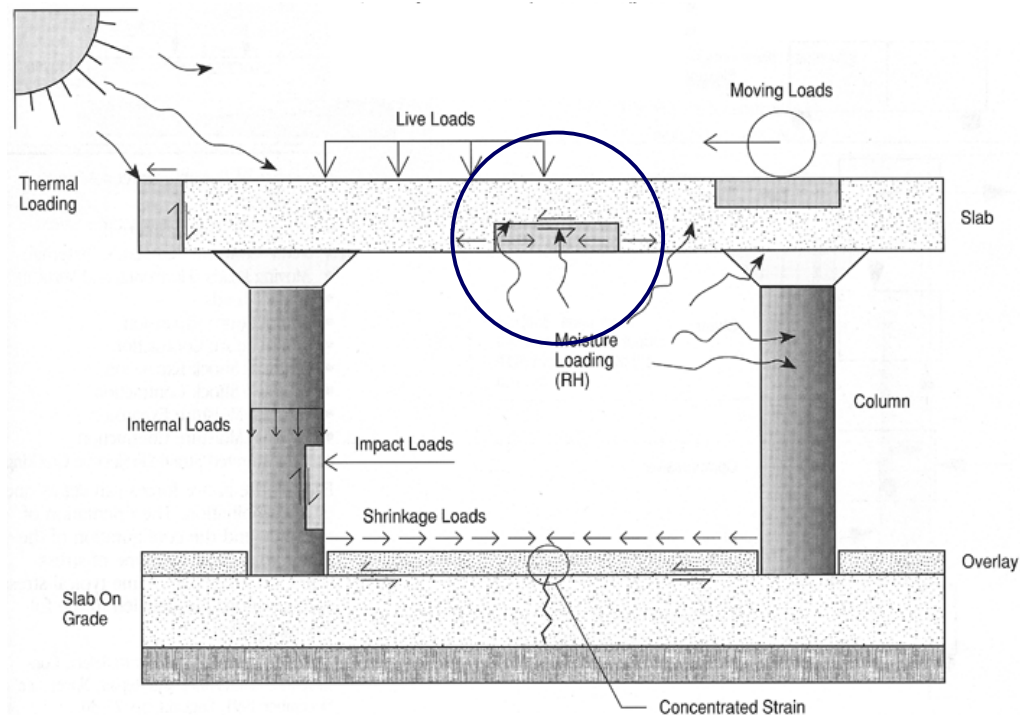
- Système de réparation
 - Évaluer les sollicitations
 - **Mécaniques** (chargement mécanique)
 - **Hydriques** (séchage, cycle de mouillage / séchage, ...)
 - Thermiques (hydratation, soleil, ...)
 - Évaluer les besoins (durabilité, étanchéité, esthétique, ...)



(Emmons 1993)

Concept d'une réparation mince ancrée

- Système de réparation
 - Évaluer les sollicitations
 - **Mécaniques** (chargement mécanique)
 - **Hydriques** (séchage, cycle de mouillage / séchage, ...)
 - Thermiques (hydratation, soleil, ...)
 - Évaluer les besoins (durabilité, étanchéité, esthétique, ...)



(Emmons 1993)

Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps

Nouveau béton

Vieux béton



Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps

Nouveau béton

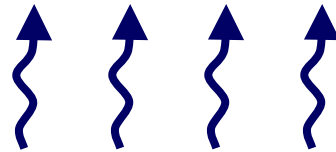
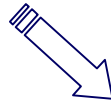
Vieux béton



Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps

Séchage



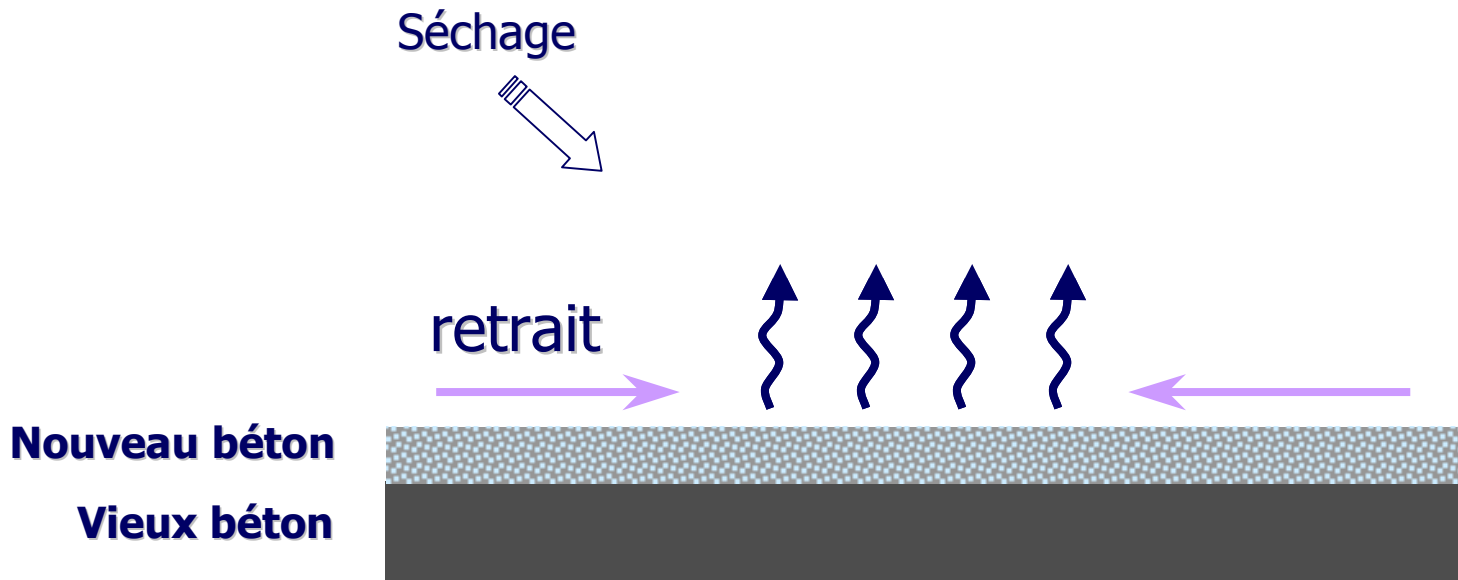
Nouveau béton

Vieux béton



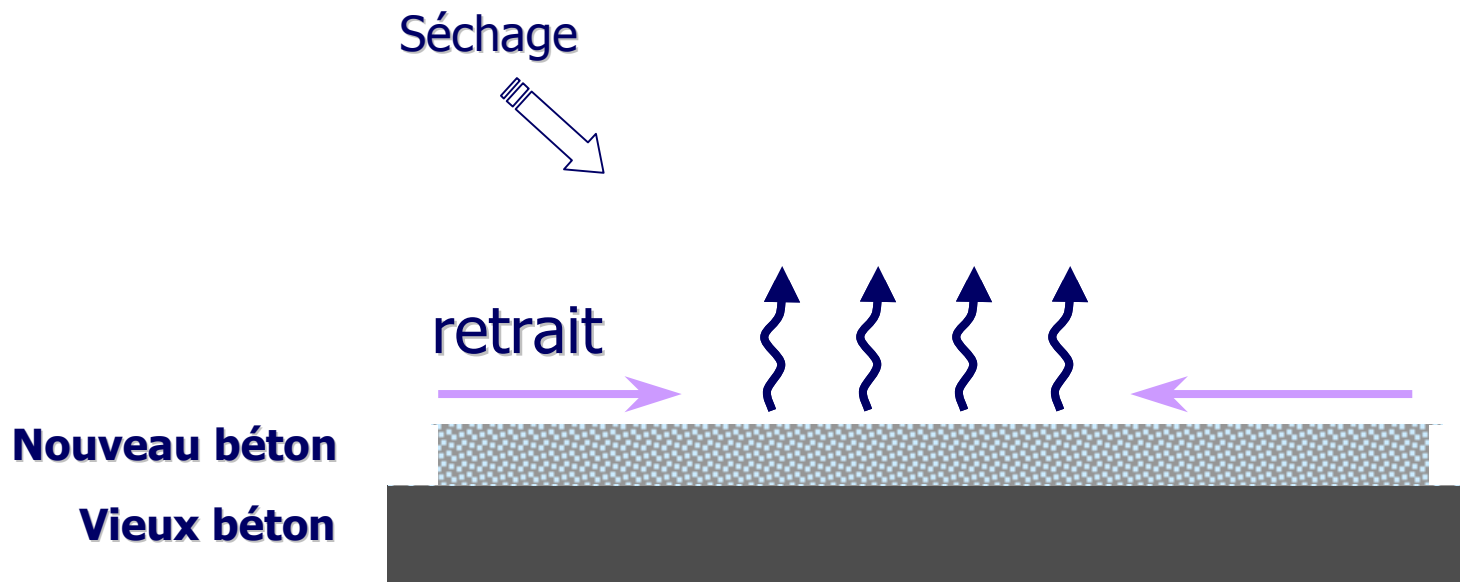
Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps



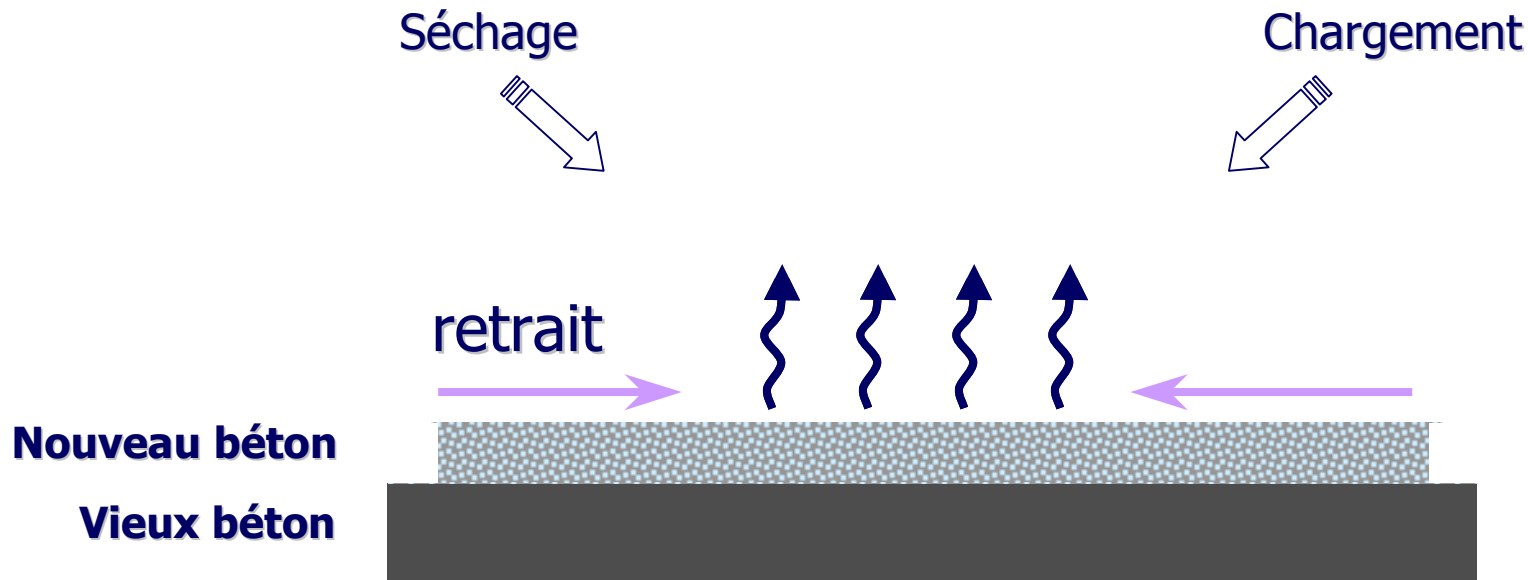
Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps



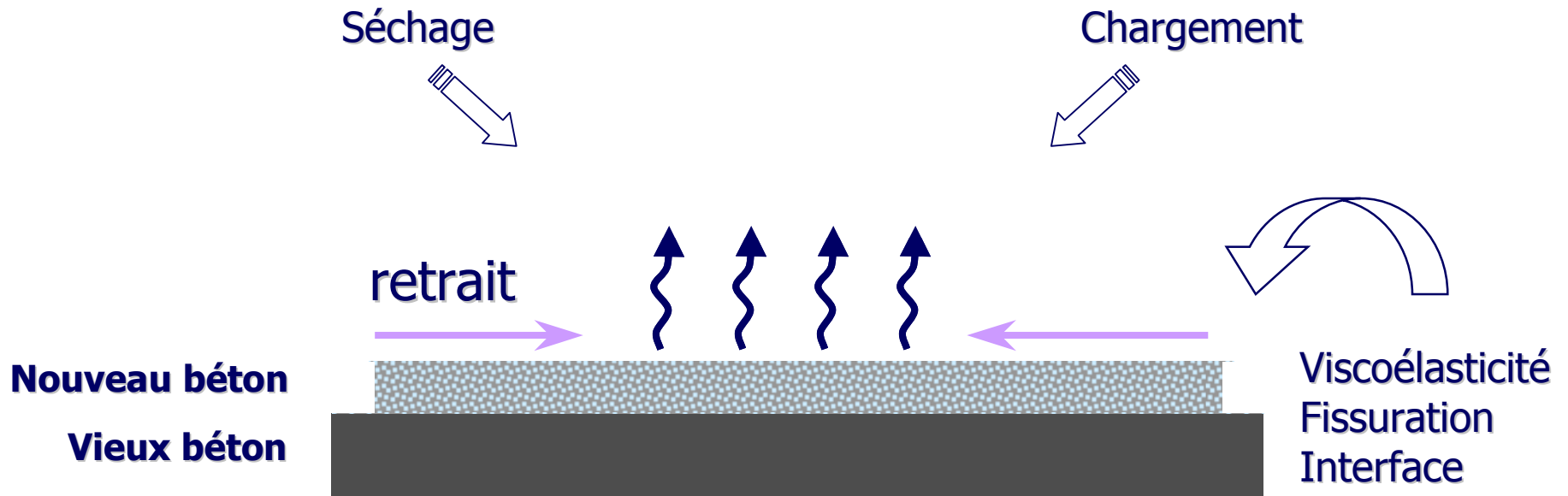
Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps



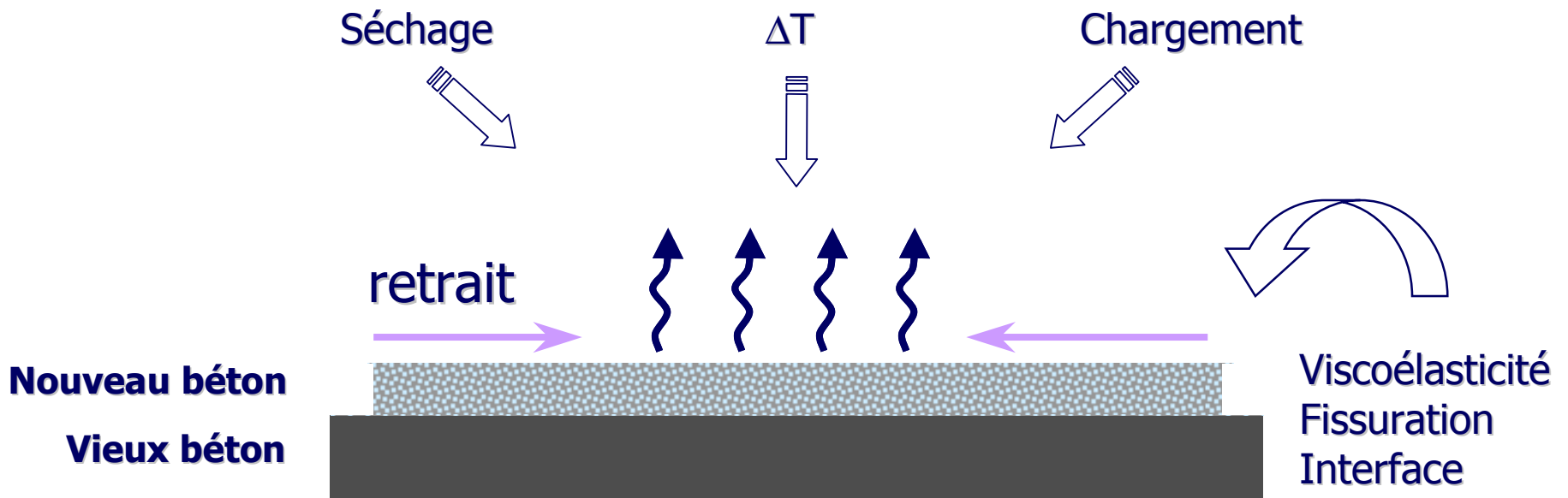
Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps



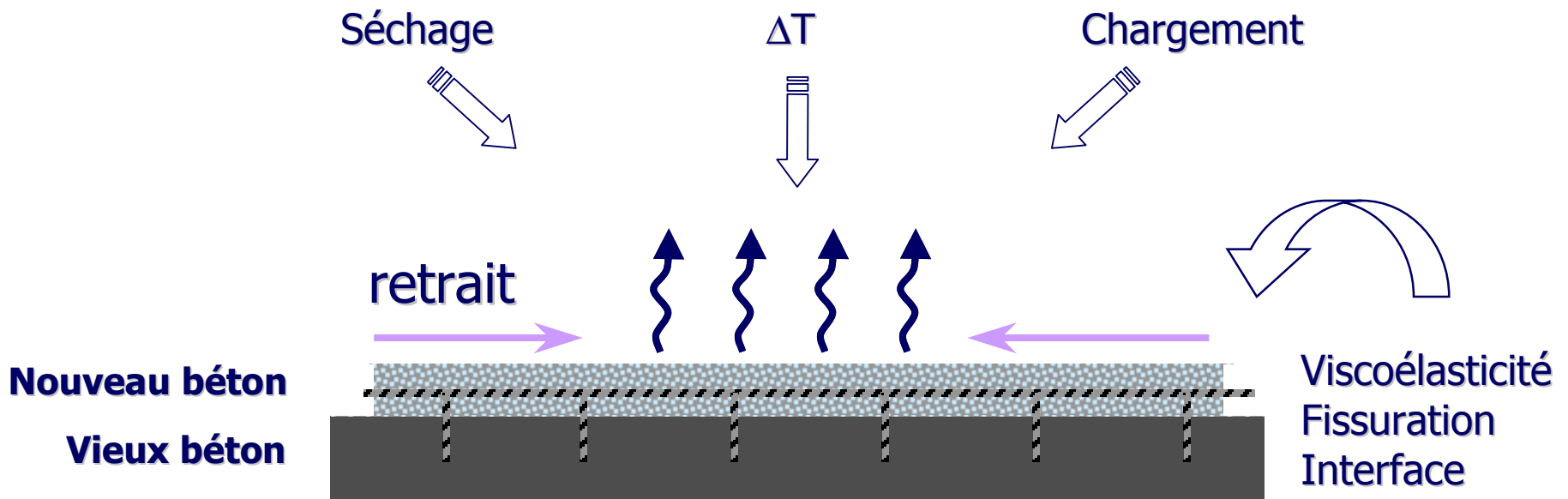
Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps



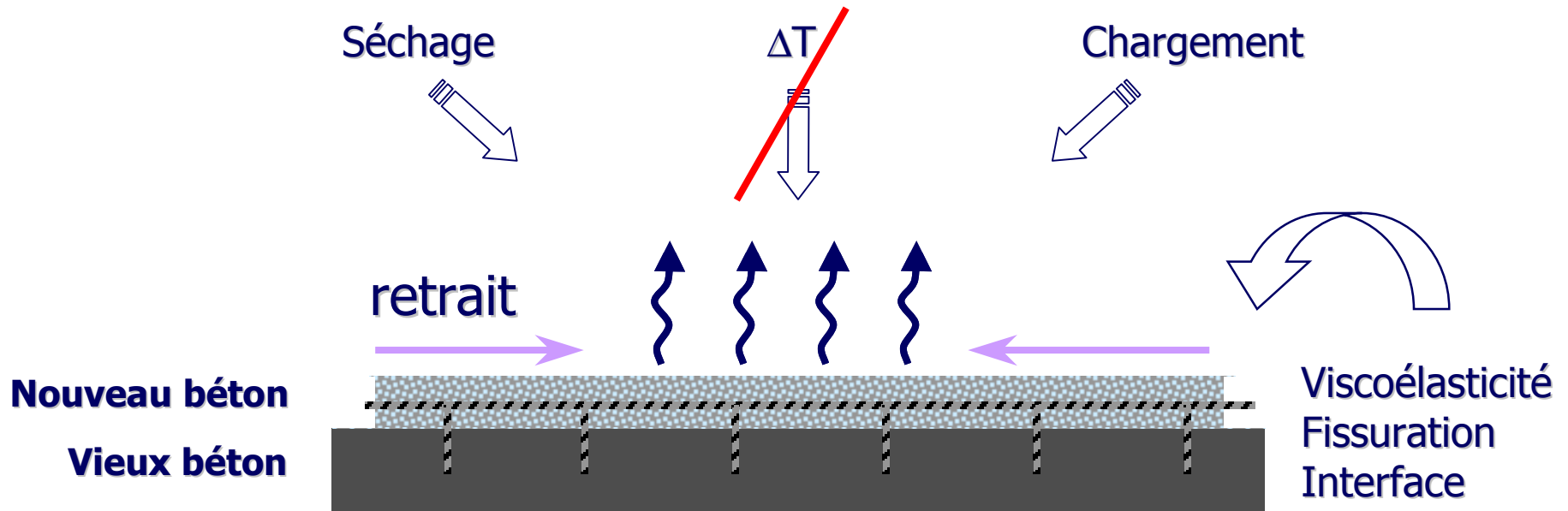
Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps



Concept d'une réparation mince ancrée

- Une **structure** constituée de deux couches de béton :
 - Vieux béton : un matériau quasi stable dans le temps
 - Nouveau béton : un **matériau évolutif** dans le temps

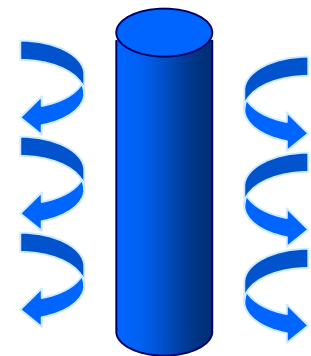
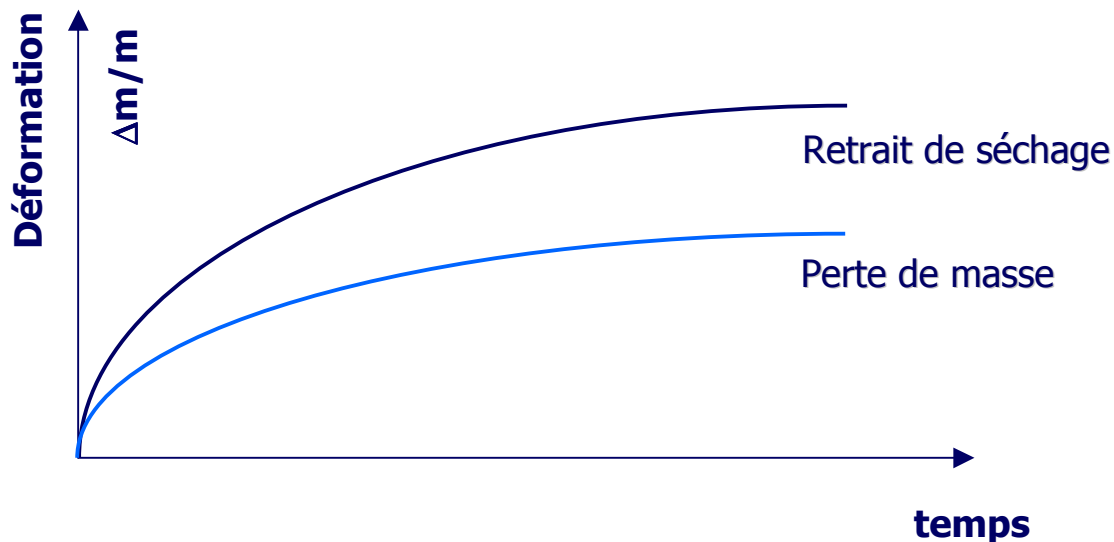


Mécanismes physiques

- Hydratation : le matériau est en continuelle évolution
- Évolution des propriétés mécaniques
- Structure poreuse multi-échelle : pores de gel (10^{-10} m) et pores capillaires (10^{-9} à 10^{-6} m)
- Eau liée chimiquement, eau adsorbée et eau libre
- Le retrait endogène ← conséquence de l'hydratation (auto-dessiccation, exothermie, gonflement chimique)
- Comportement mécanique quasi-fragile

Mécanismes physiques

- Le retrait de séchage
 - Variation de volume lors de la dessiccation du matériau
 - Plusieurs mécanismes physiques :
 - condensation capillaire ;
 - tension superficielle ;
 - zone d'adsorption gênée.
 - La déformation de retrait peut être reliée à la variation de teneur en eau ou d'humidité relative



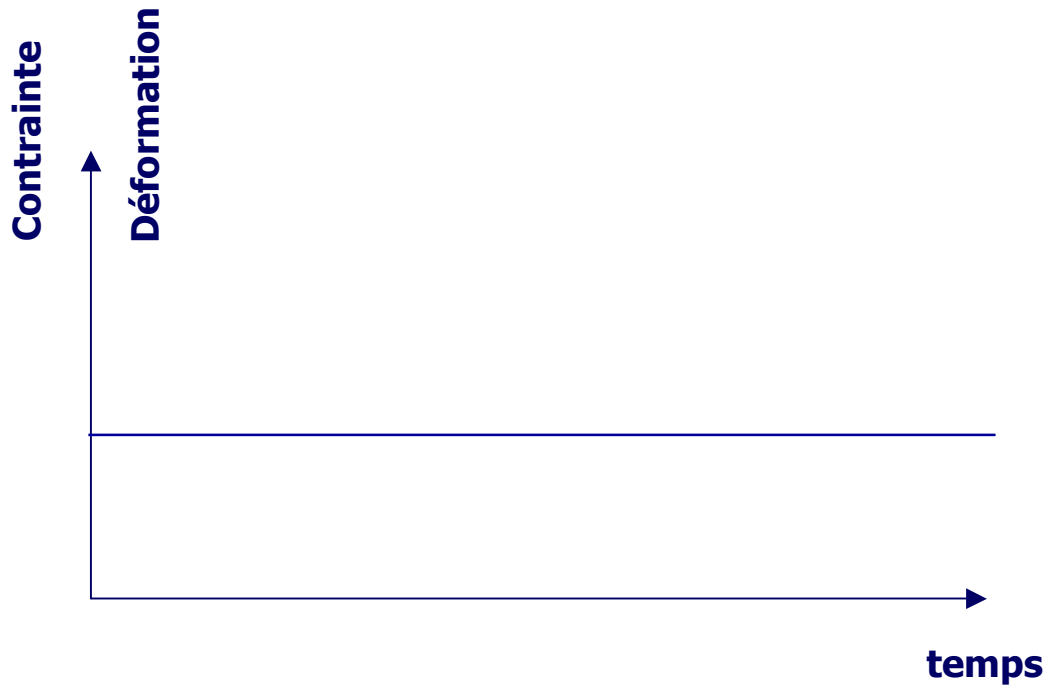
Mécanismes physiques

- Comportement viscoélastique du béton
 - fluage : variation de la déformation sous contrainte constante
 - relaxation : variation de la contrainte sous déformation constante



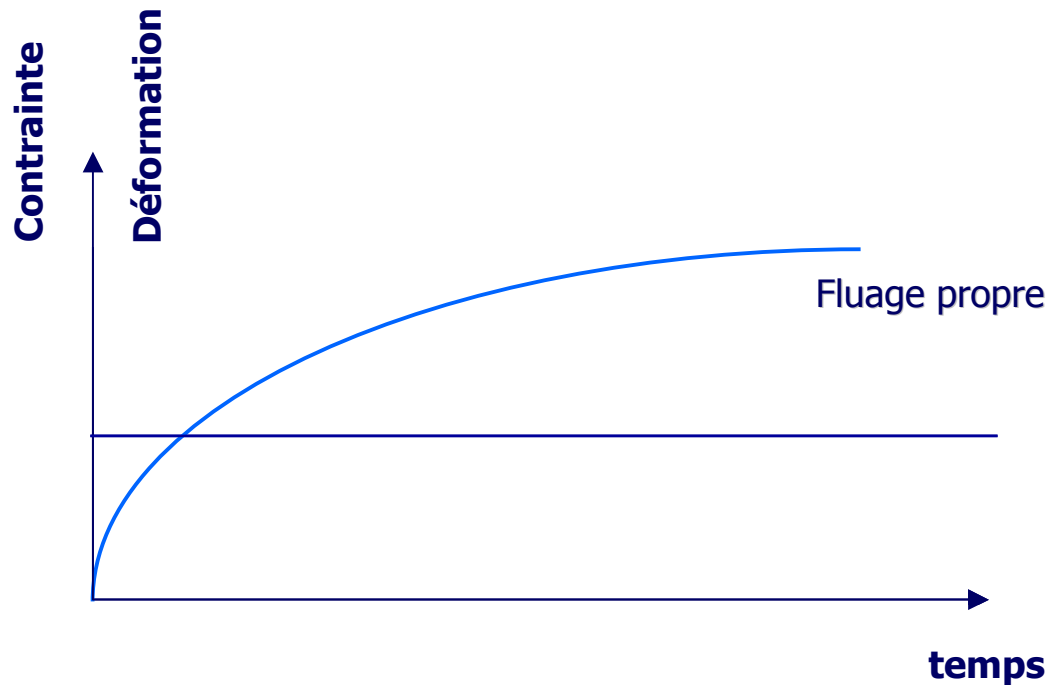
Mécanismes physiques

- Comportement viscoélastique du béton
 - fluage : variation de la déformation sous contrainte constante
 - relaxation : variation de la contrainte sous déformation constante



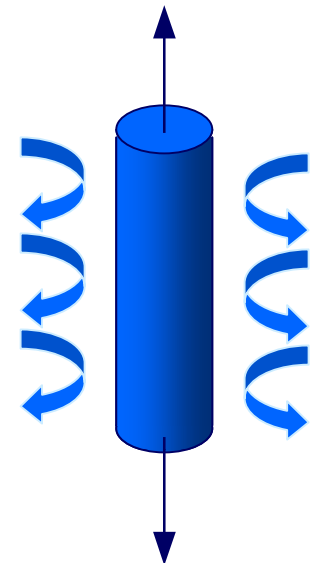
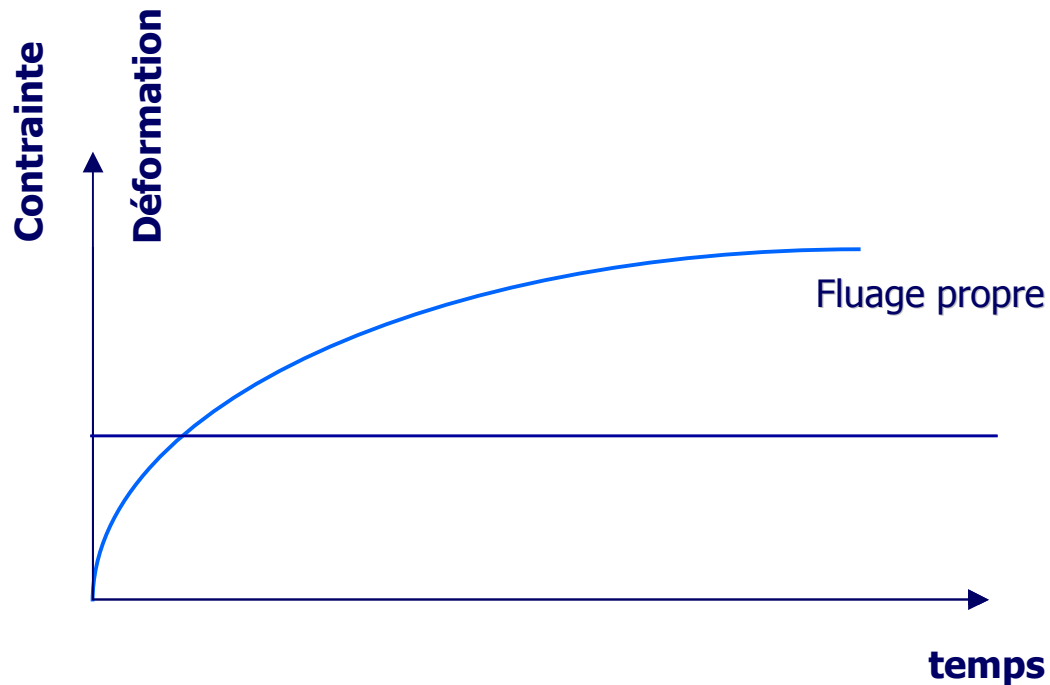
Mécanismes physiques

- Comportement viscoélastique du béton
 - fluage : variation de la déformation sous contrainte constante
 - relaxation : variation de la contrainte sous déformation constante



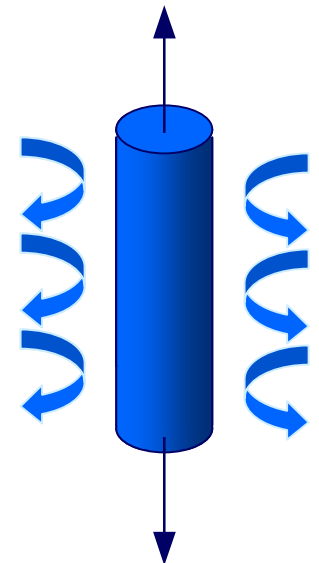
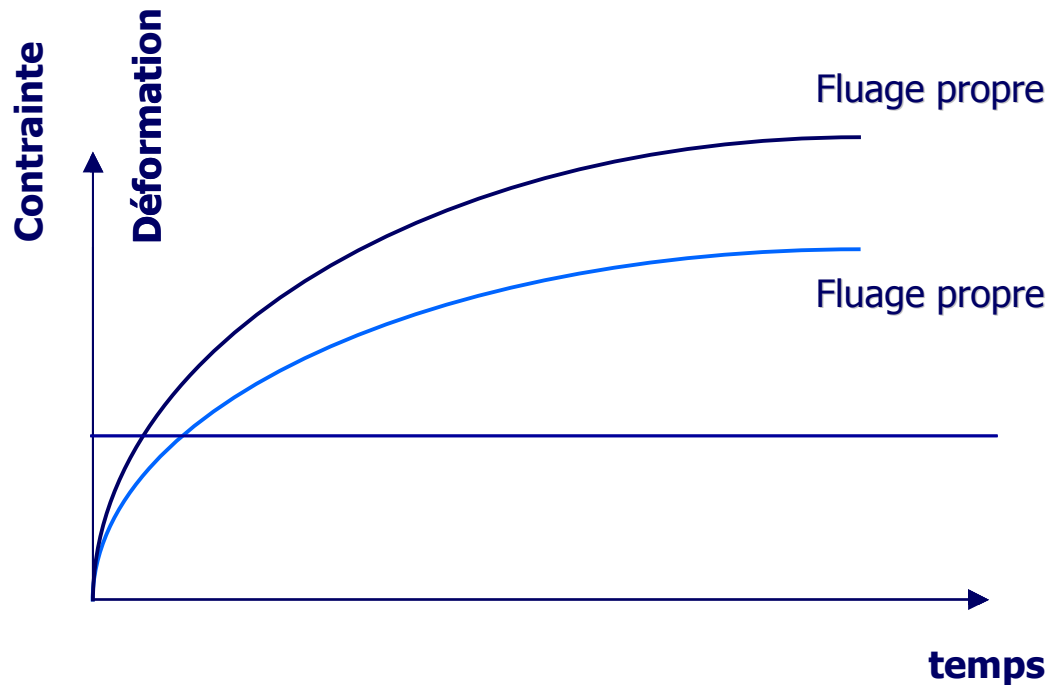
Mécanismes physiques

- Comportement viscoélastique du béton
 - fluage : variation de la déformation sous contrainte constante
 - relaxation : variation de la contrainte sous déformation constante



Mécanismes physiques

- Comportement viscoélastique du béton
 - fluage : variation de la déformation sous contrainte constante
 - relaxation : variation de la contrainte sous déformation constante



Mécanismes physiques

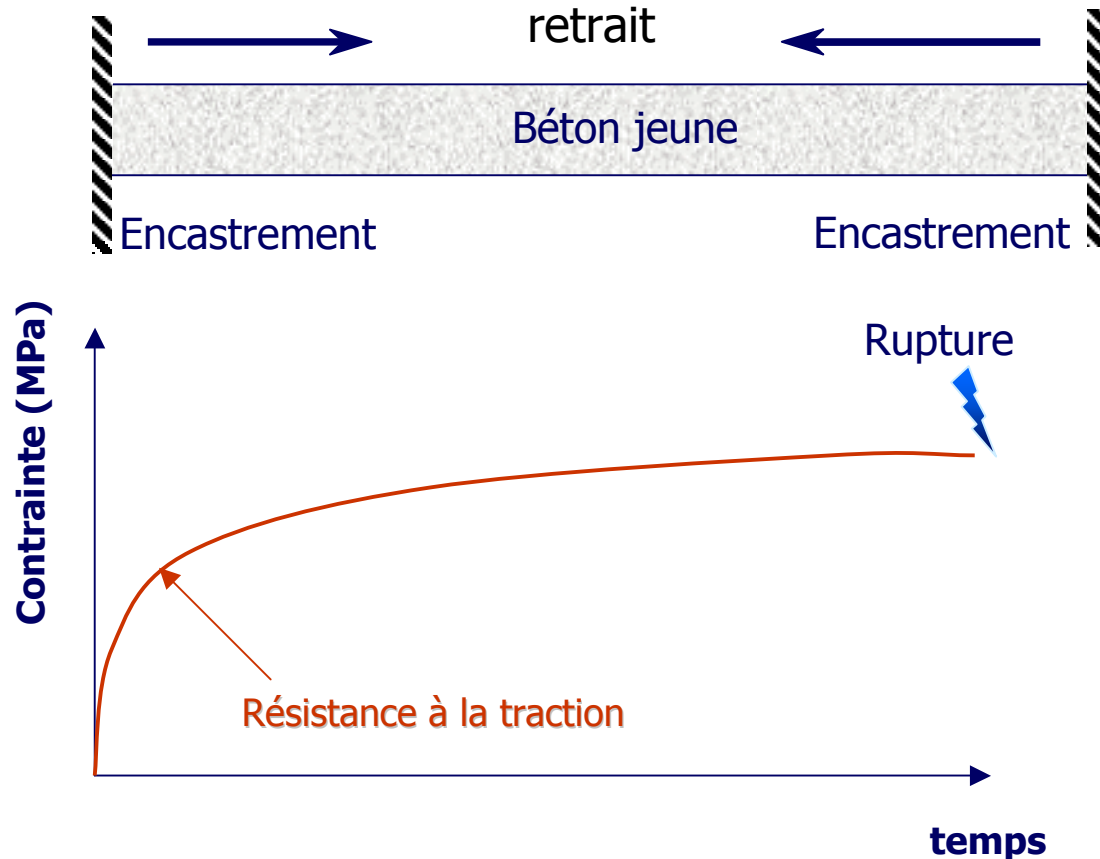
- Comportement viscoélastique du béton
 - Deux mécanismes principaux supposés
 - Micro-diffusion dans l'espace capillaire (court terme)
 - Cisaillement des feuillet de CSH (long terme)
 - Mécanismes indirects
 - Granulats, fissuration

Mécanismes physiques

- Comportement viscoélastique du béton
 - Deux mécanismes principaux supposés
 - Micro-diffusion dans l'espace capillaire (court terme)
 - Cisaillement des feuilletts de CSH (long terme)
 - Mécanismes indirects
 - Granulats, fissuration
 - Peuvent contribuer de façon importante au fluage en traction

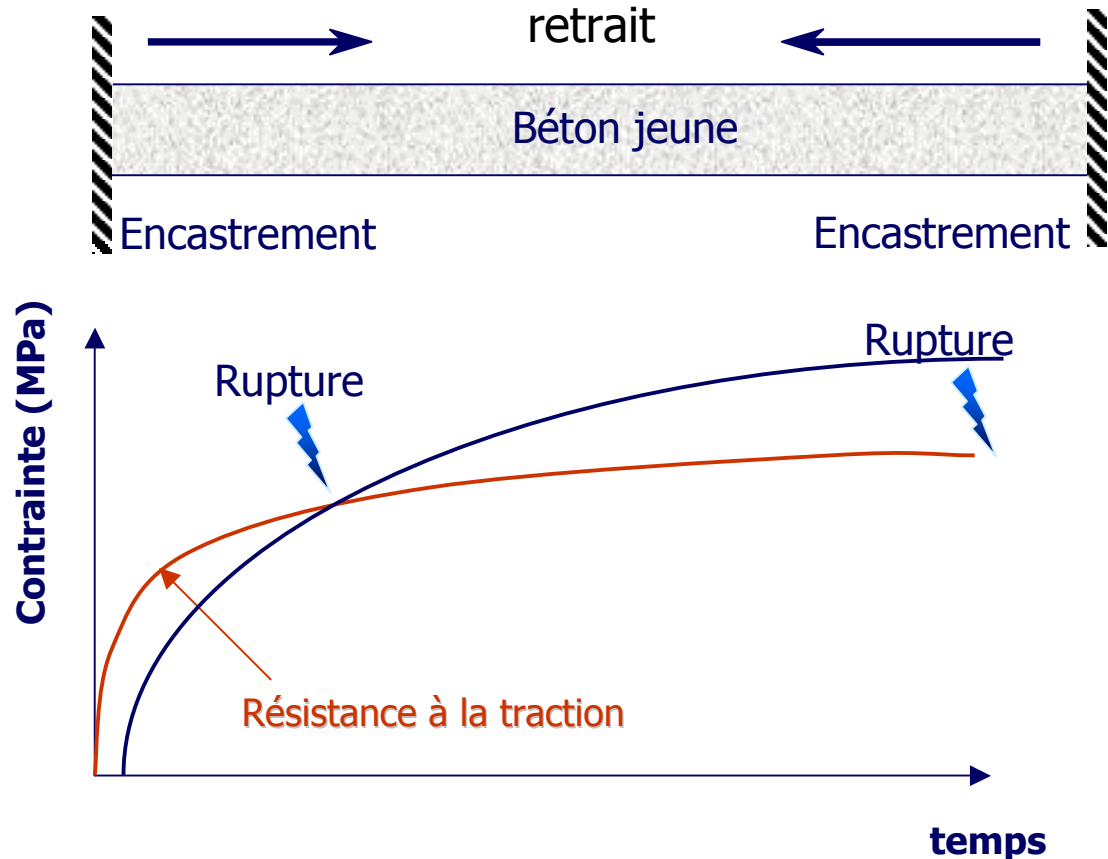
Mécanismes physiques

- Le retrait de séchage est un paramètre fortement préjudiciable pour les réparations (Saucier 1991, Bissonnette 1996, Laurence 2001, [Emmons, 1993](#))
- Le fluage en traction peut être un paramètre positif



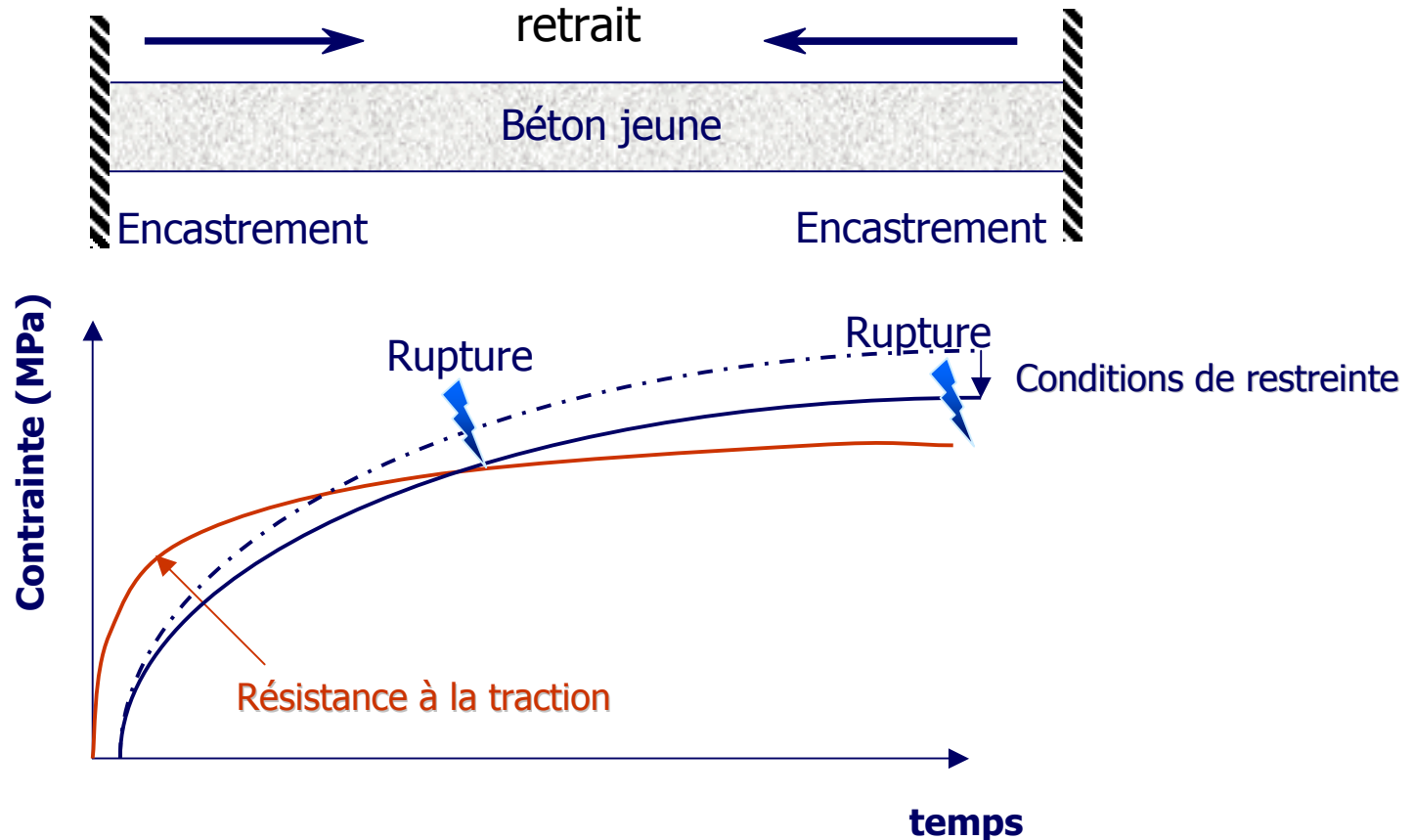
Mécanismes physiques

- Le retrait de séchage est un paramètre fortement préjudiciable pour les réparations (Saucier 1991, Bissonnette 1996, Laurence 2001, [Emmons, 1993](#))
- Le fluage en traction peut être un paramètre positif



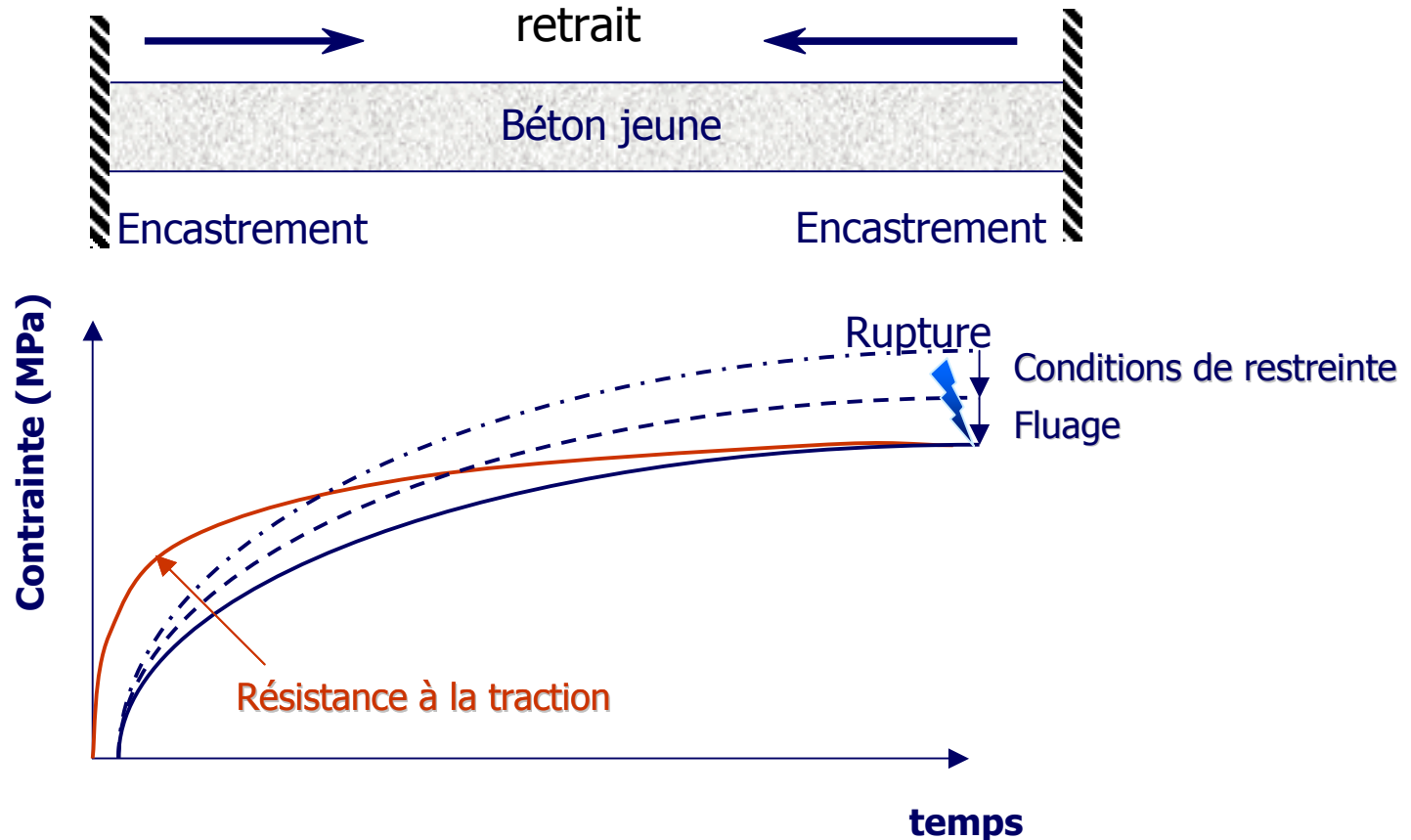
Mécanismes physiques

- Le retrait de séchage est un paramètre fortement préjudiciable pour les réparations (Saucier 1991, Bissonnette 1996, Laurence 2001, [Emmons, 1993](#))
- Le fluage en traction peut être un paramètre positif



Mécanismes physiques

- Le retrait de séchage est un paramètre fortement préjudiciable pour les réparations (Saucier 1991, Bissonnette 1996, Laurence 2001, [Emmons, 1993](#))
- Le fluage en traction peut être un paramètre positif





Étude expérimentale

Caractérisation des matériaux

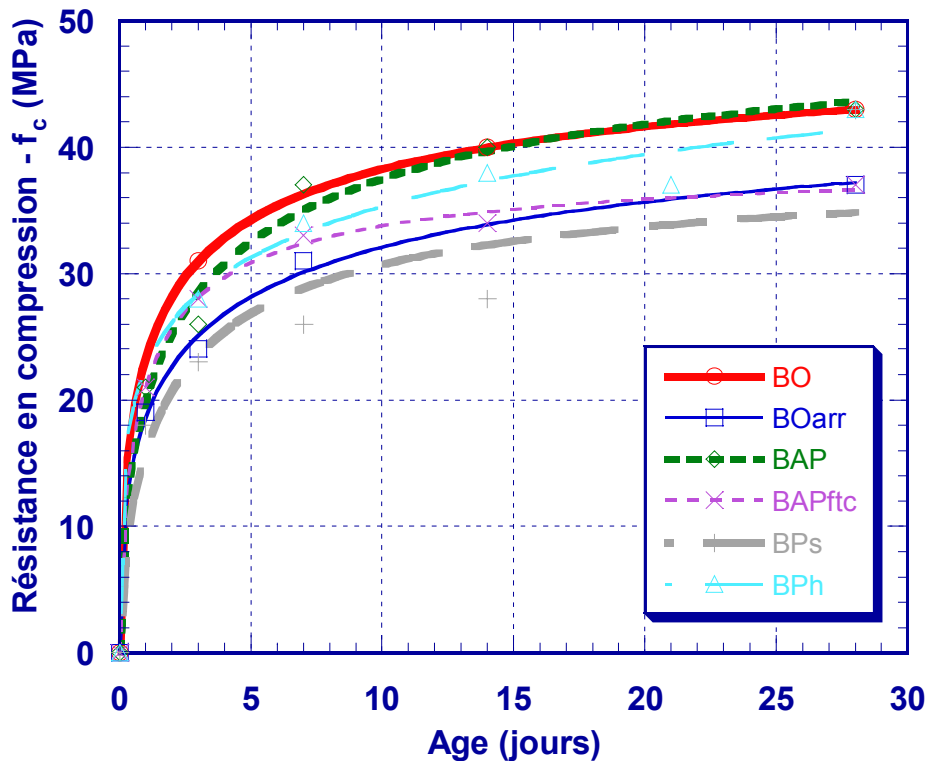
- Systèmes de réparation
 - Poutre en béton armé de 4m de longueur
 - Réparation en zone tendue
 - Suppression du vieux béton sur 75 mm de profondeur
 - Finition au jet de sable
- 6 matériaux testés afin de faire varier l'amplitude du retrait et du fluage
 - Béton ordinaire
 - Béton ordinaire avec agent réducteur de retrait
 - Béton auto-plaçant
 - Béton auto-plaçant à faible teneur en ciment
 - Béton projeté par voie sèche
 - Béton projeté par voie humide

Caractérisation des matériaux

- Systèmes de réparation
 - Poutre en béton armé de 4m de longueur
 - Réparation en zone tendue
 - Suppression du vieux béton sur 75 mm de profondeur
 - Finition au jet de sable
- 6 matériaux testés afin de faire varier l'amplitude du retrait et du fluage
 - **Béton ordinaire**
 - Béton ordinaire avec agent réducteur de retrait
 - **Béton auto-plaçant**
 - Béton auto-plaçant à faible teneur en ciment
 - **Béton projeté par voie sèche**
 - Béton projeté par voie humide

Caractérisation des matériaux

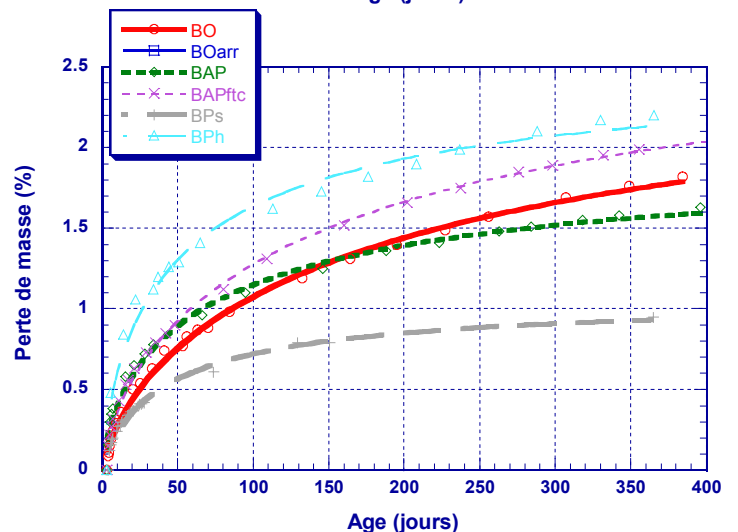
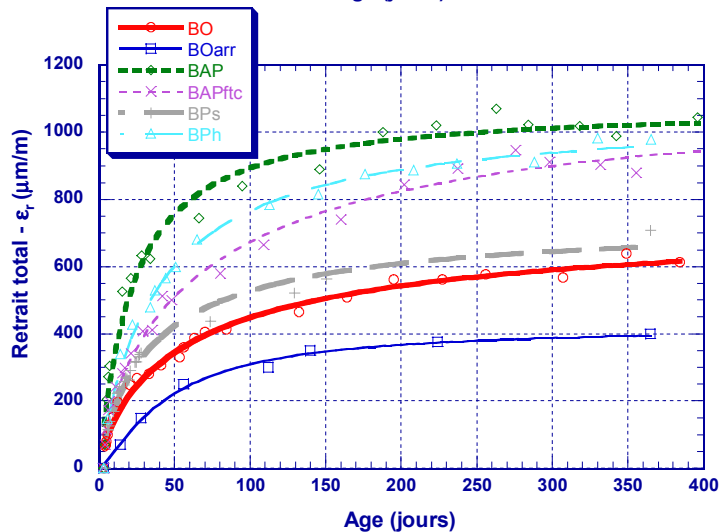
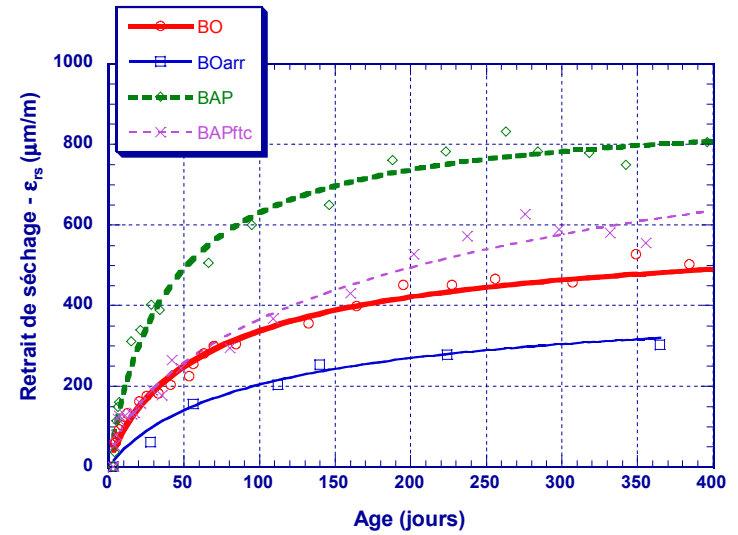
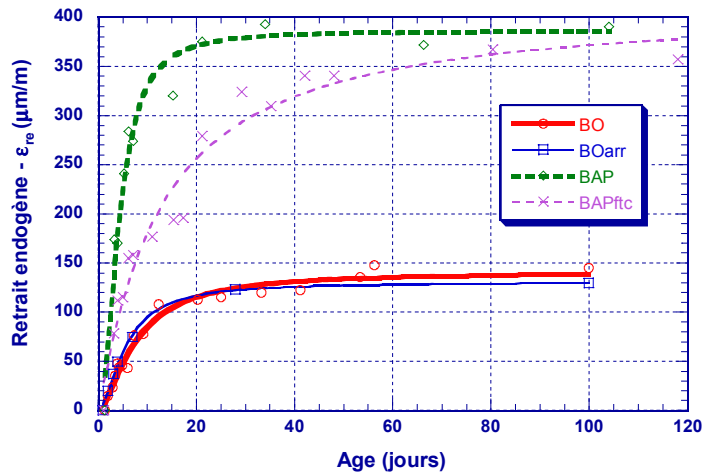
- Des propriétés mécaniques semblables
 - $E/C=0,40$
 - Variation de la teneur en pâte



	f_{t28} (MPa)	E_{28} (GPa)
BO	3,6	33
BOarr	2,8	29
BAP	4,0	35
BAPftc	3,5	35
BPs	4,3	42
BPh	4,3	22

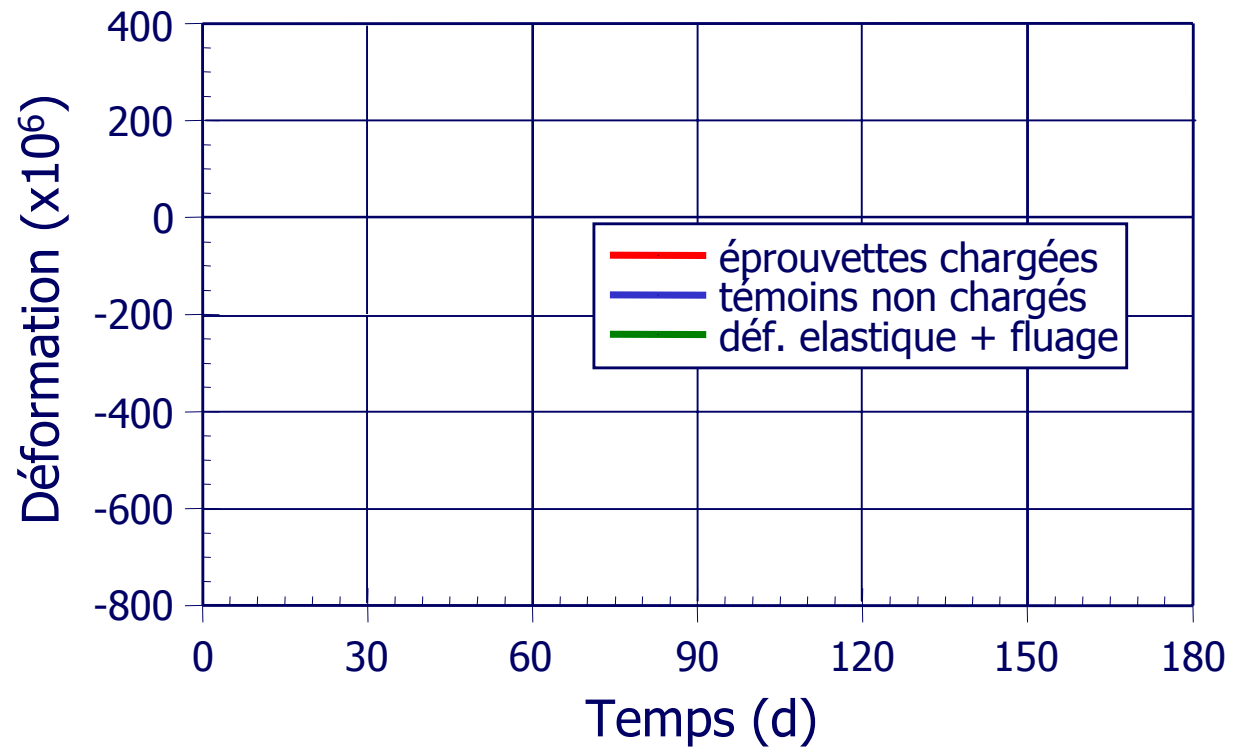
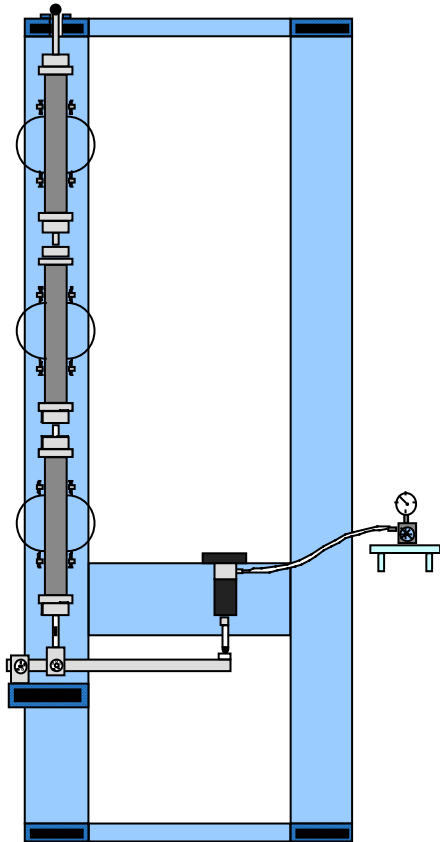
Caractérisation des matériaux

■ Des propriétés hydriques différentes



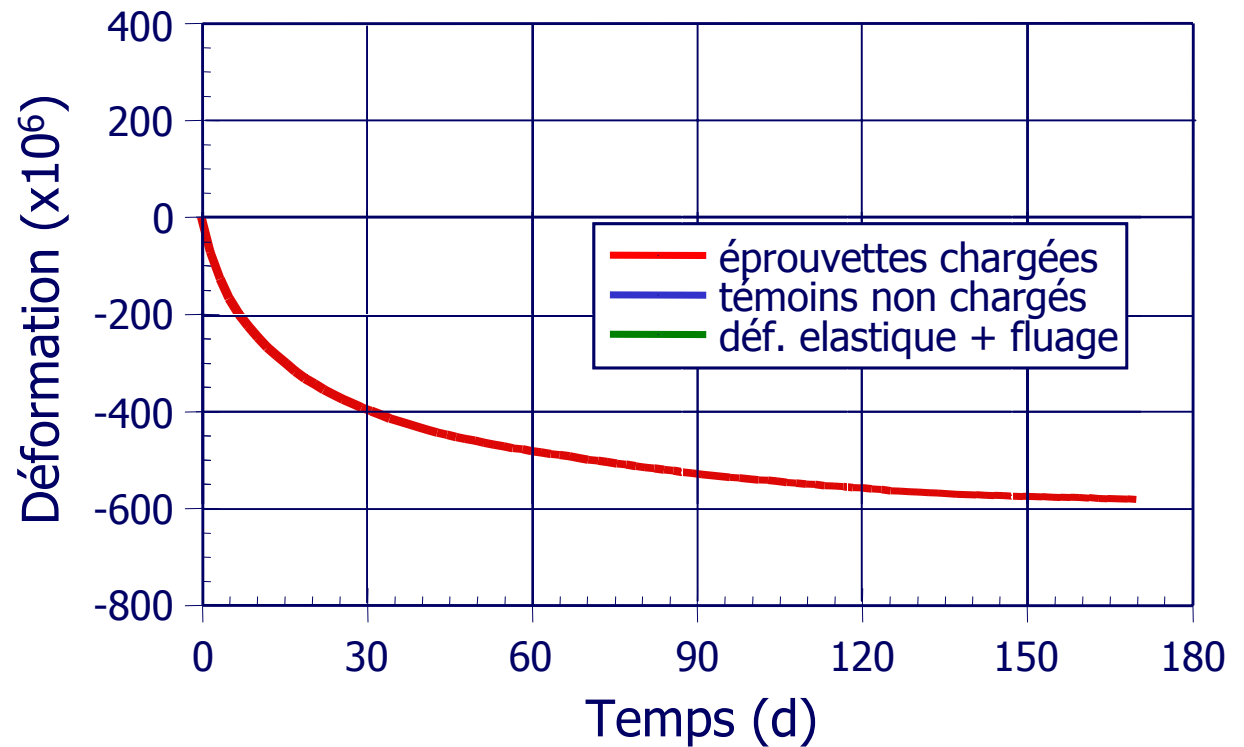
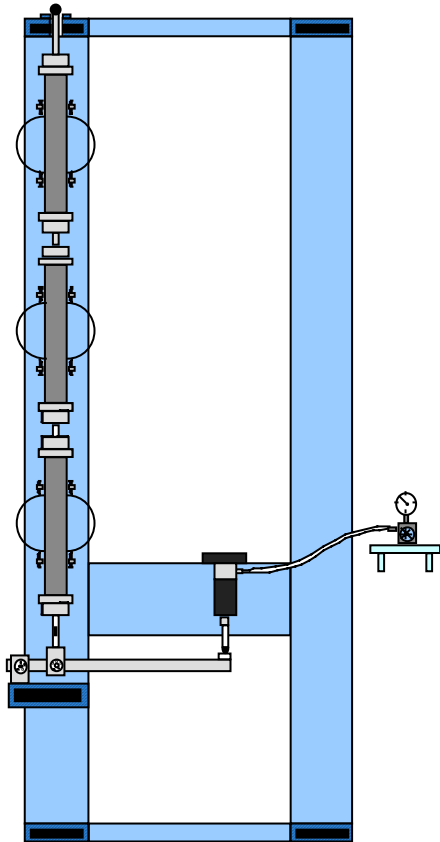
Caractérisation des matériaux

- Un comportement viscoélastique différent
 - Mesure du fluage en **traction** sur des éprouvettes cylindriques et parallélépipédique.



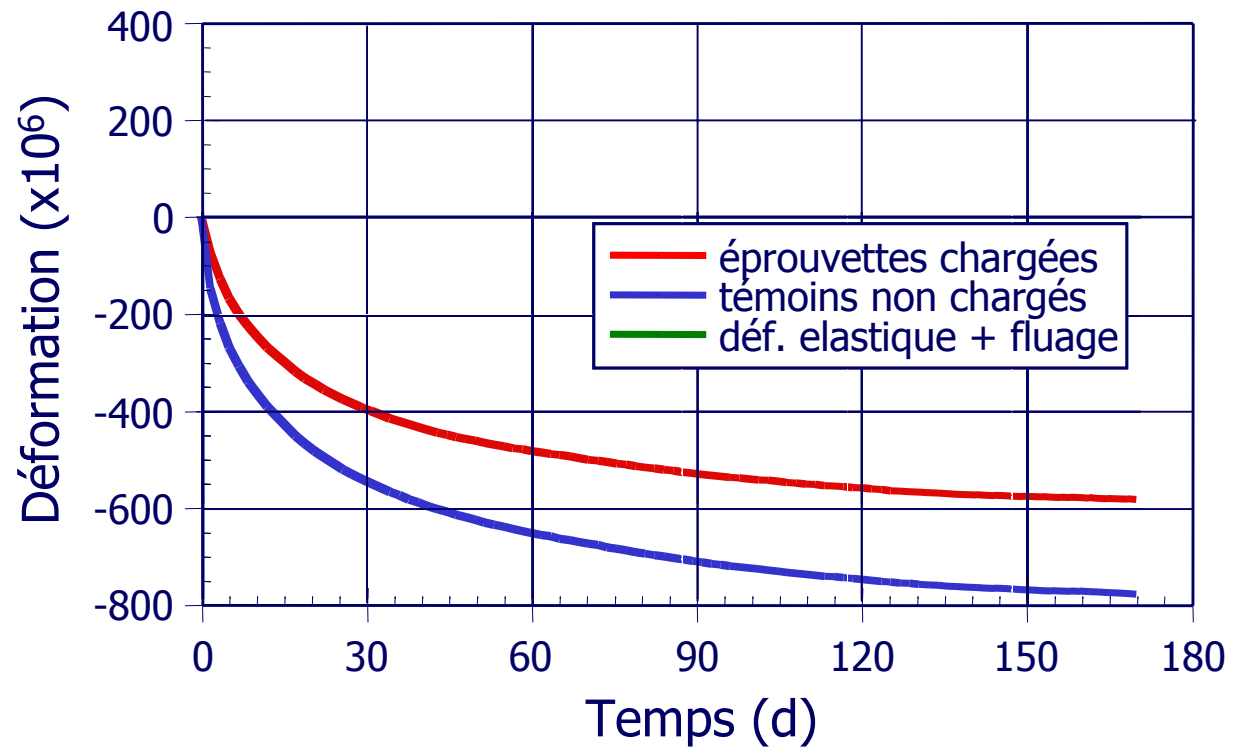
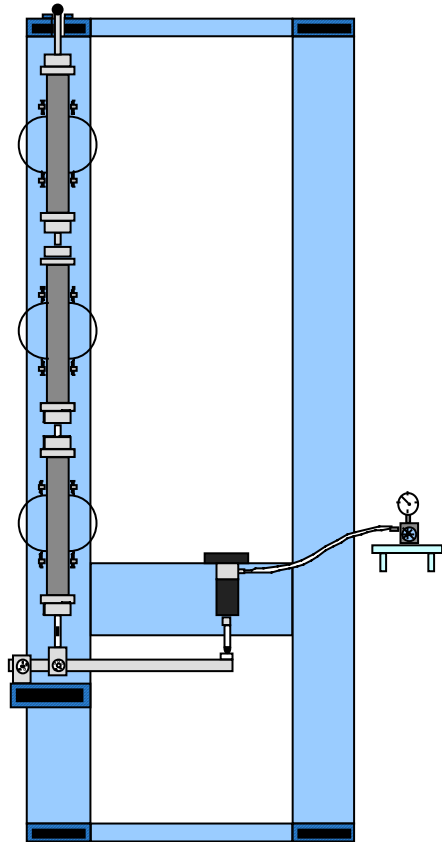
Caractérisation des matériaux

- Un comportement viscoélastique différent
 - Mesure du fluage en **traction** sur des éprouvettes cylindriques et parallélépipédique.



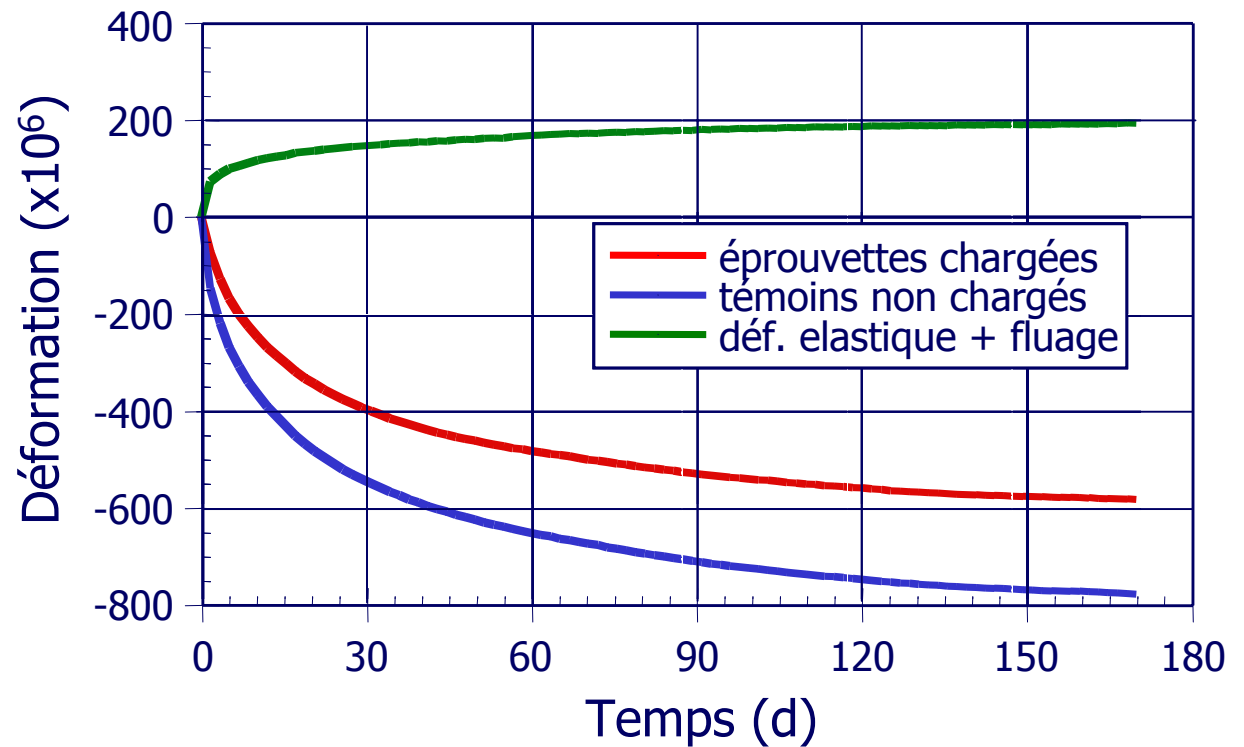
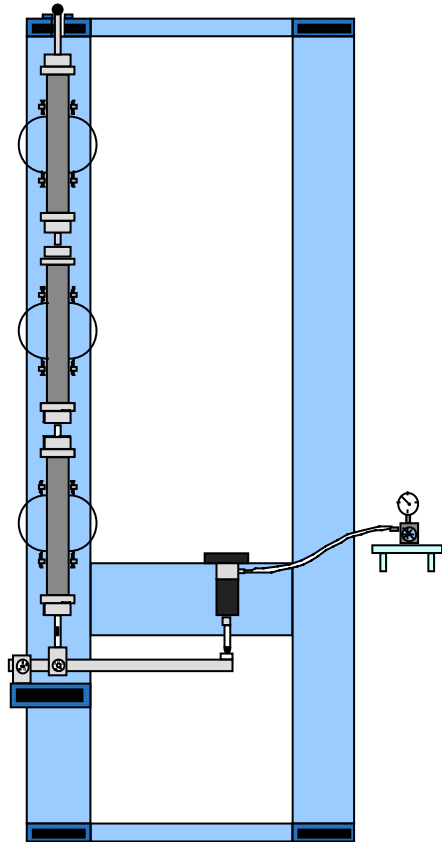
Caractérisation des matériaux

- Un comportement viscoélastique différent
 - Mesure du fluage en **traction** sur des éprouvettes cylindriques et parallélépipédique.



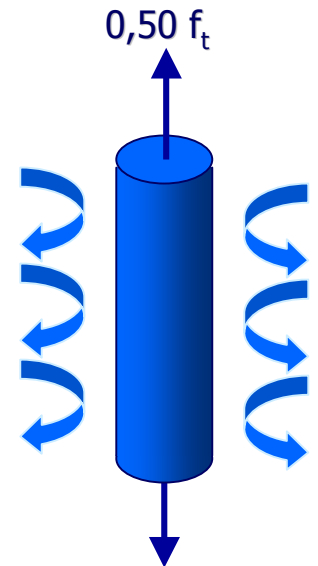
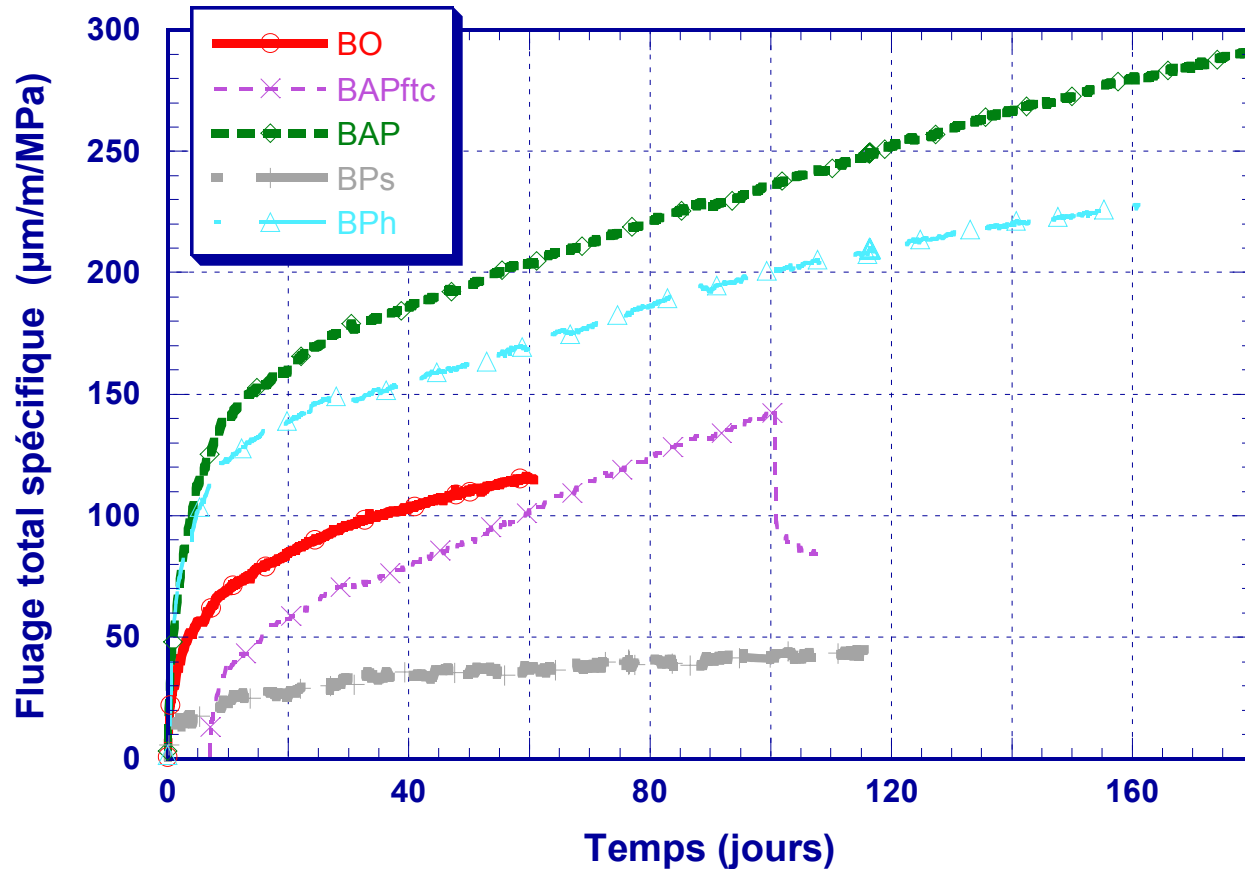
Caractérisation des matériaux

- Un comportement viscoélastique différent
 - Mesure du fluage en **traction** sur des éprouvettes cylindriques et parallélépipédique.



Caractérisation des matériaux

- Fluage spécifique allant de 50 à 250 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$



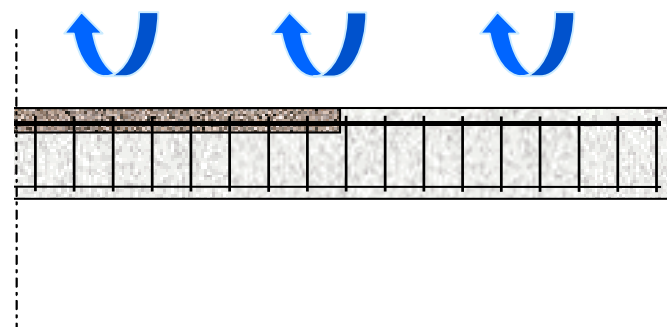
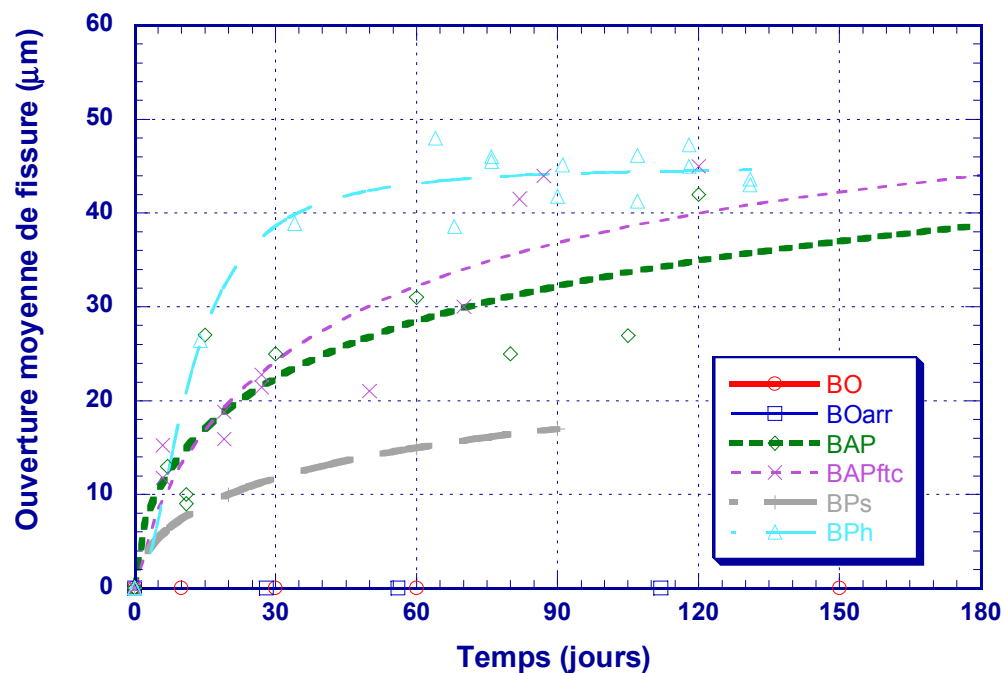
Essai débutant à 7 jours

Réparations soumises au séchage

- Proposition d'un indice de convenance du système de réparation (Bissonnette 1996)
 - La réparation est soumise à une déformation de retrait $\rightarrow \varepsilon_r$
 - Une part de cette déformation est bloquée et génère des contraintes $\rightarrow \mu \varepsilon_r$
 - Le coefficient μ peut être calculé à partir des équations de la résistance des matériaux (Bissonnette 1996 ; Bernard 2000)
 - En réponse la structure se déforme de façon élastique et viscoélastique $\rightarrow \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{fl}$
 - S'il y a rupture $\rightarrow \frac{f_t}{E} + \varepsilon_{fl} = \mu \varepsilon_r$
- L'indice de convenance :
$$k_c = \frac{f_t + E \varepsilon_{fl}}{\mu E \varepsilon_r}$$

Réparations soumises au séchage

■ Suivi de la fissuration au cours du temps

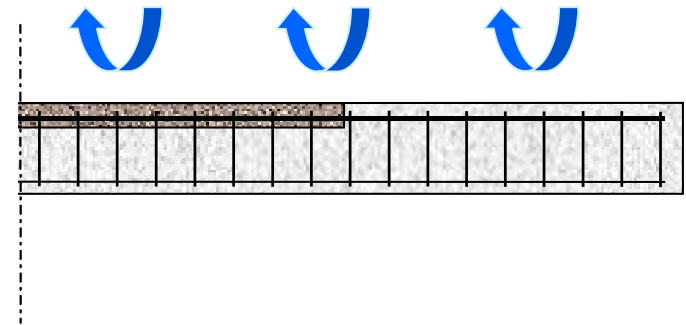
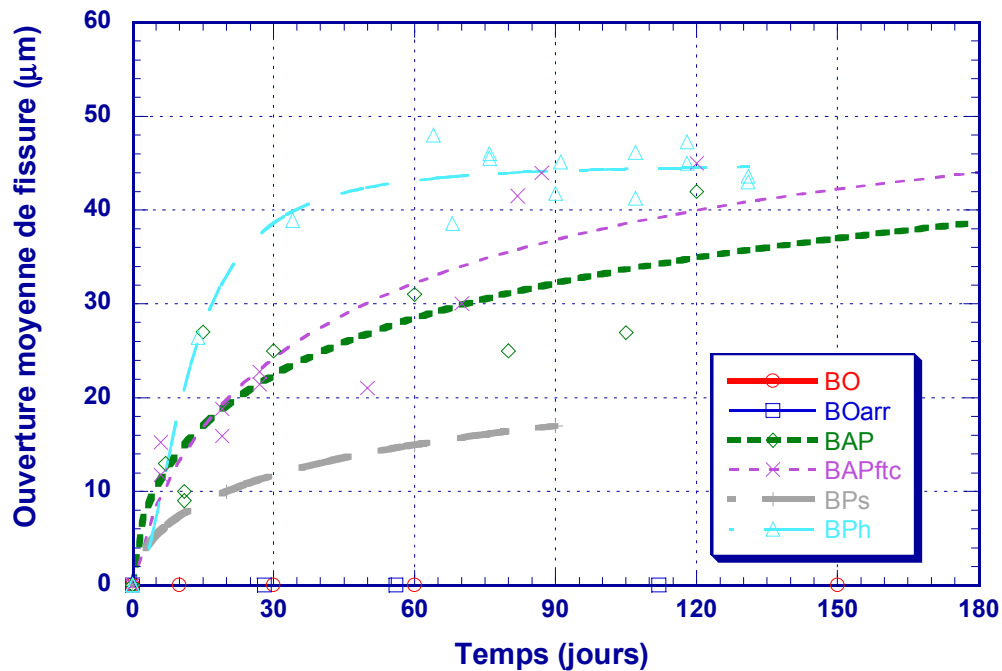


	Retrait	Fluage	μ	k_c
BO	280	100	0,57	1,31
BAP	650	170	0,56	0,78
BPs	325	40	0,54	0,81

à 28 jours

Réparations soumises au séchage

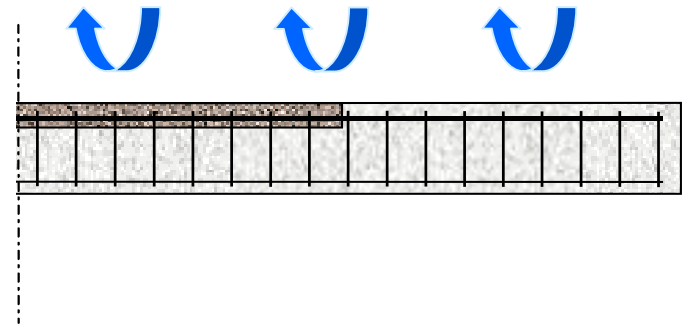
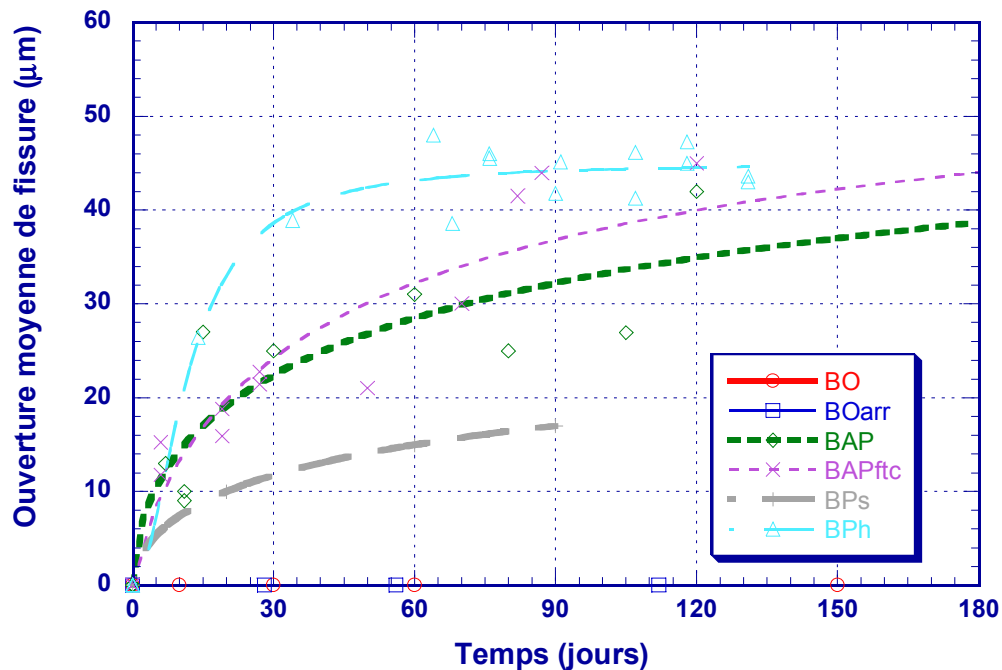
■ Suivi de la fissuration au cours du temps



Plus le retrait est faible, plus la fissuration est faible

Réparations soumises au séchage

■ Suivi de la fissuration au cours du temps

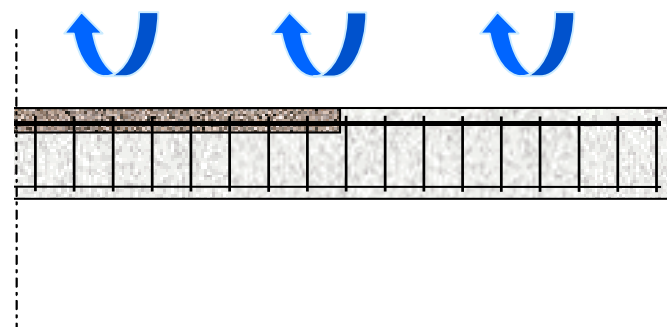
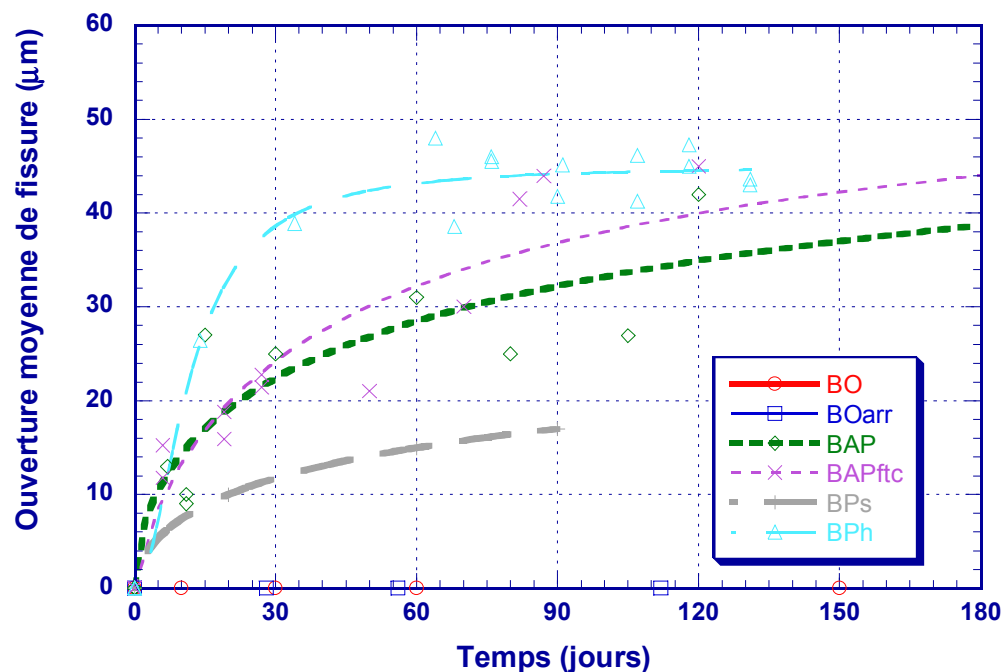


Plus le retrait est faible, plus la fissuration est faible

Un fluage important permet de réduire cette fissuration

Réparations soumises au séchage

■ Suivi de la fissuration au cours du temps



Plus le retrait est faible, plus la fissuration est faible

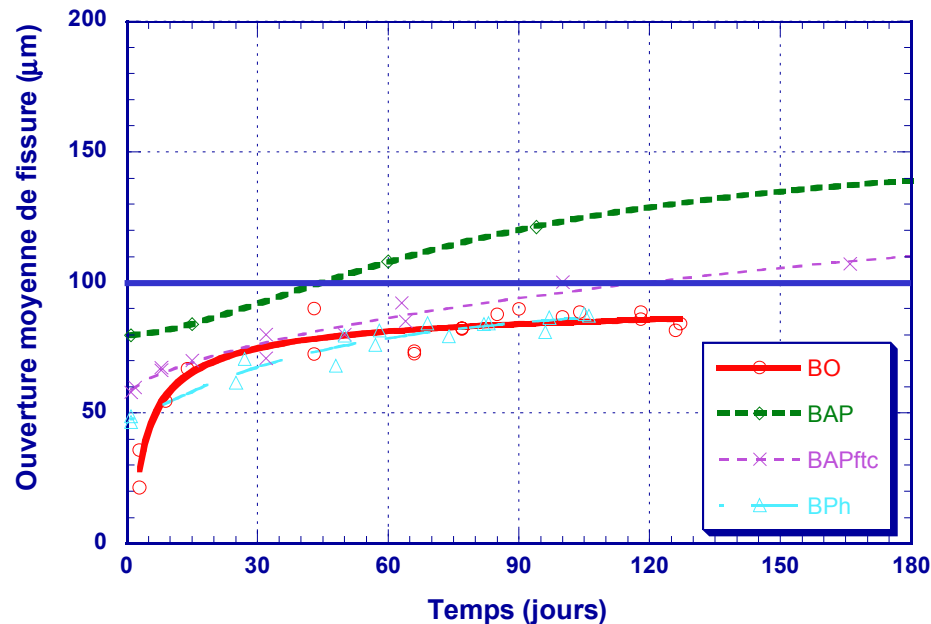
Un fluage important permet de réduire cette fissuration

Même avec un fort fluage, si le retrait est élevé la fissuration ne peut être évitée

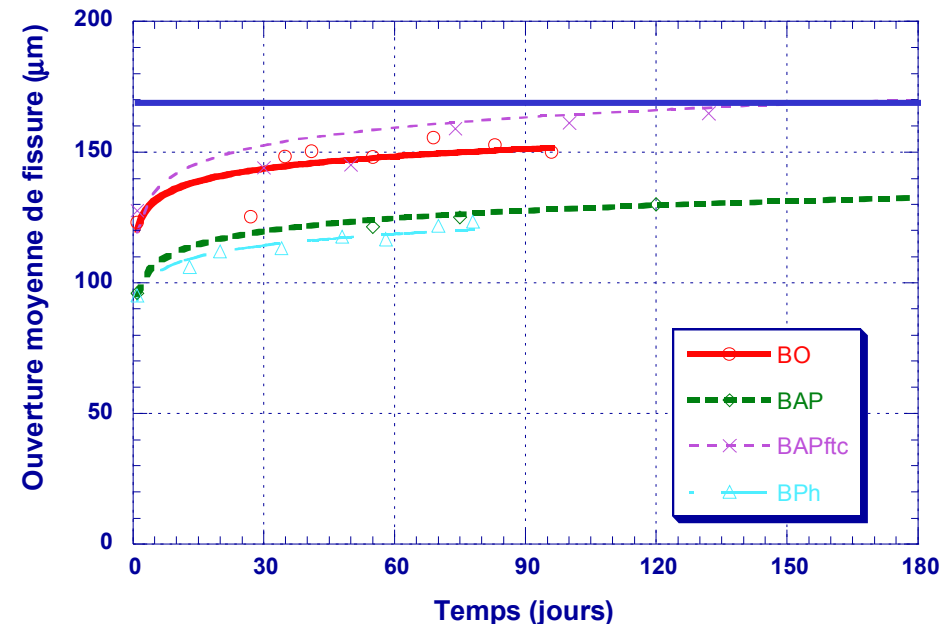
Réparations soumises au séchage et à un chargement mécanique

■ Chargement 4 points de longue durée

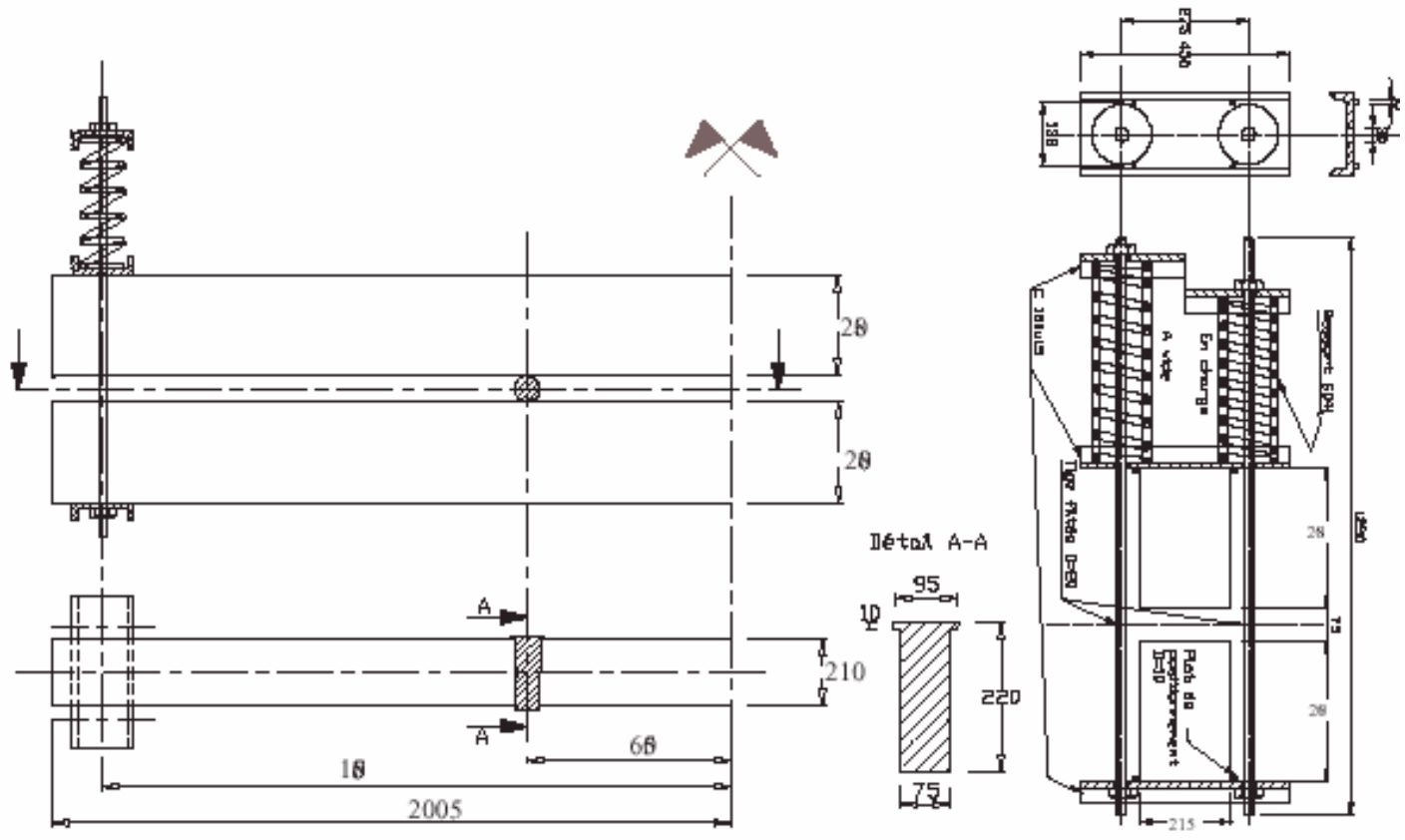
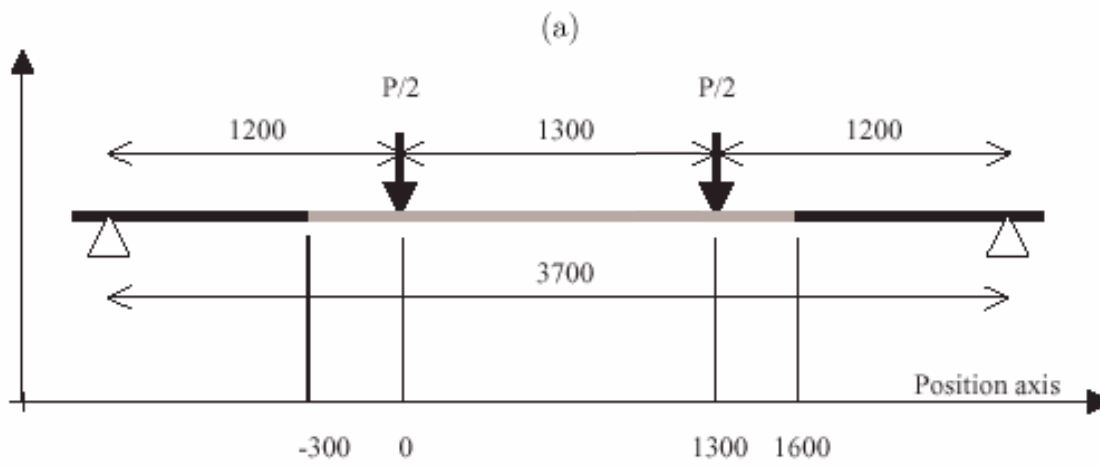
Chargement à 33% de Pult

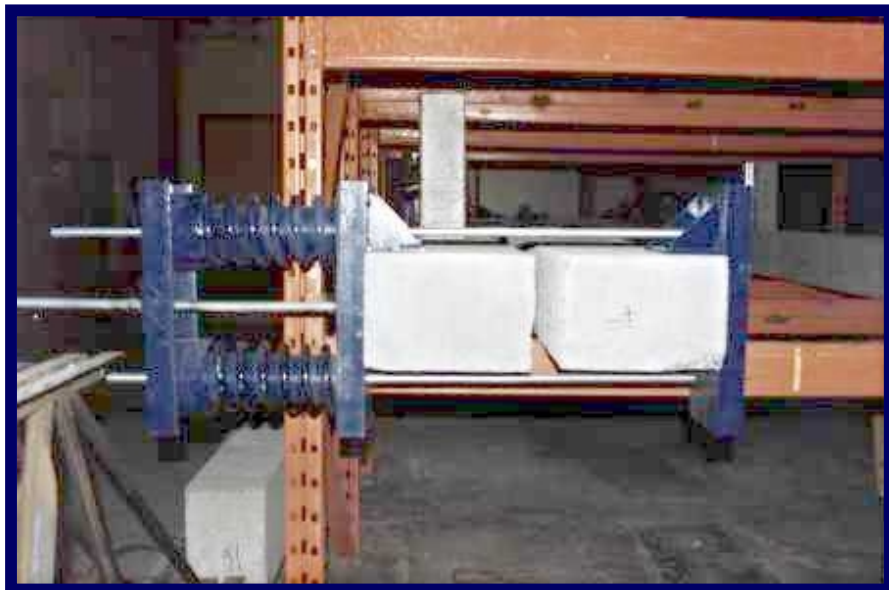


Chargement à 66% de Pult



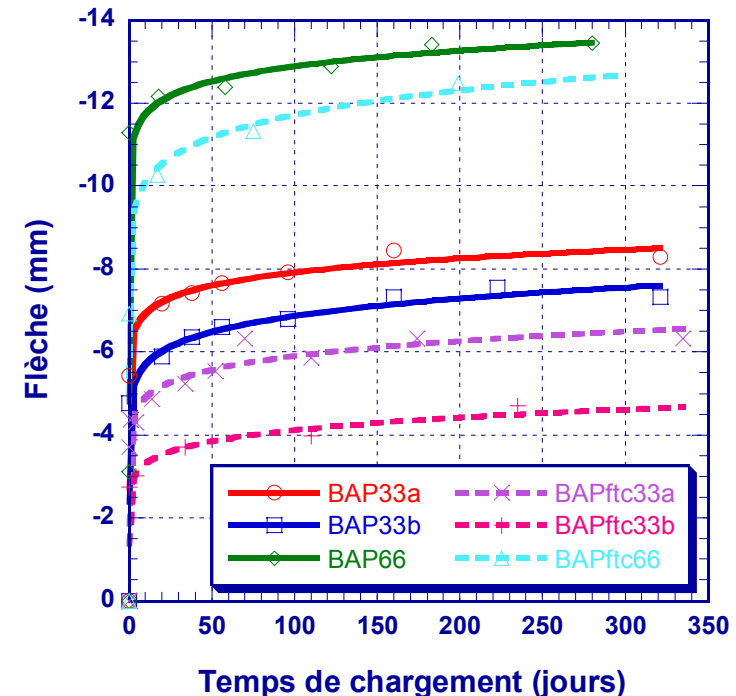
Évolution non négligeable de la fissuration au cours du temps
Ordre de grandeur semblable à la fissuration des témoins





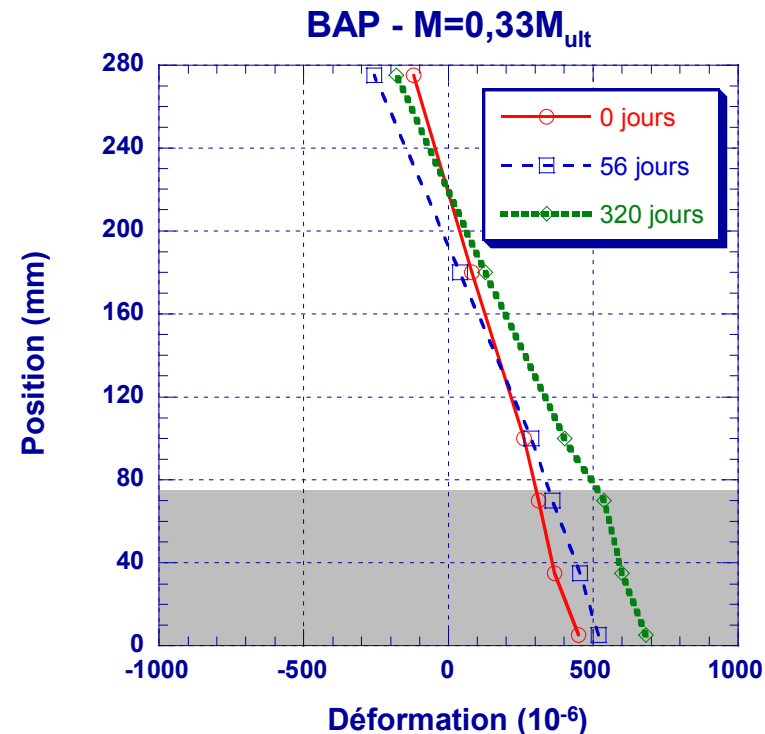
Réparations soumises au séchage et à un chargement mécanique

- Évolution de la flèche au cours du temps
 - Conséquence du retrait (fissuration) et du fluage
 - Analyse de cinétique de fissuration :
 - Si fluage ↗ alors fissuration ↗
 - Le fluage en traction peut avoir un effet structurel non négligeable (flèche, fissuration)
 - Confirmé par l'étude numérique



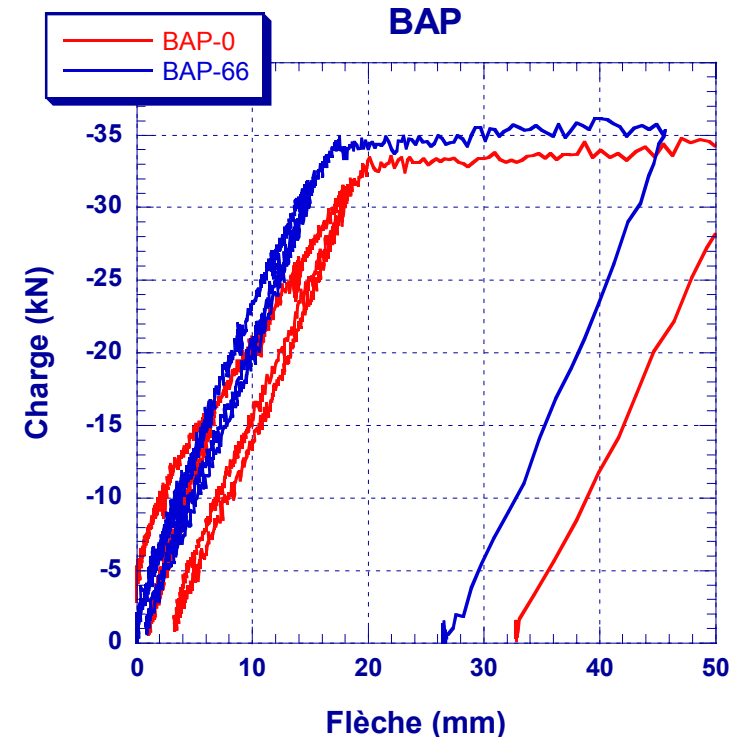
Réparations soumises au séchage et à un chargement mécanique

- Comportement monolithique des poutres réparées :
 - Le suivi des déformations dans une section ne montre pas de comportement particulier à l'interface
- Comportement à la rupture :
 - Essai jusqu'à rupture
 - Suivi des déformations dans une section
 - pas de rupture suspecte
 - Pas de délaminage
 - Pas de perte de résistance ou de ductilité
- Interface :
 - Hypothèse d'une interface parfaite



Réparations soumises au séchage et à un chargement mécanique

- Comportement monolithique des poutres réparées :
 - Le suivi des déformations dans une section ne montre pas de comportement particulier à l'interface
- Comportement à la rupture :
 - Essai jusqu'à rupture
 - Suivi des déformations dans une section
 - pas de rupture suspecte
 - Pas de délaminage
 - Pas de perte de résistance ou de ductilité
- Interface :
 - Hypothèse d'une interface parfaite





Étude numérique

Description des modèles

- Approche phénoménologique
 - La description des processus physiques n'est pas forcément exacte
 - Les conséquences macroscopiques sont reproduites
- Phénomènes décrits :
 - Conséquences de la structuration du béton
 - Mécanismes de transport hydrique
 - Variations dimensionnelles induites
 - Comportement mécanique du béton (fissuration et viscoélasticité)

Description des modèles

- Structuration du béton \leftrightarrow Évolution des résistances
 - Hypothèse : l'effet de la température est négligeable dans ce cas d'étude

$$\xi(t) = \frac{m(t)}{m_\infty} \quad \xi = \xi_0 + (1 - \xi_0) \frac{f_c(t)}{f_c(\infty)} \quad (\text{Ulm 1999})$$

$$R(t) = R(t_\infty) \frac{t^{m_1}}{m_2 + t^{m_1}}$$

- Retrait endogène : utilisation des courbes expérimentales
- Retrait de séchage
 - Hypothèse : isotherme de désorption linéaire pour des humidités relatives comprises entre 0,5 et 0,95

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}_{rs}}} = \alpha_h(t) \dot{h}_{r\underline{\underline{1}}}$$

Description des modèles

- Décrire le transport de l'eau dans la matrice solide

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\operatorname{div} (\underline{J}_l + \underline{J}_v)$$

Description des modèles

- Décrire le transport de l'eau dans la matrice solide



$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\operatorname{div} (\underline{J}_l + \underline{J}_v)$$

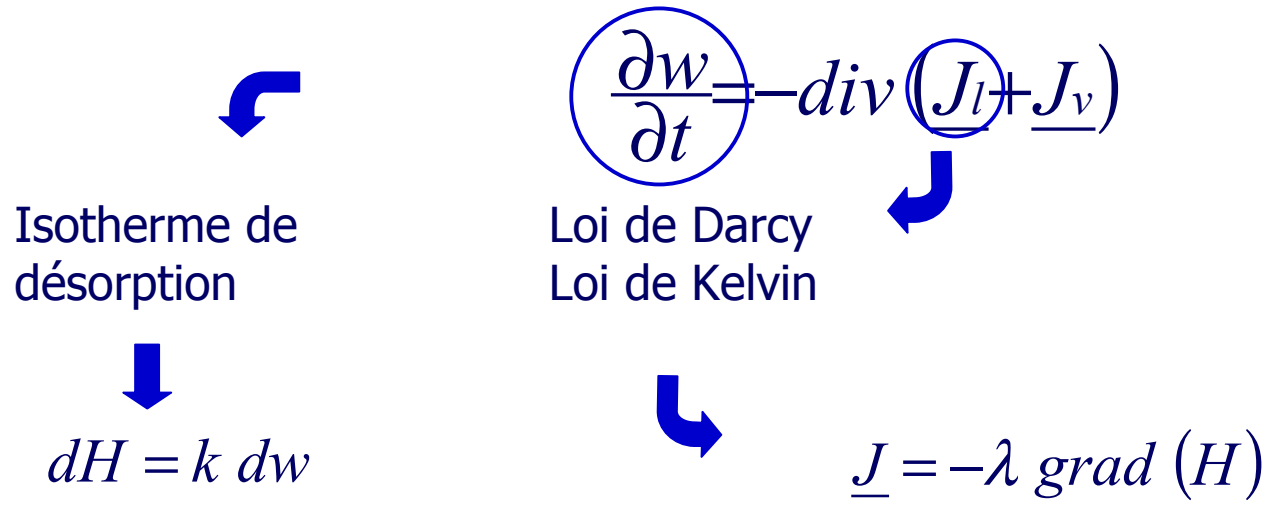
Isotherme de
désorption



$$dH = k \, dw$$

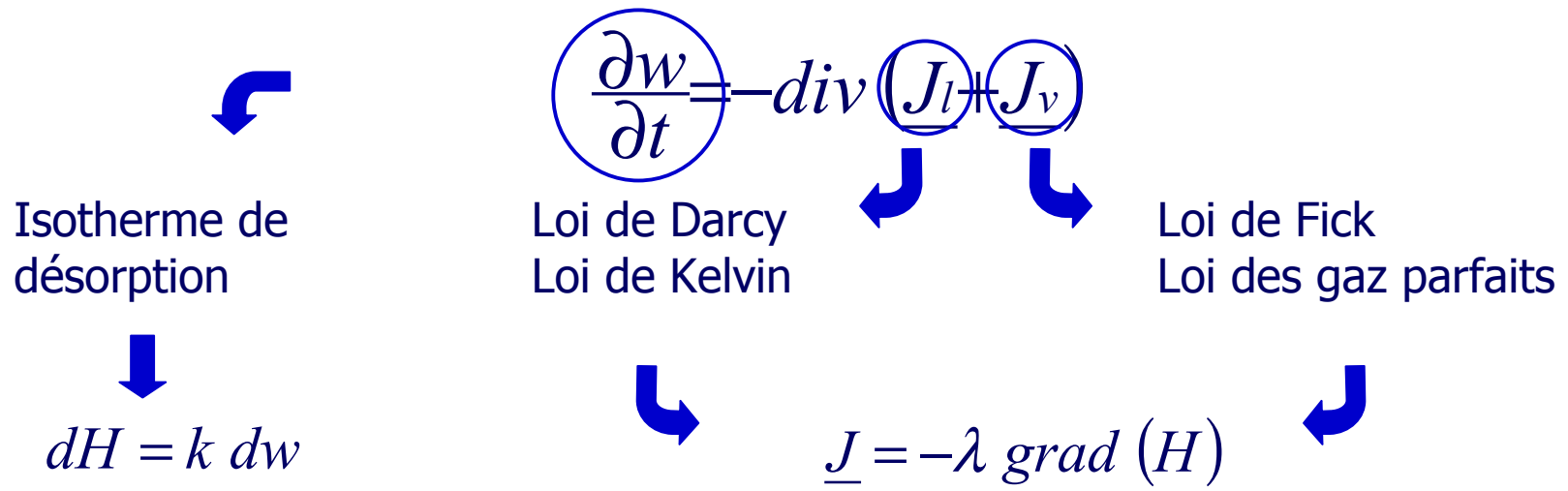
Description des modèles

- Décrire le transport de l'eau dans la matrice solide



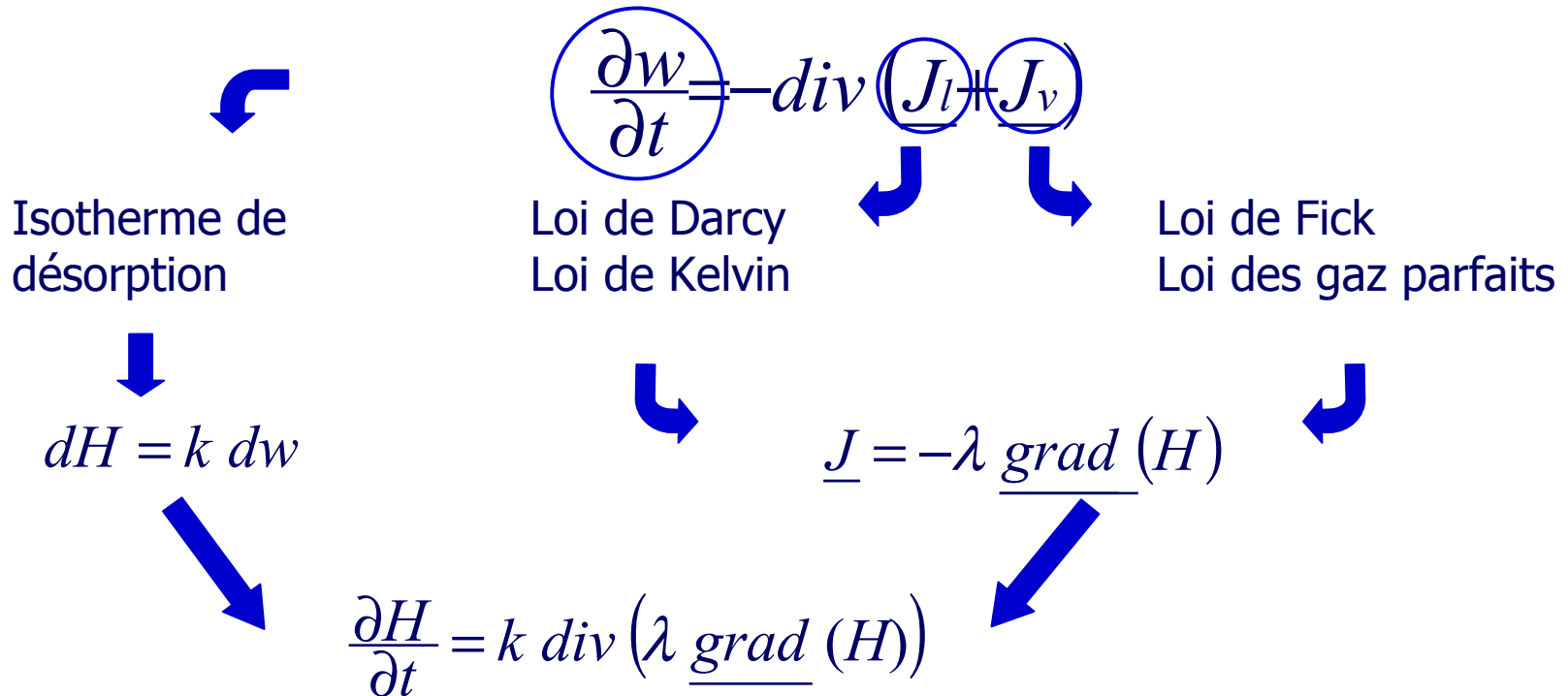
Description des modèles

- Décrire le transport de l'eau dans la matrice solide



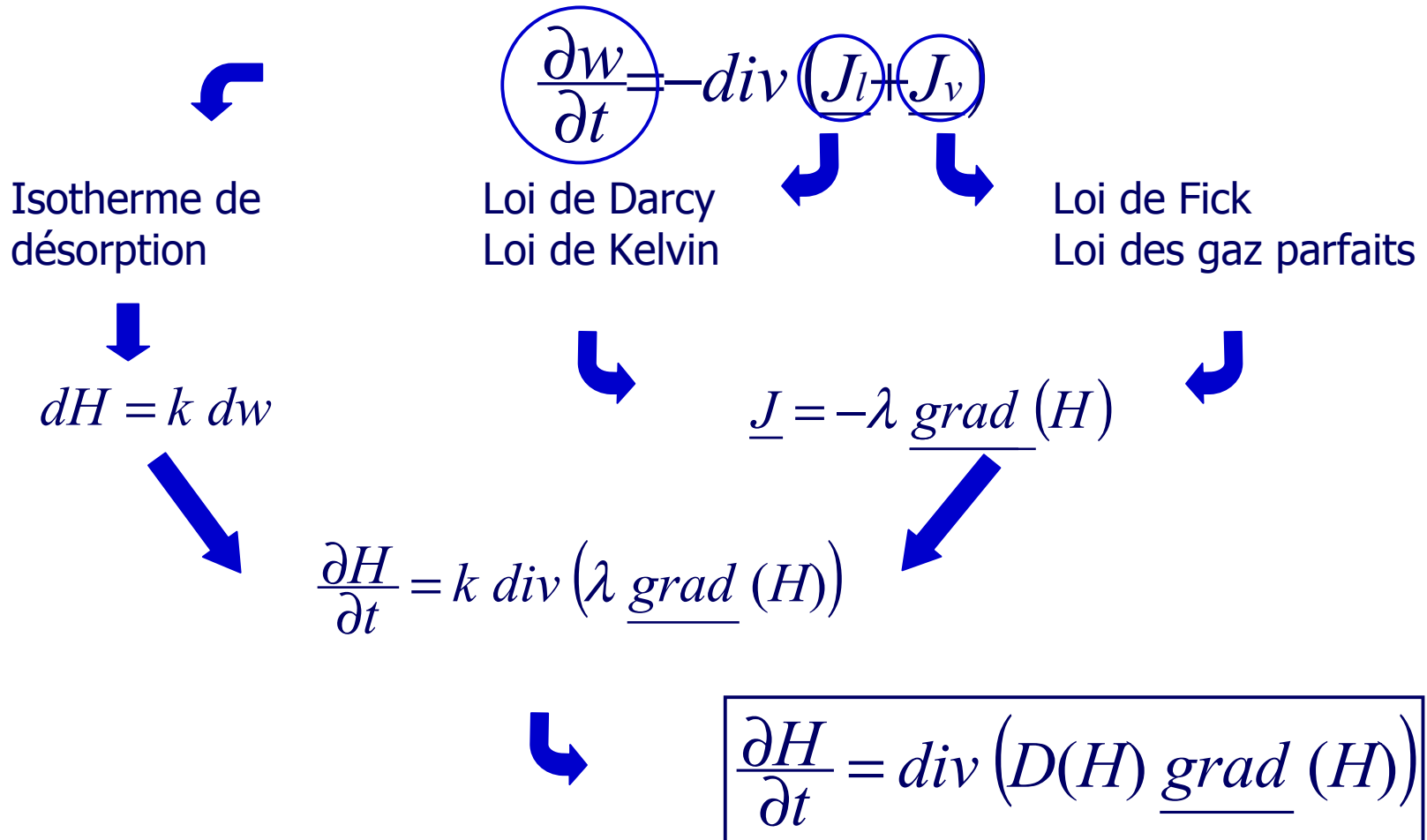
Description des modèles

- Décrire le transport de l'eau dans la matrice solide



Description des modèles

- Décrire le transport de l'eau dans la matrice solide



Description des modèles

- Comportement viscoélastique

- Théorie de la viscoélasticité linéaire vieillissante

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(t) = \int_0^t \underline{\underline{B}} \underline{\underline{J}}(\tau, t) d\underline{\underline{\sigma}}(\tau) \quad (\text{Salençon 1993})$$

- $J(t_0, t)$ fonction de retard vieillissante

- Décomposition en série de Dirichlet

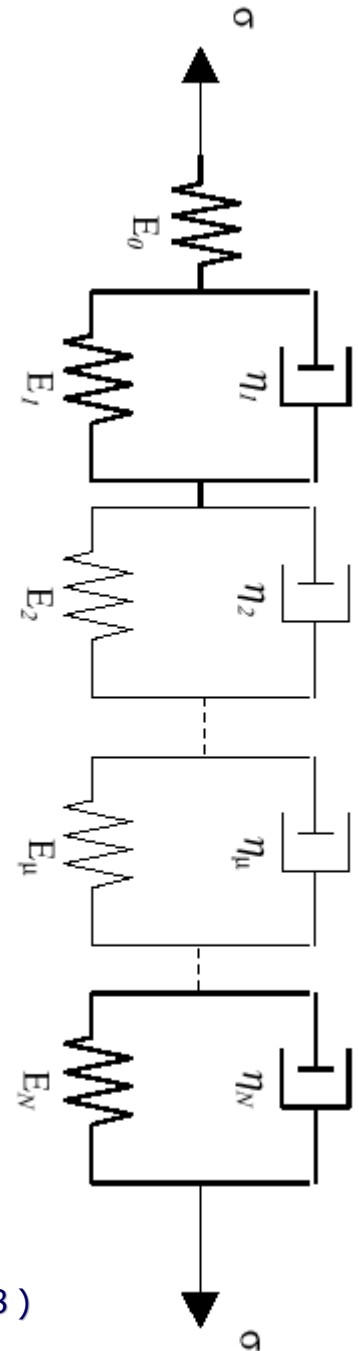
$$J(t_0, t) = \frac{1}{C_0(t_0)} + \sum_{\mu=1}^n \frac{1}{C_{\mu}(t_0)} \left(1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{\mu}}\right) \right)$$

(Bazant 1988)

- Fluage de séchage

- Terme additionnel dépendant de l'humidité et de la contrainte appliquée

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}_{f_s} = \kappa_{f_s} \underline{\underline{B}} \underline{\underline{\sigma}} |\dot{h}_r| \quad (\text{Bazant et Chern 1985, Bazant 1988})$$



Description des modèles

- Comportement endommageable du béton
 - Partition des déformations

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}_{totale}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}_i}} + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}_f}} + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}_r}}$$

- Théorie de l'endommagement (non local)

$$\underline{\underline{\sigma}} = (1 - d) \underline{\underline{\underline{C}}} \underline{\underline{\varepsilon}}_i$$

(Mazars 1984, Pijaudier 1987)

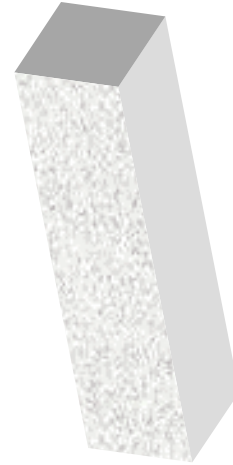
$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu_0}{E_0(1 - d)} \sigma_{ij} - \frac{\nu_0}{E_0(1 - d)} [\sigma_{kk} \delta_{ij}]$$

Description des modèles

- Armatures métalliques
 - Comportement plastique parfait
 - Interface parfaite
- Interface béton vieux / béton jeune
 - Interface parfaite
- Ces différents modèles sont incorporés dans un code aux éléments finis CAST3M (CEA)

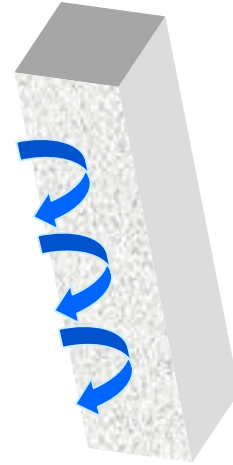
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



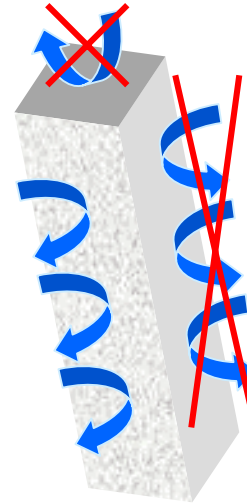
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



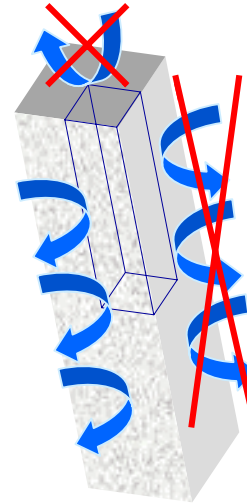
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



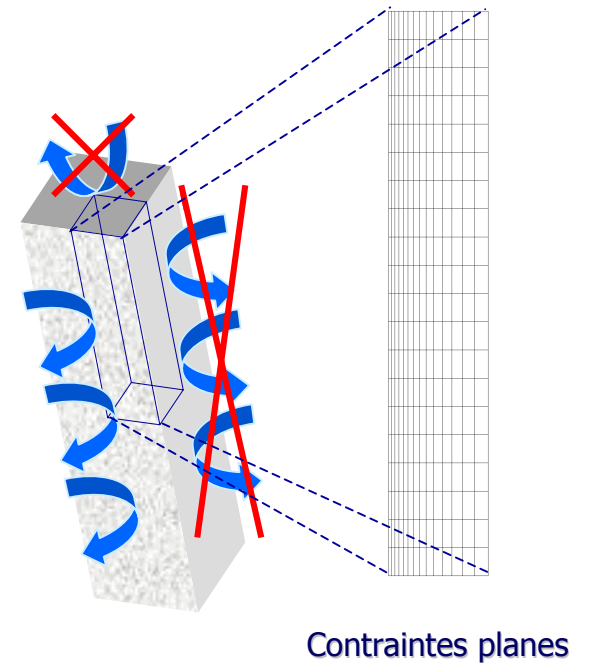
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



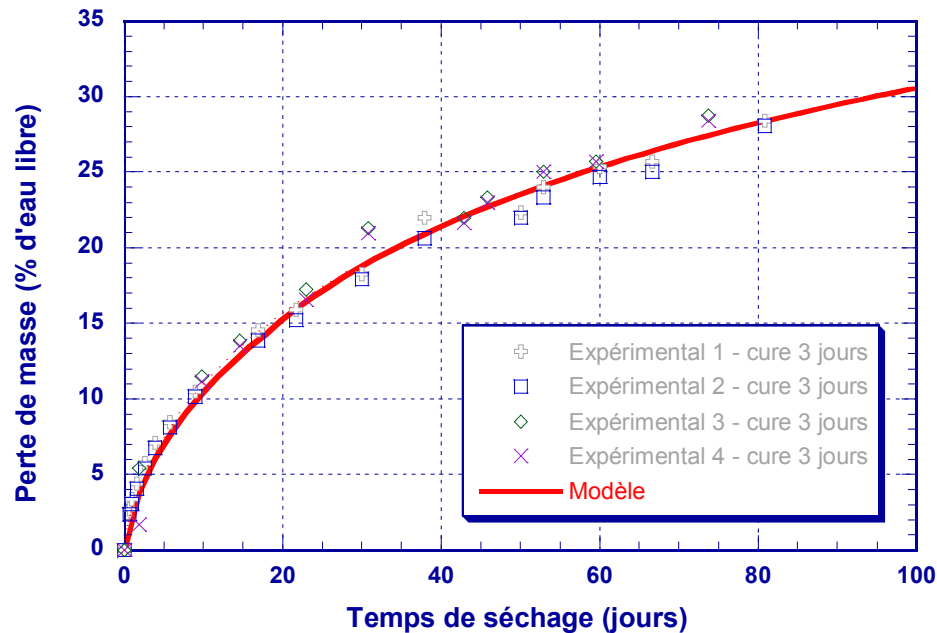
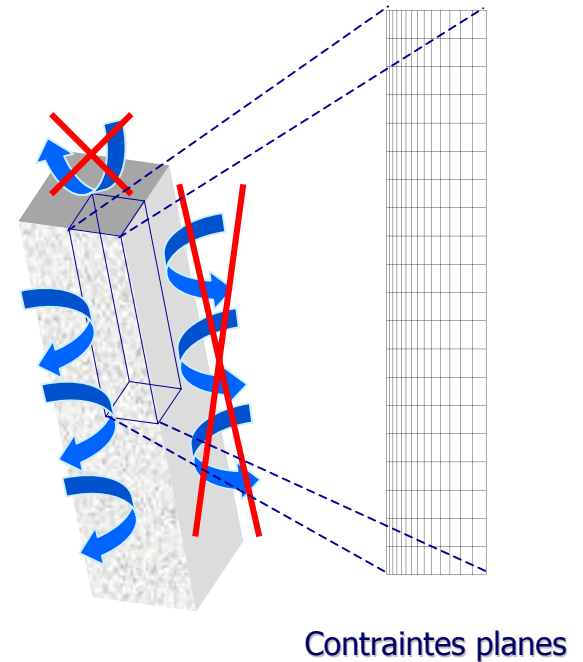
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



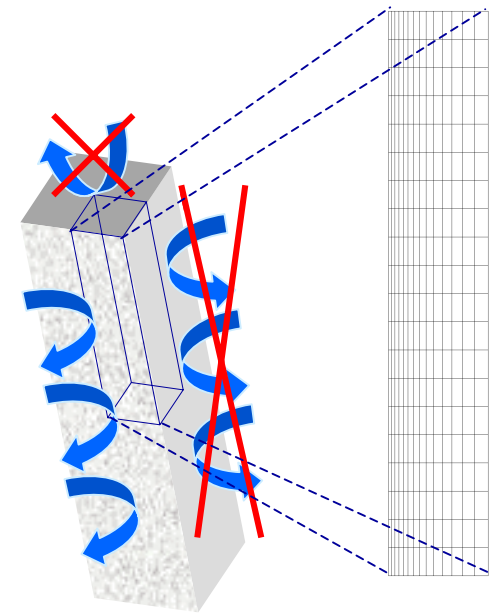
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle

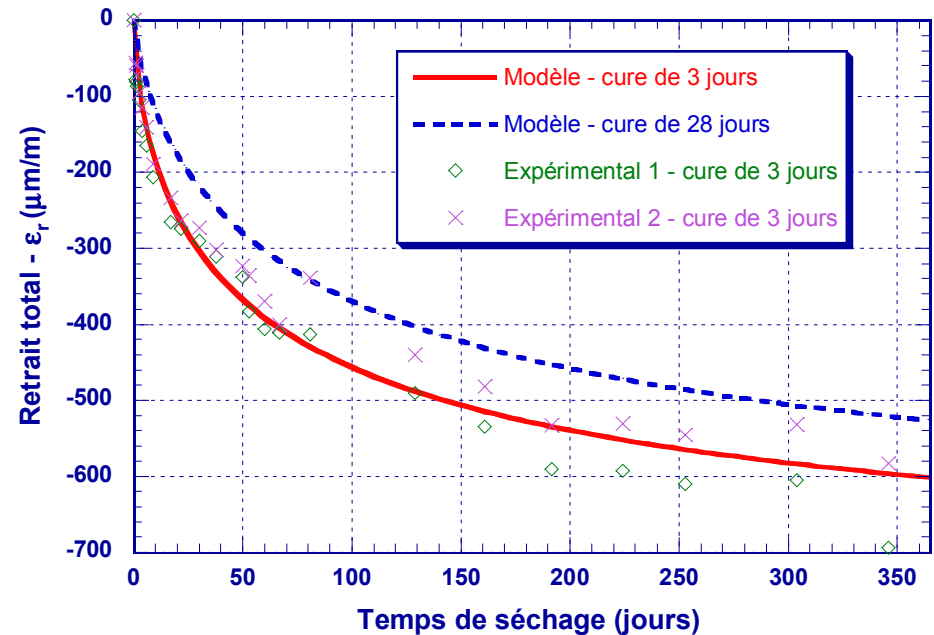
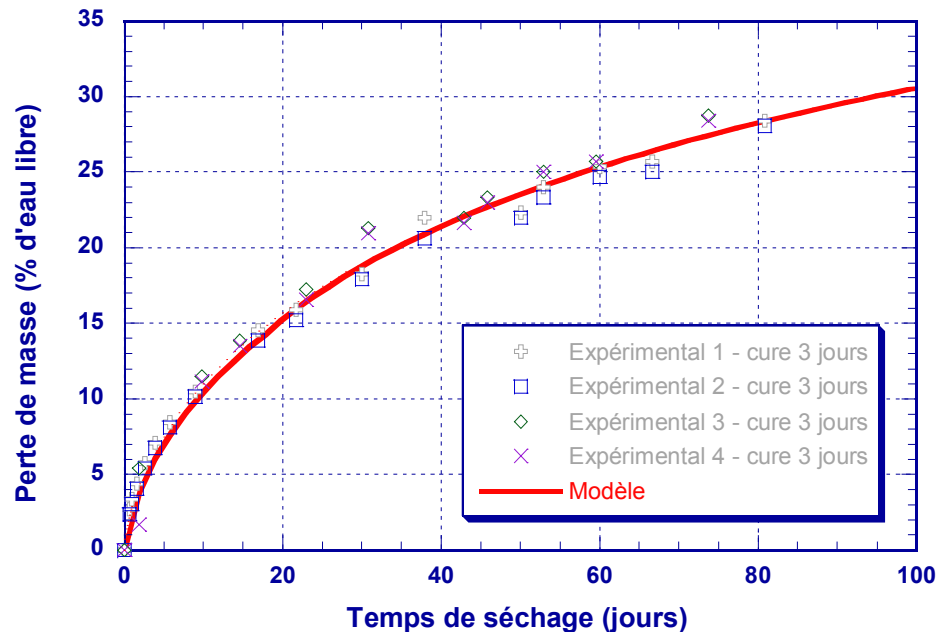


Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle

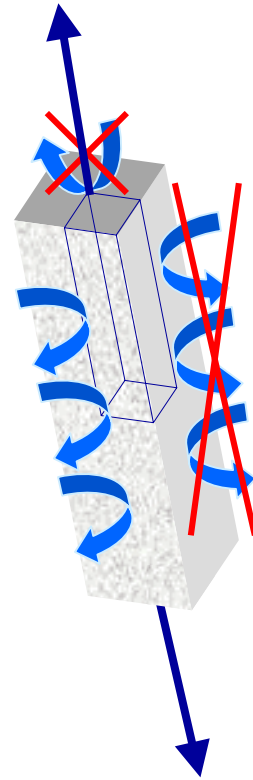


Contraintes planes



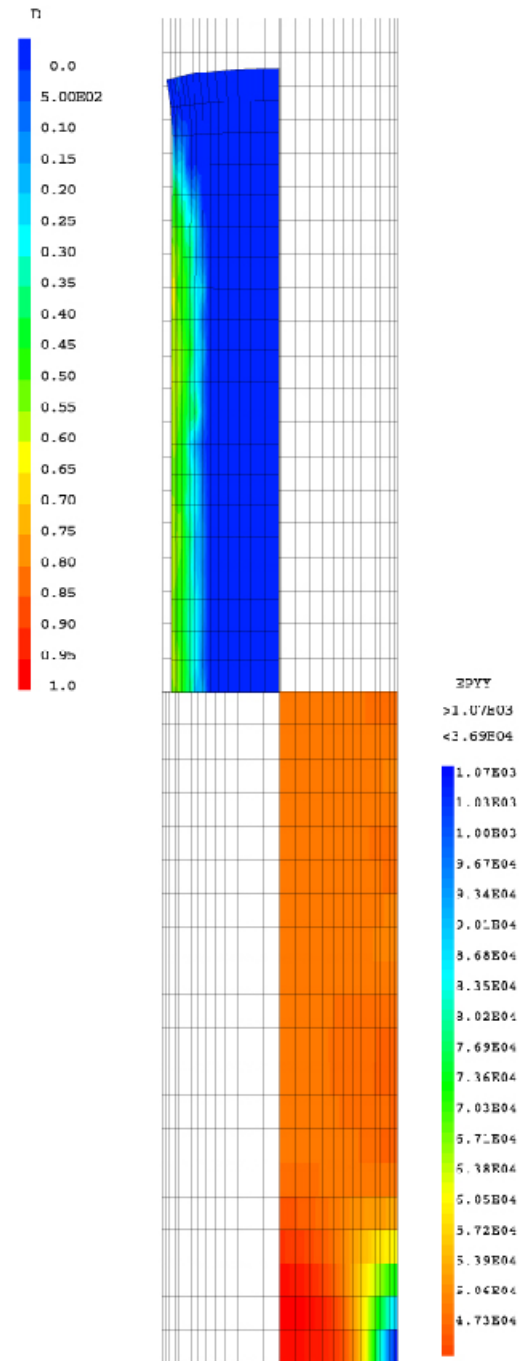
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



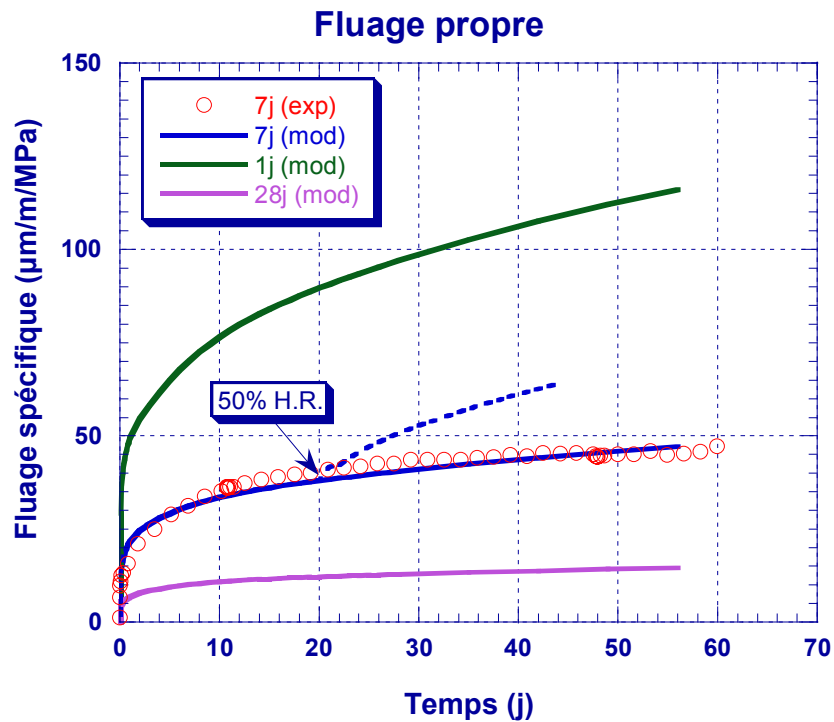
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



Identification et validation

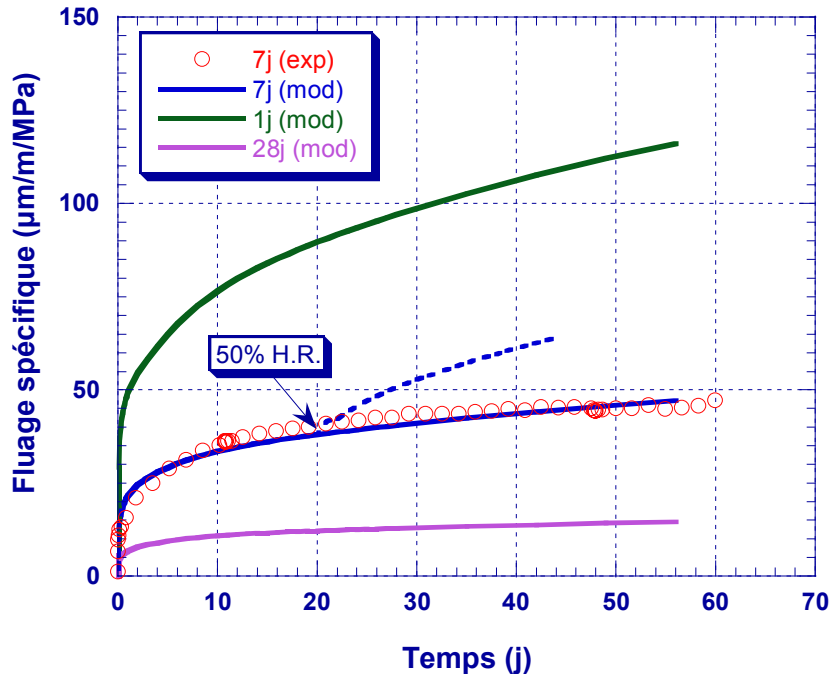
- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle



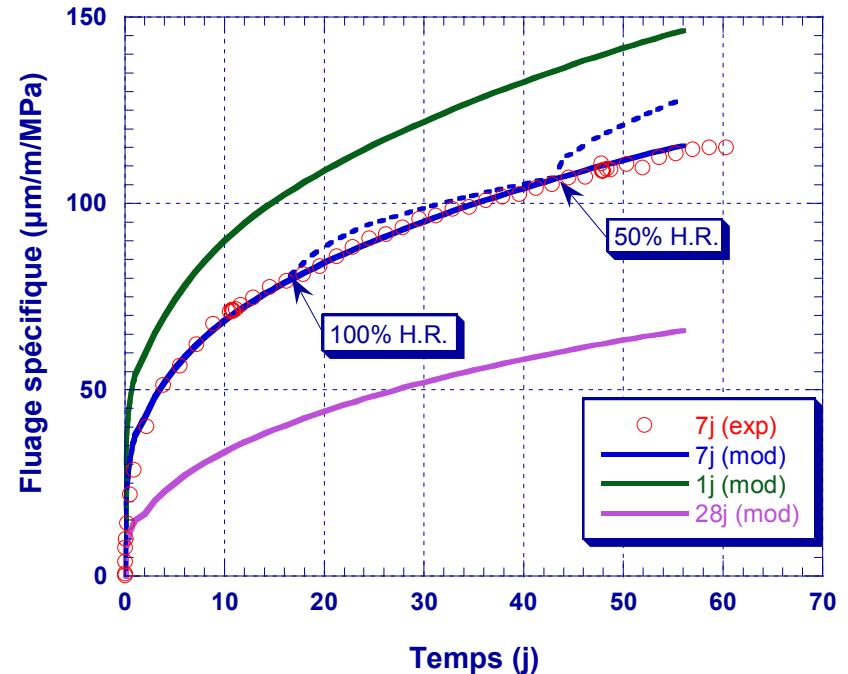
Identification et validation

- Phase d'identification
 - Modélisation des essais de caractérisation
 - Obtention des paramètres du modèle

Fluage propre

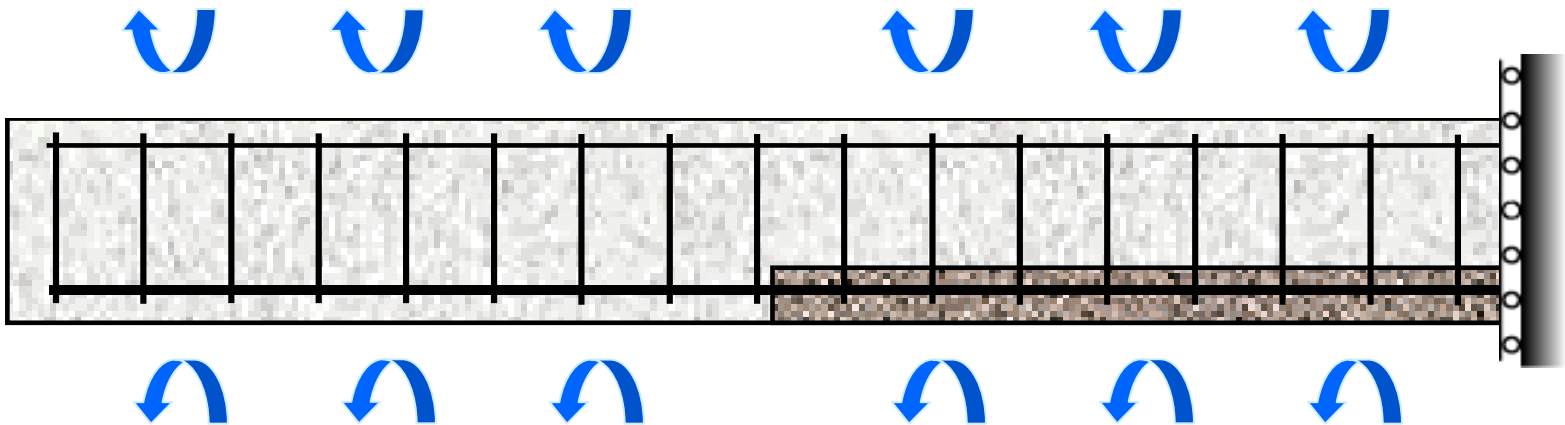


Fluage total à 50% H.R.



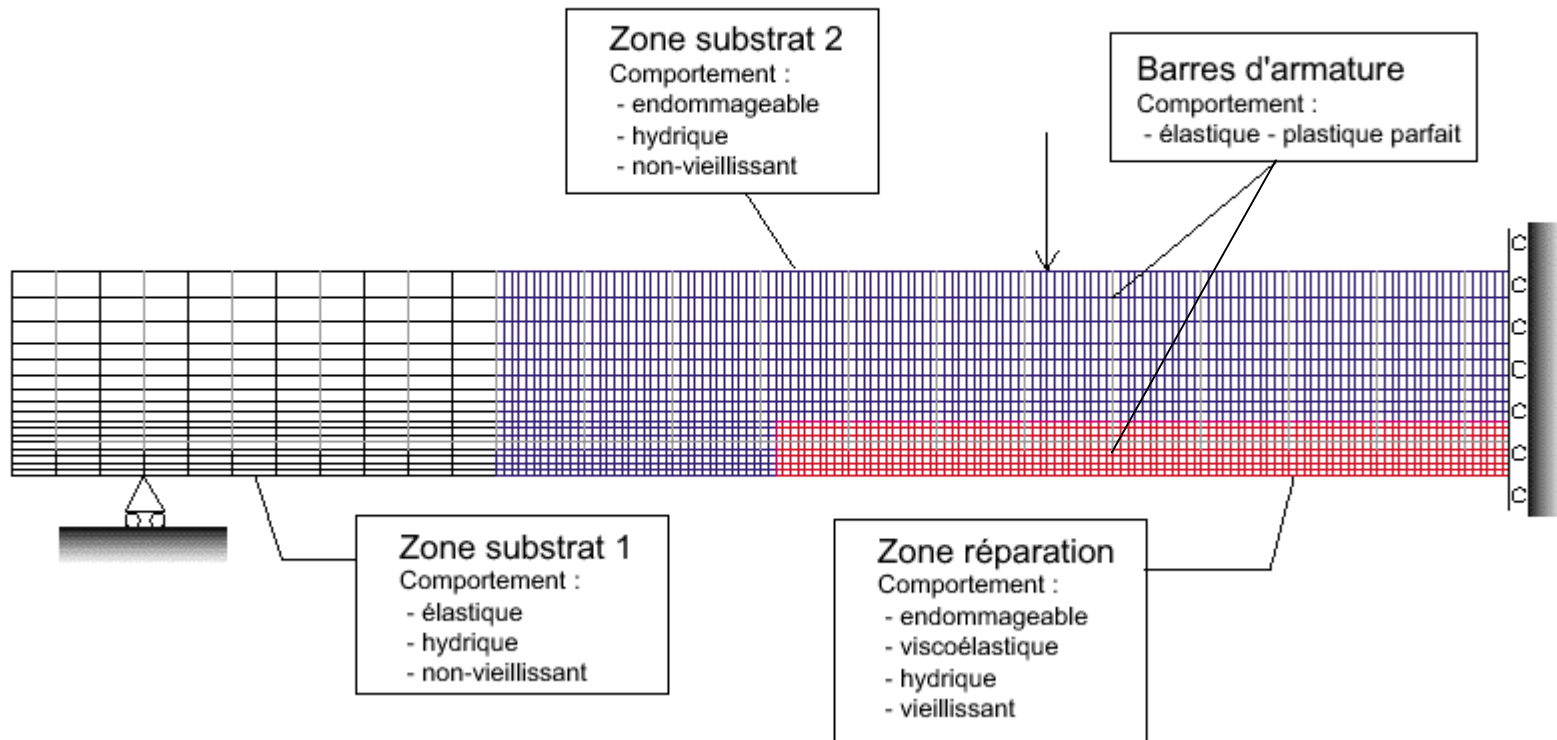
Identification et validation

- Phase de validation
 - Modélisation des essais sur structure
 - Vérification de la capacité des modèle à reproduire les essais sur structure



Identification et validation

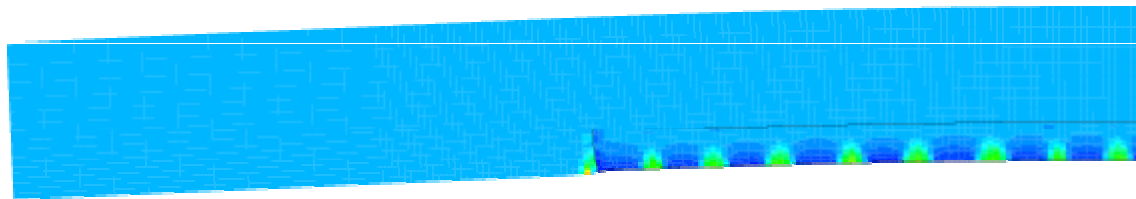
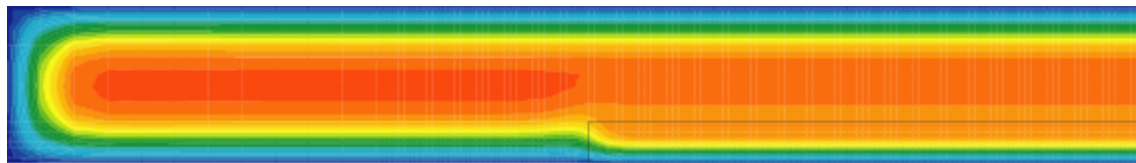
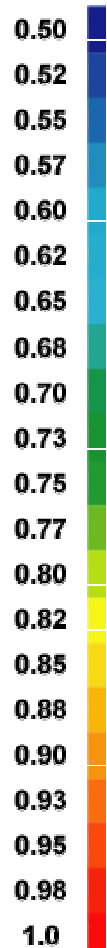
- Phase de validation
 - Modélisation des essais sur structure
 - Vérification de la capacité des modèle à reproduire les essais sur structure



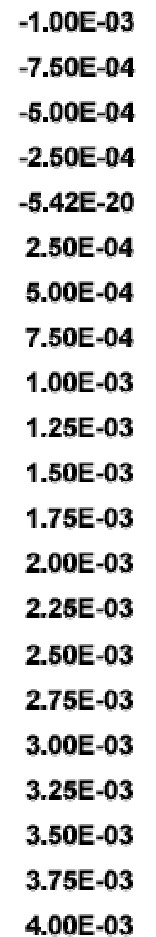
Identification et validation

■ Quelques exemples de calculs

Humidité

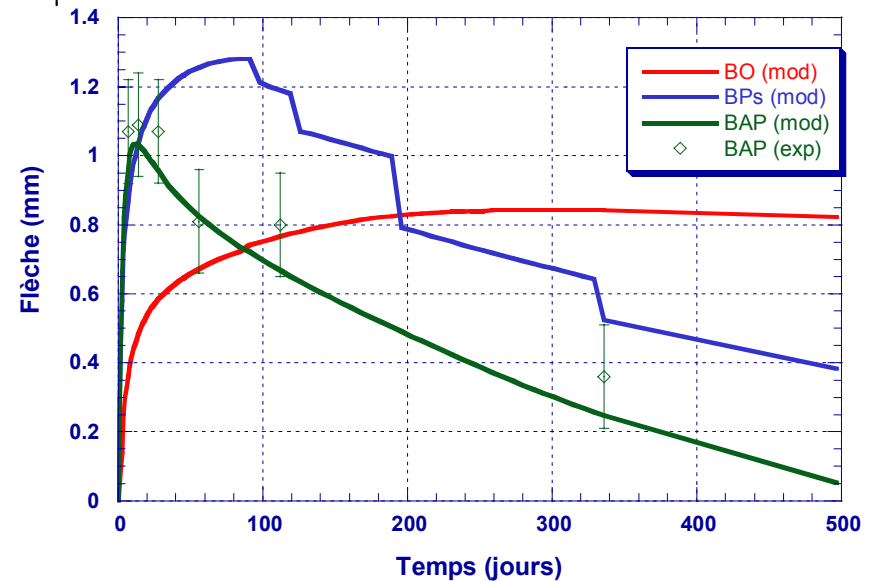
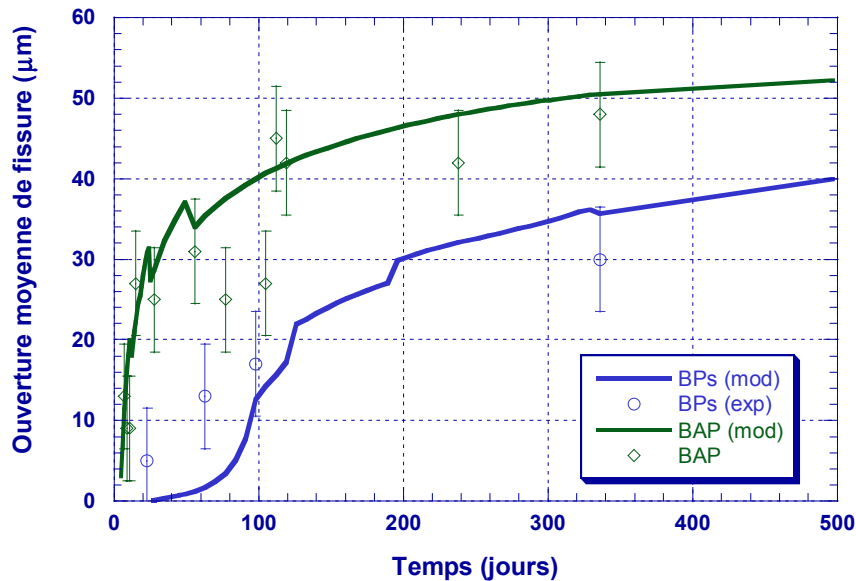
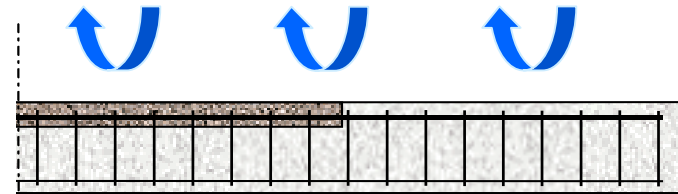


Déformation



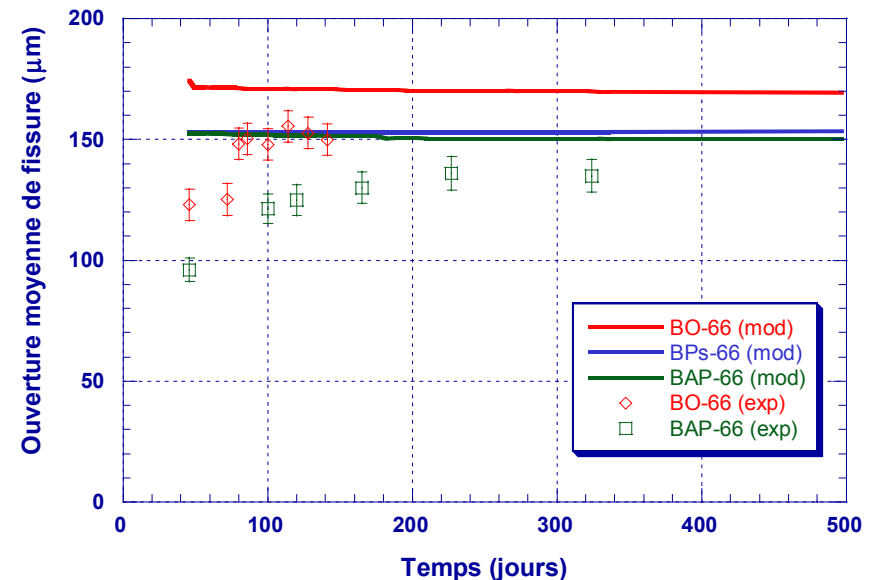
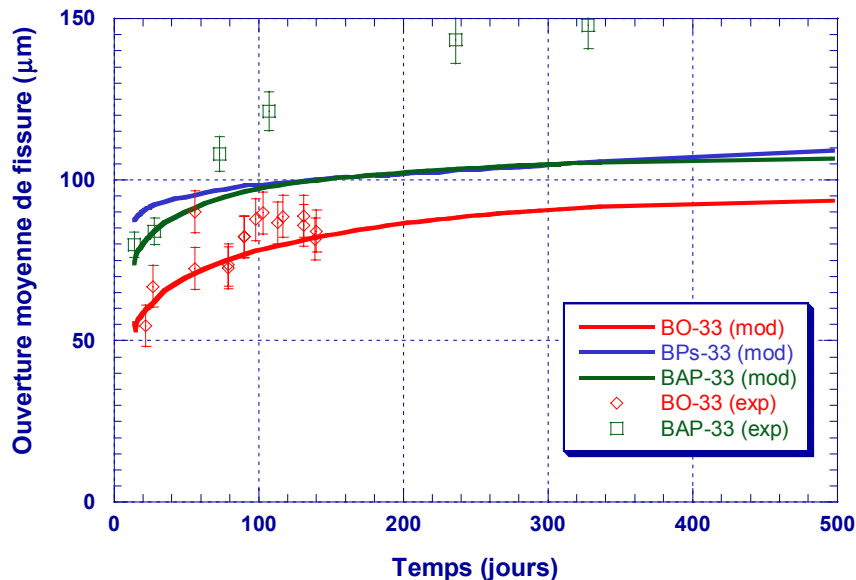
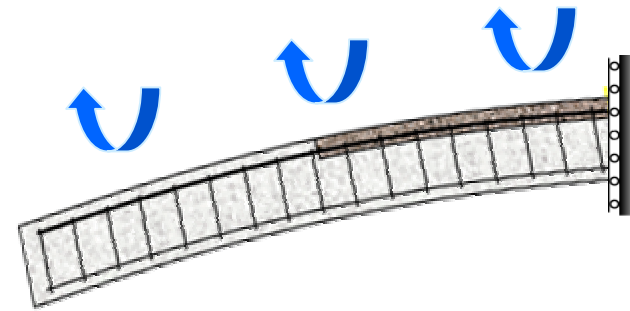
Identification et validation

- La modélisation numérique est en accord avec les résultats expérimentaux
 - Très bon résultats pour des conditions de séchage seul



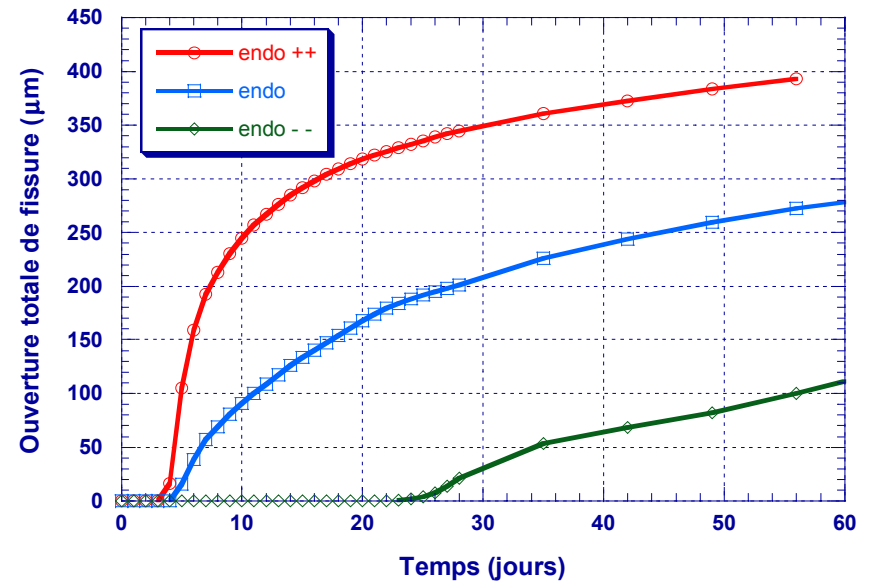
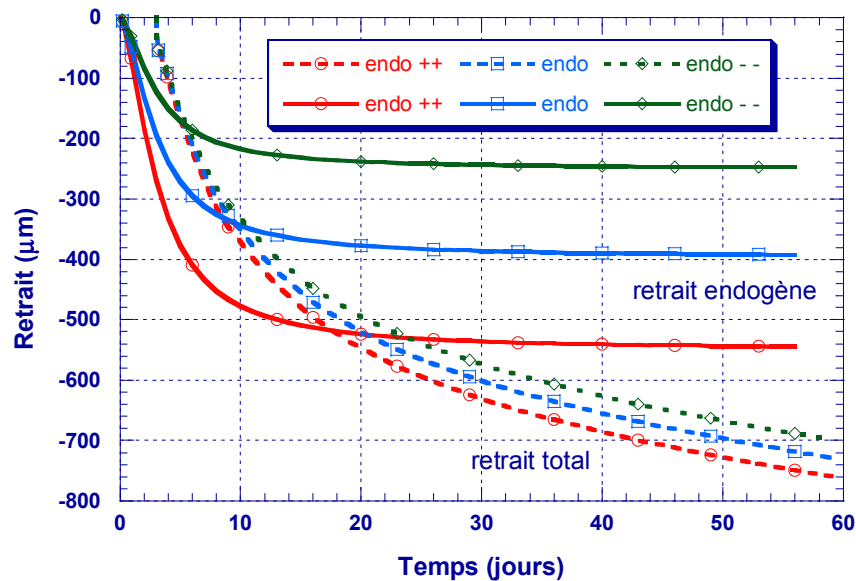
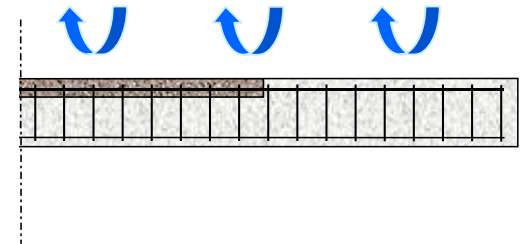
Identification et validation

- La modélisation numérique est en accord avec les résultats expérimentaux
 - Résultats corrects pour des conditions de séchage et de chargement

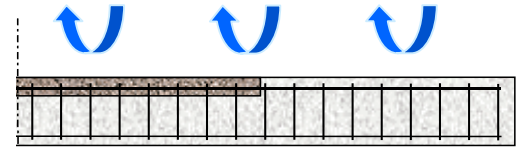


Étude d'influence

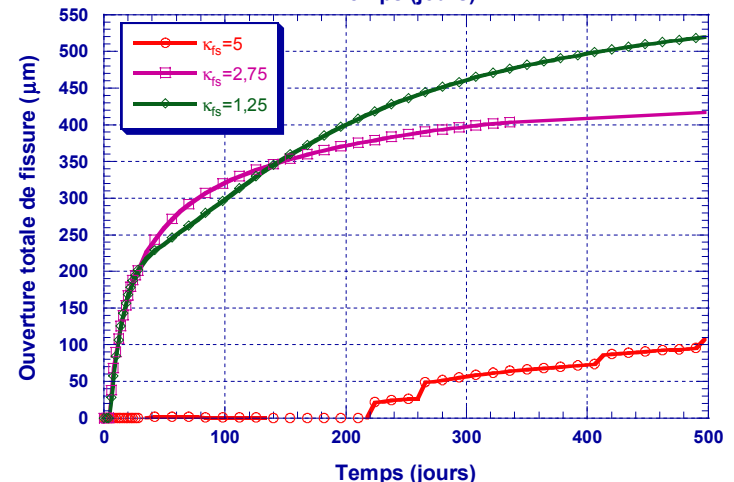
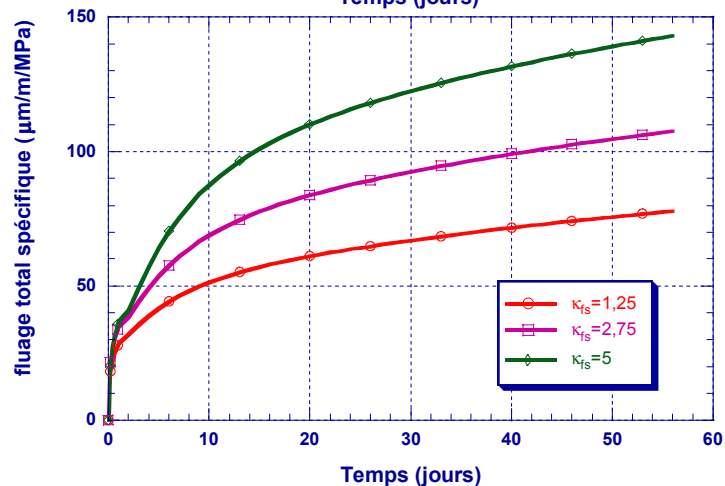
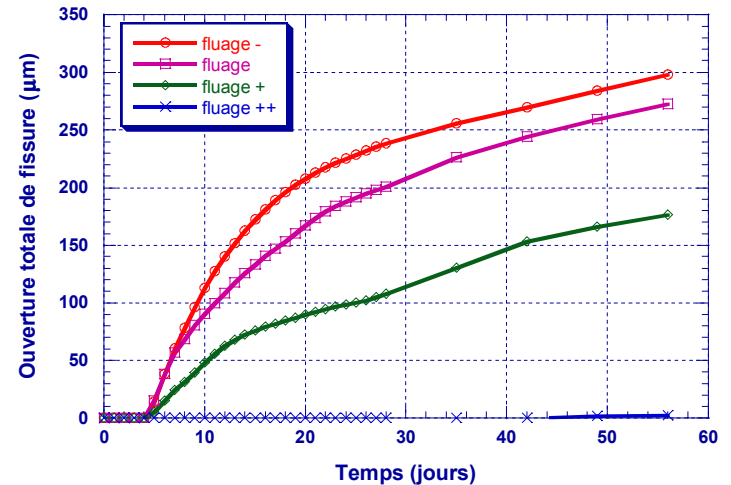
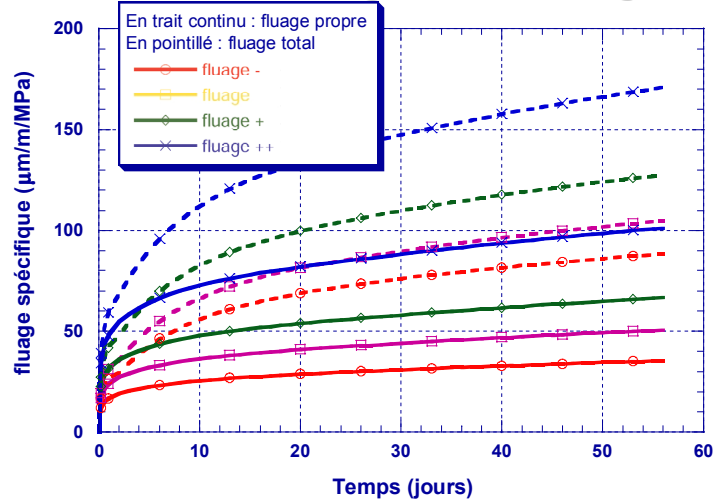
- Influence du retrait de séchage
 - → confirme les observations expérimentales
- Influence du retrait endogène
 - → montre l'importance du retrait endogène
 - → le retrait endogène ne doit pas être négligé



Étude d'influence

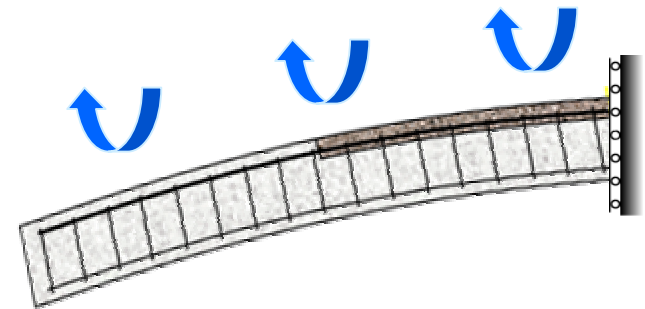
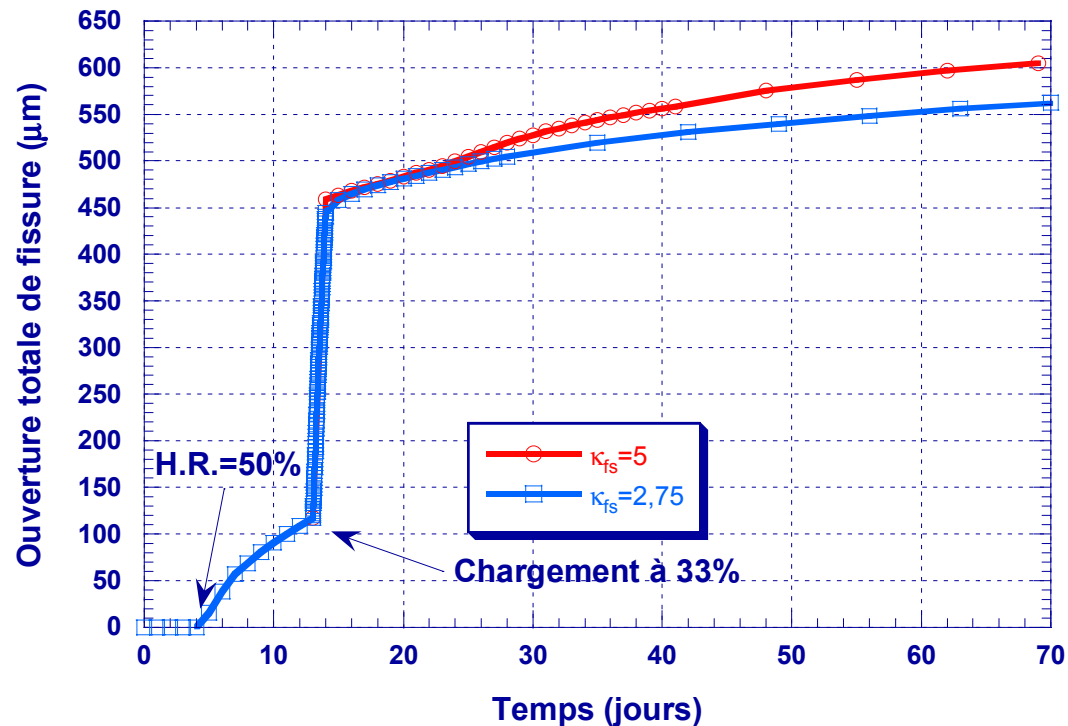


- Influence relative du fluage propre et du fluage de séchage
 - → le fluage de séchage a un effet plus bénéfique que le fluage propre



Étude d'influence

- Effet structurel du fluage
 - En augmentant le fluage, la fissuration augmente
 - Confirme les observations expérimentales





Conclusions

Conclusions

- Dans l'étude expérimentale nous avons :
 - effectué une caractérisation d'un grand nombre de propriétés des matériaux utilisés ;
 - mis en œuvre des techniques et des moyens innovants (banc de fluage en traction, essais en vraie grandeur, ...).
- L'étude expérimentale met en évidence que :
 - la disparité des propriétés hydriques et viscoélastiques des matériaux présentant les mêmes caractéristiques mécaniques usuelles ;
 - le retrait de séchage influence significativement la fissuration ;
 - le fluage en traction permet de diminuer, voire d'éviter la fissuration ;
 - cette fissuration évolue tout au long de la vie de l'ouvrage et la part due au retrait de séchage n'est pas forcément négligeable par rapport à la fissuration « purement mécanique » ;
 - le comportement mécanique des éléments réparés est quasi similaire à celui des éléments sains (pas de perte résistance ni de ductilité).

Conclusions

- Dans l'étude théorique nous avons réalisé un outil d'analyse numérique prenant en compte différents phénomènes physiques :
 - évolution des caractéristiques au cours du temps ;
 - Transports hydriques ;
 - retraits endogène et de séchage ;
 - comportement mécanique (théorie de l'endommagement et viscoélasticité) ;
- Cette étude théorique est décomposée en :
 - une phase d'identification et de validation qui montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux ;
 - Une étude d'influence qui permet de compléter l'étude numérique et conclure sur les points suivants :
 - effet non négligeable du retrait endogène ;
 - effet positif du fluage et essentiellement du fluage de séchage ;
 - effet structurel du fluage en traction.

Recommandations

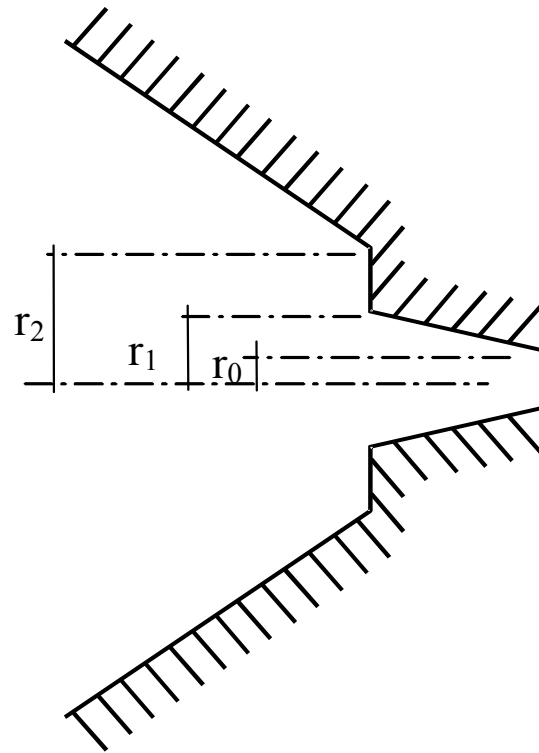
- Minimiser le retrait (séchage + endogène)
- Augmenter le fluage (de séchage)
- Réparer sous chargement de poids propre
 - La réparation est peu sollicitée en traction par le chargement
 - La réparation est pratiquement dans un cas de séchage seul
 - Évite l'effet structurel du fluage
- Éviter la « recette » toute prête !
 - Chaque structure à réparer a ses spécificités
 - Indice de convenance

Perspectives

- Proposition d'un indice de convenance (à très court terme)
- Expérimentales :
 - compléter l'étude du fluage en traction (essais au jeune âge, aspect vieillissant, bétons projetés ...)
 - caractérisation des interfaces (thermographie, ...)
 - nouveaux bétons ...
- Théoriques :
 - affiner les modèles (fluage avec prise en compte de l'influence de l'humidité interne, hydratation, ...)
 - modèles prenant en compte la refermeture des fissures ;
 - modélisation tridimensionnelle.

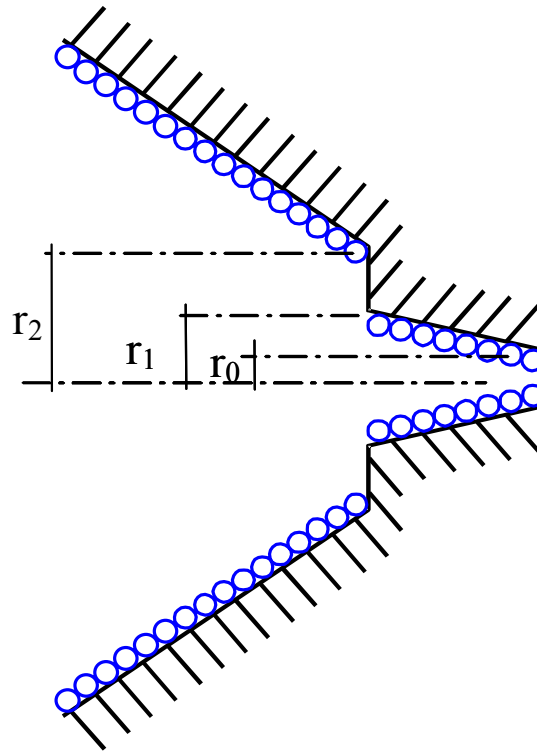
Mécanismes physiques

Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm



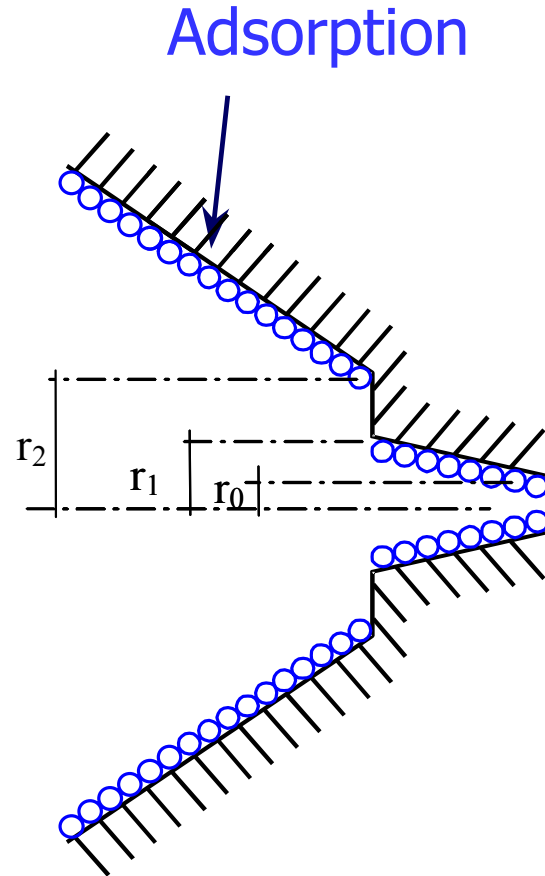
Mécanismes physiques

Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm



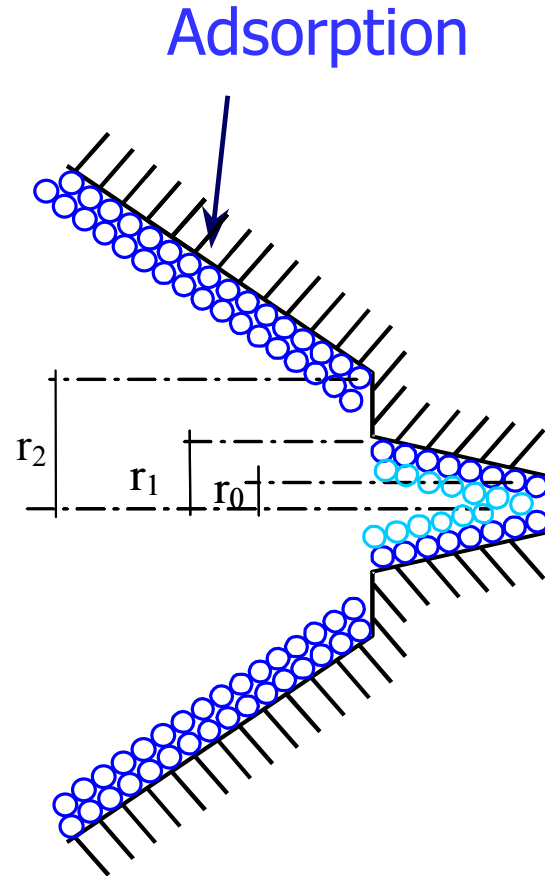
Mécanismes physiques

Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm



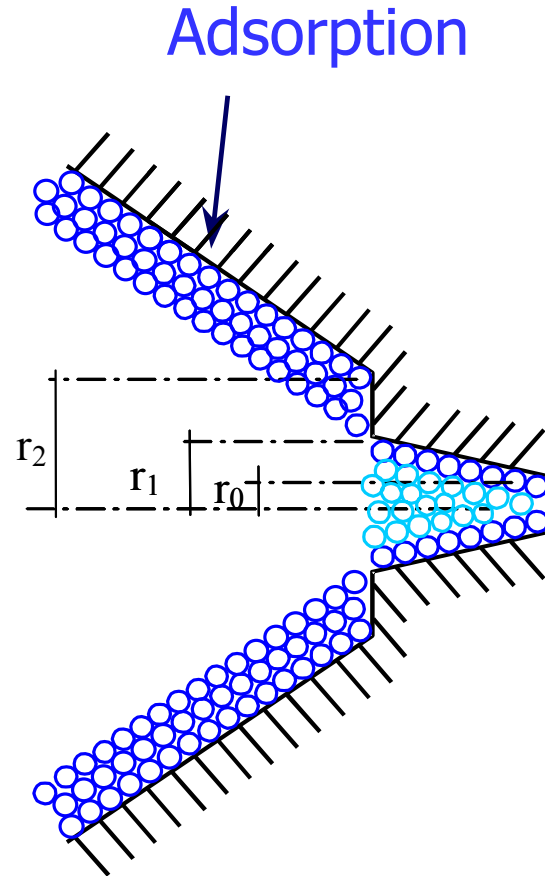
Mécanismes physiques

Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm



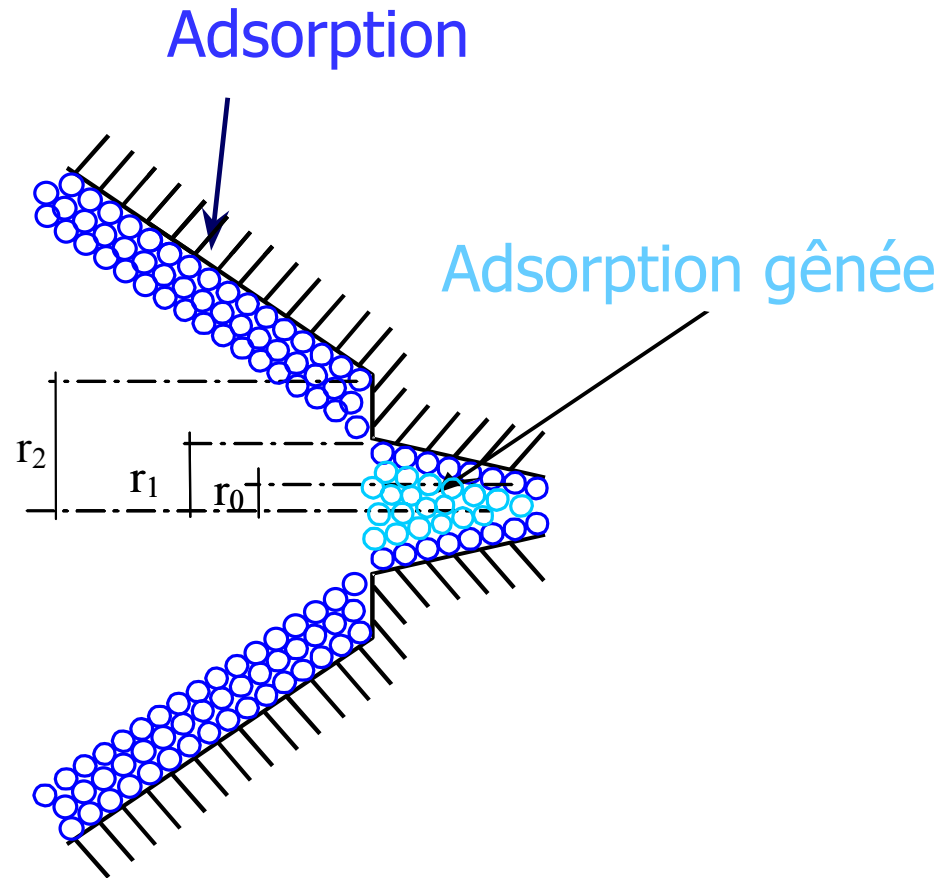
Mécanismes physiques

Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm



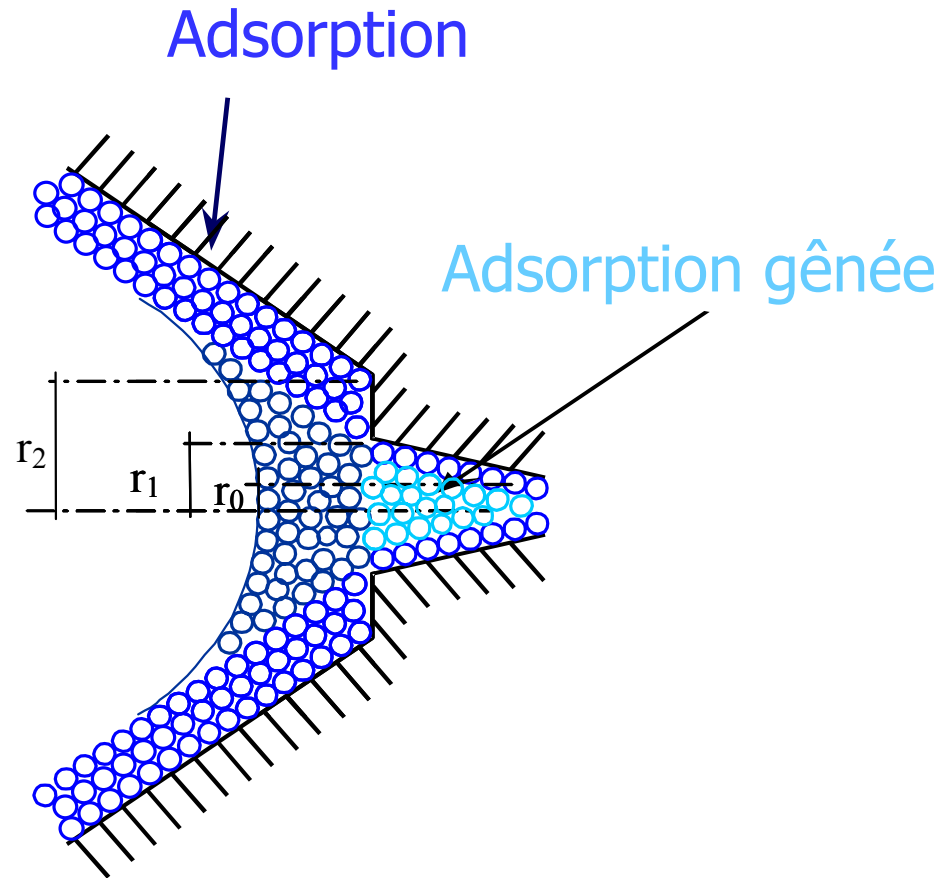
Mécanismes physiques

Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm



Mécanismes physiques

Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm

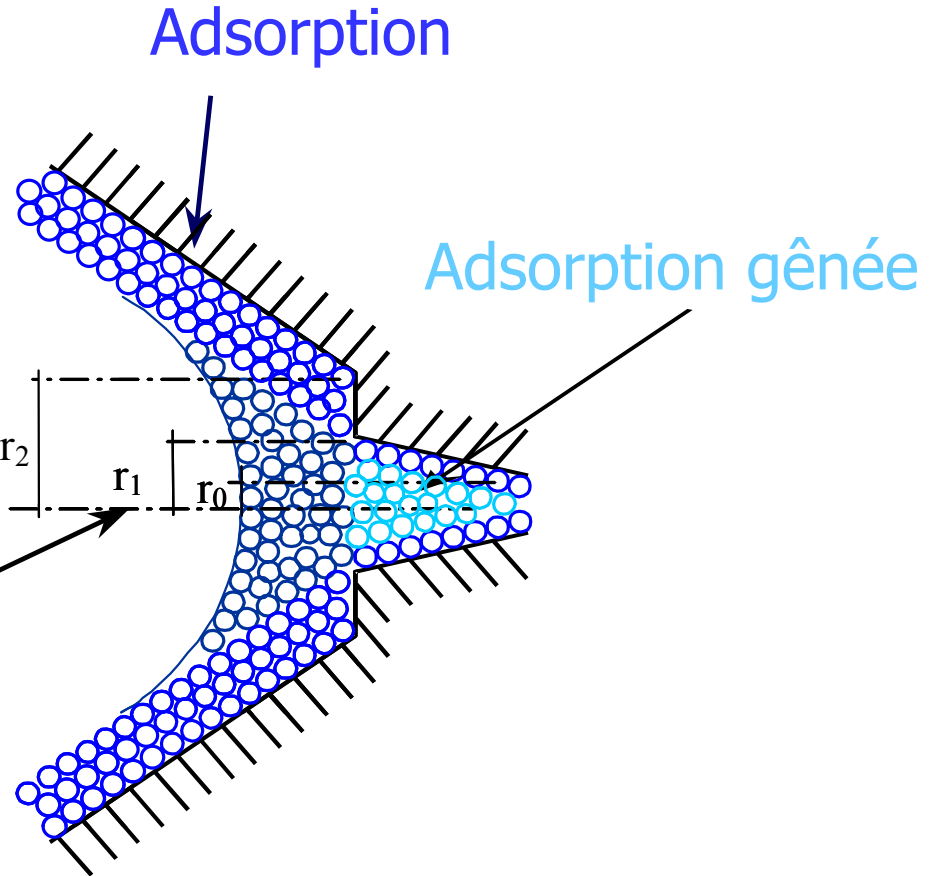


Mécanismes physiques

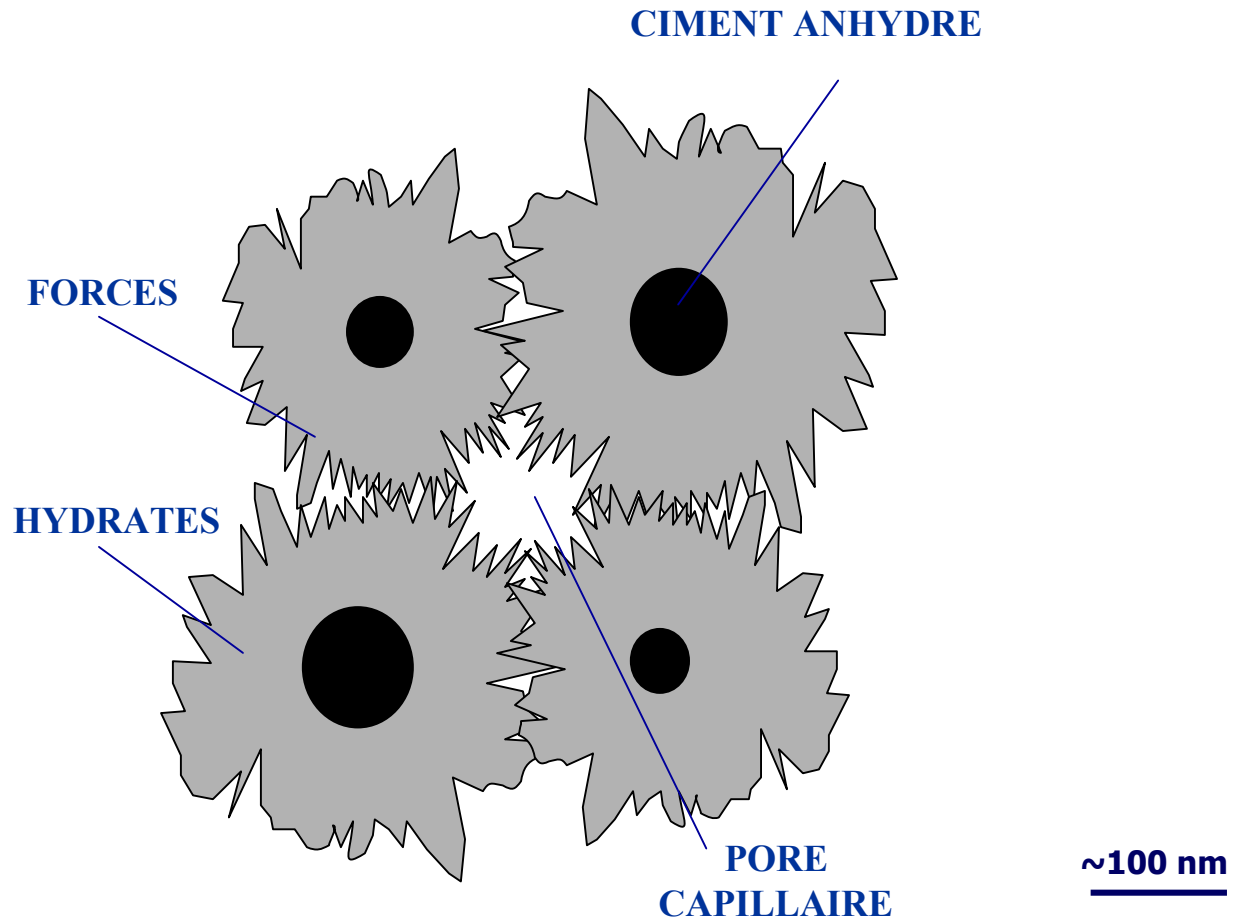


Diamètre d'une
molécule d'eau : 0,3nm

Condensation capillaire



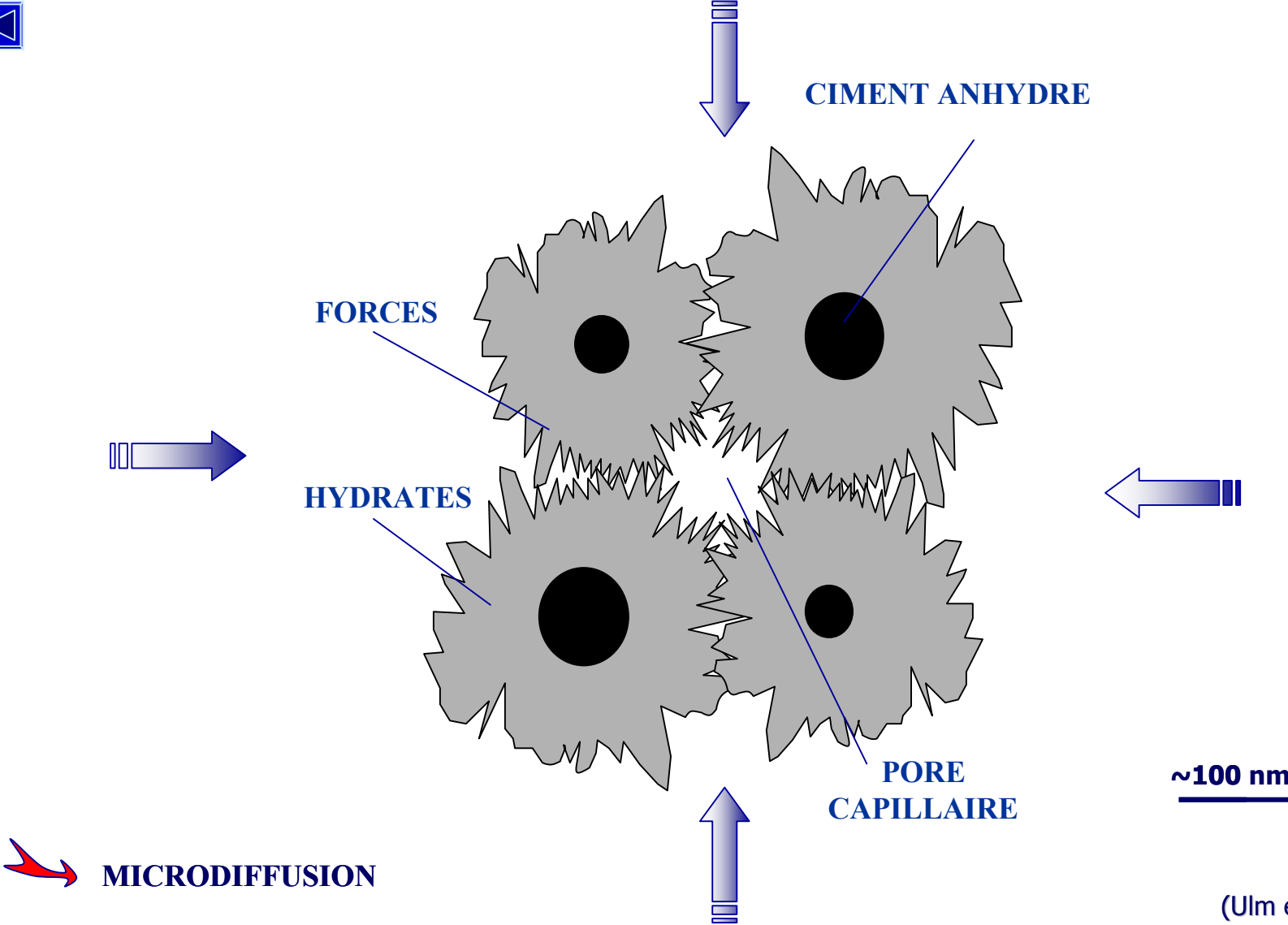
Microdiffusion



 **MICRODIFFUSION**

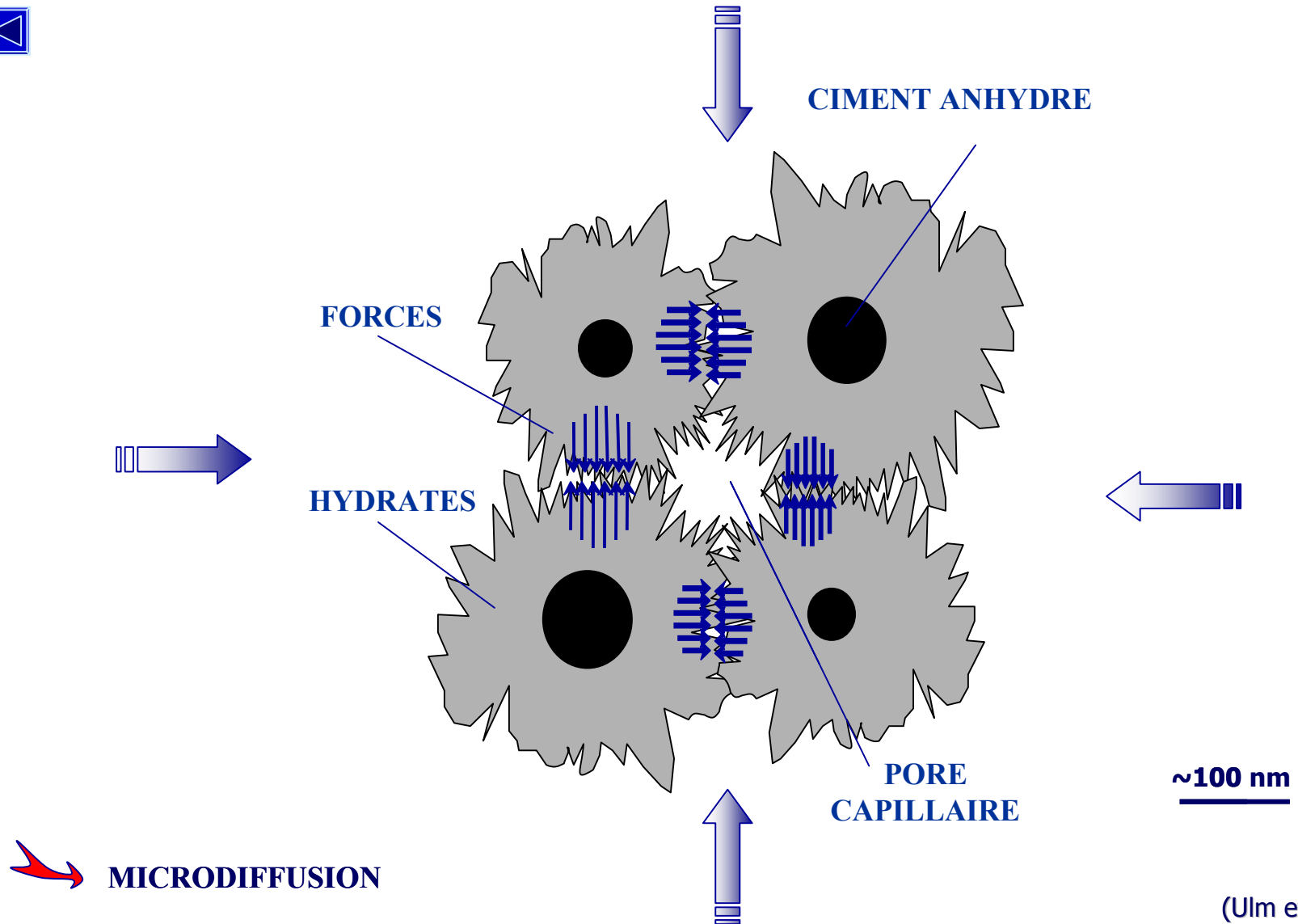
(Ulm et Acker 1997)

Microdiffusion



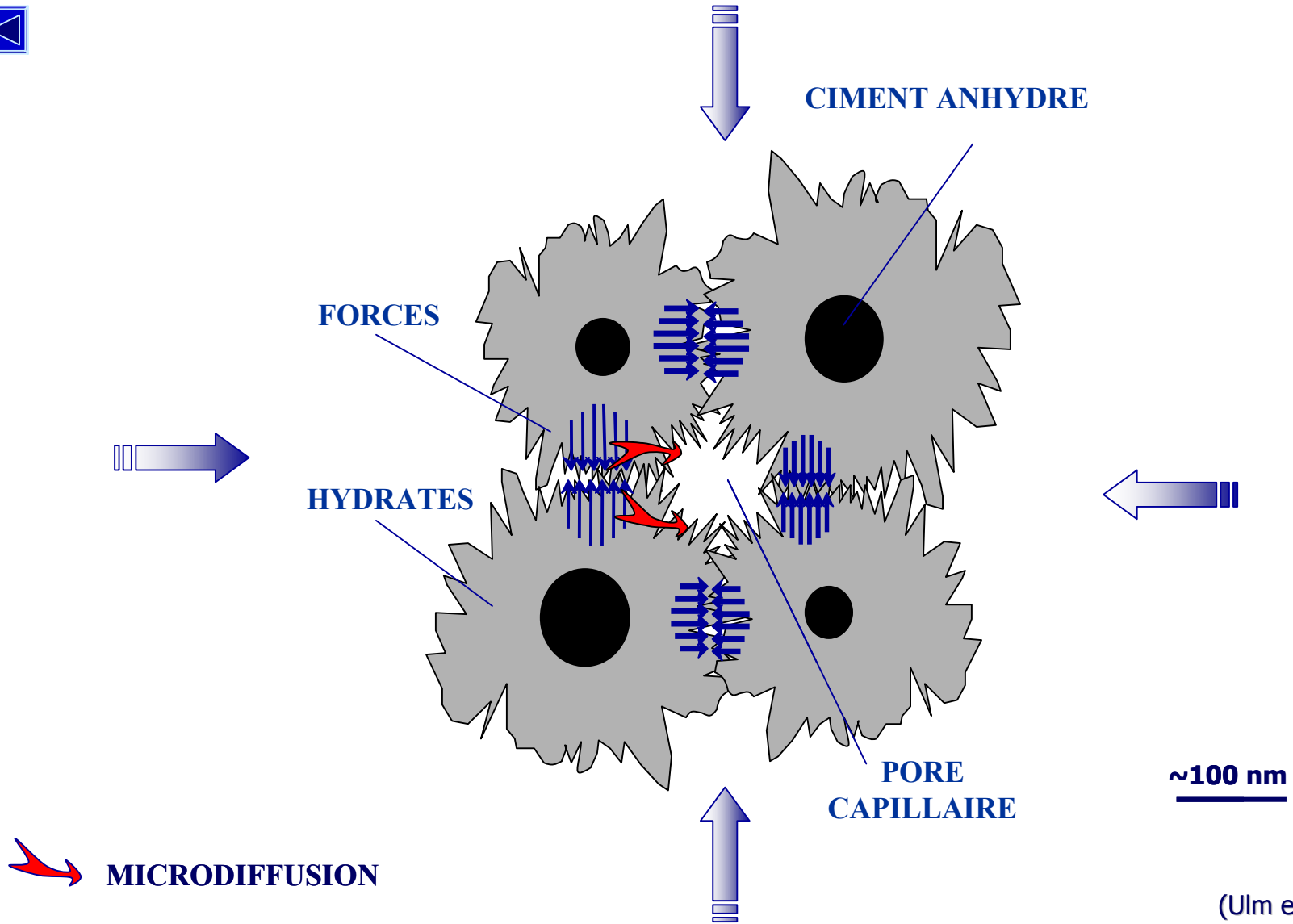
(Ulm et Acker 1997)

Microdiffusion



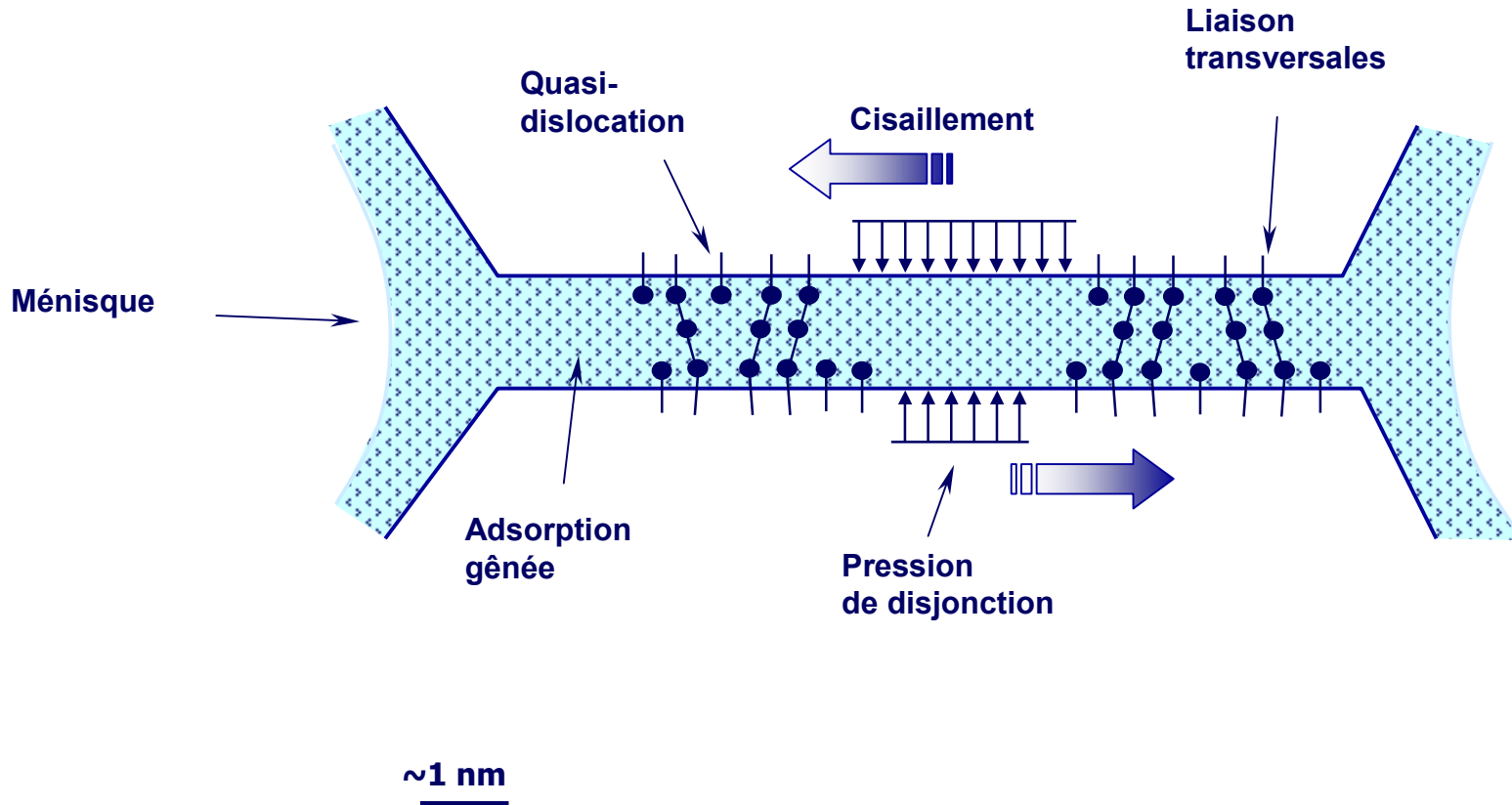
(Ulm et Acker 1997)

Microdiffusion

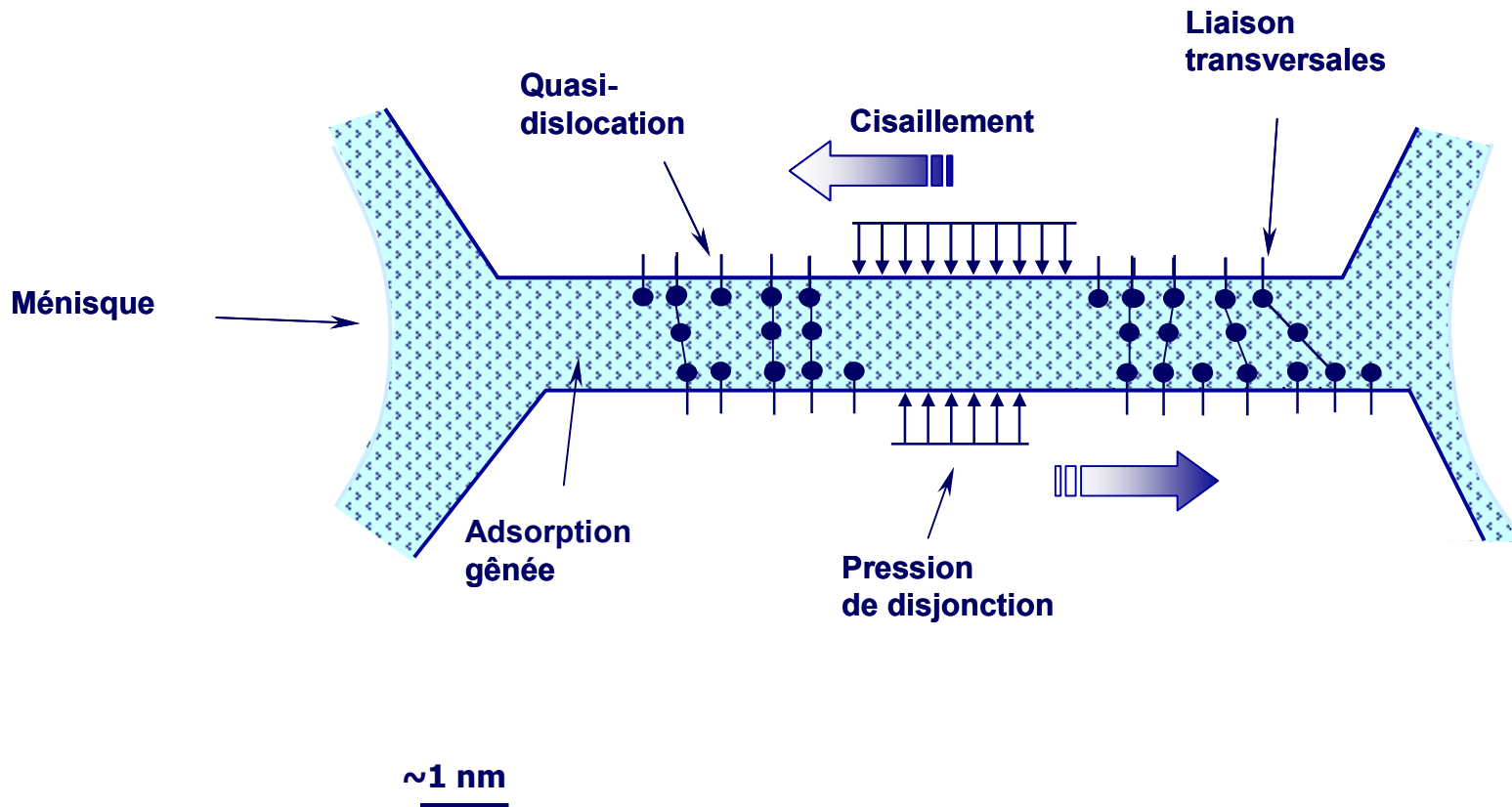


(Ulm et Acker 1997)

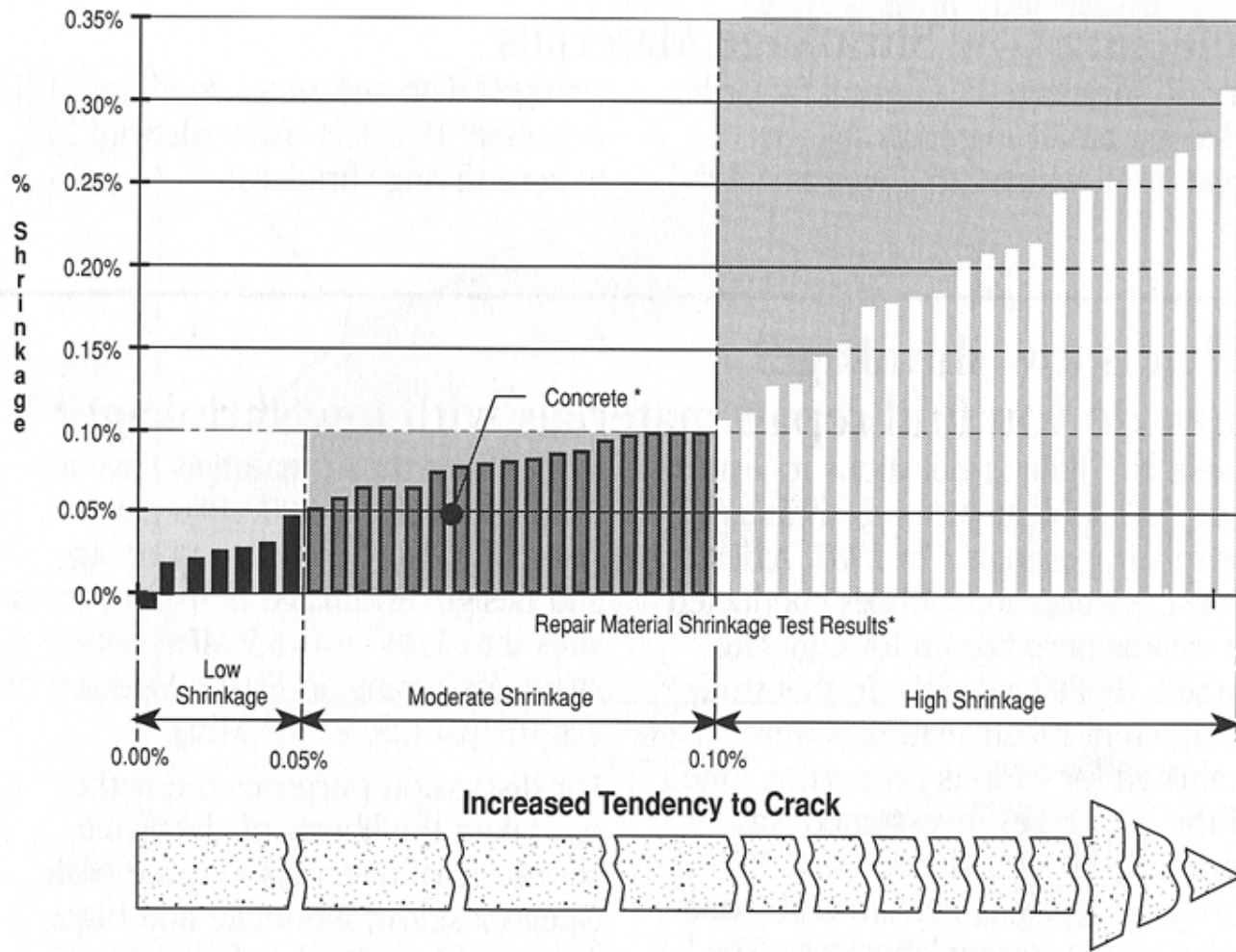
Cisaillement



Cisaillement



Retrait de séchage de quelques matériaux de réparation



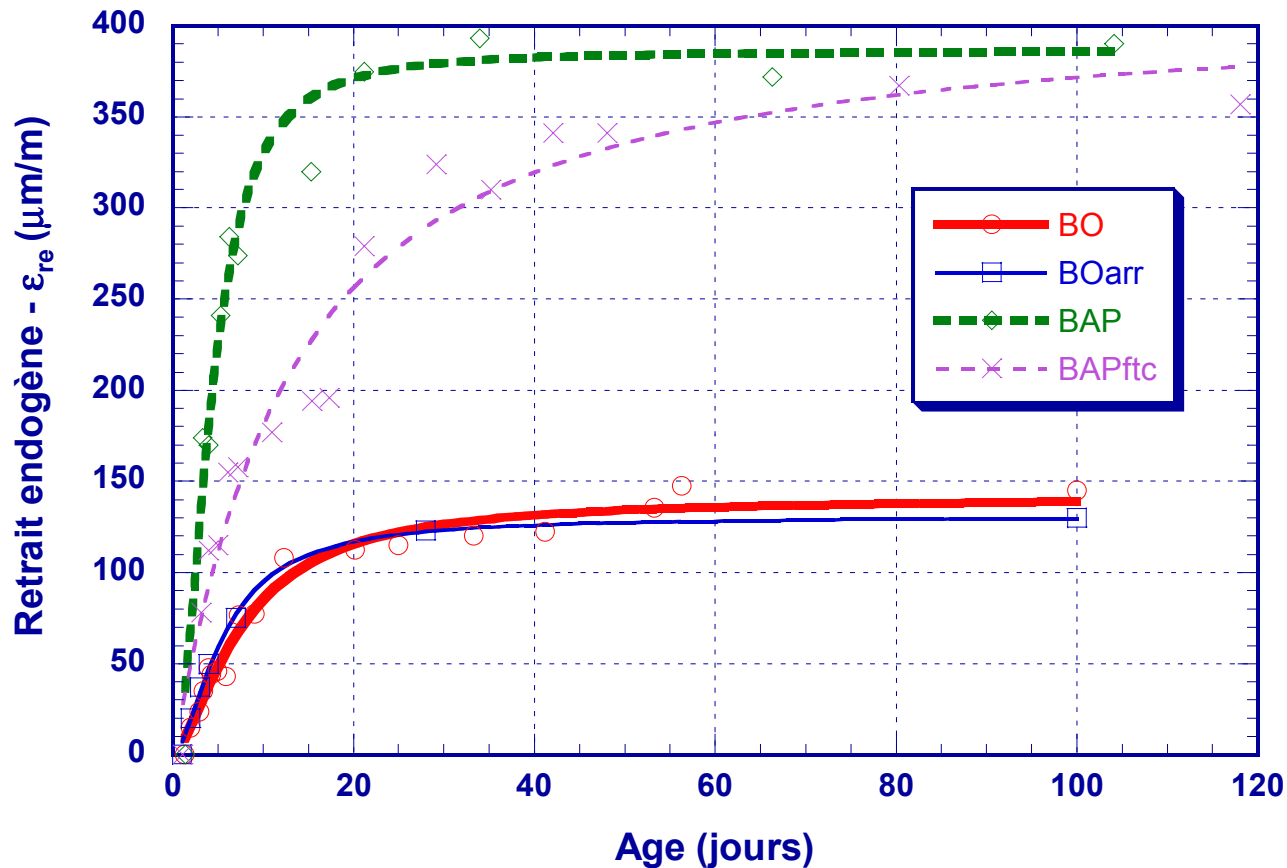
Shrinkage test results, Alberta Concrete Patch Evaluation Program,
Report No. ABTR/RD/RR-87/05

Finition au jet de sable



Caractérisation des matériaux

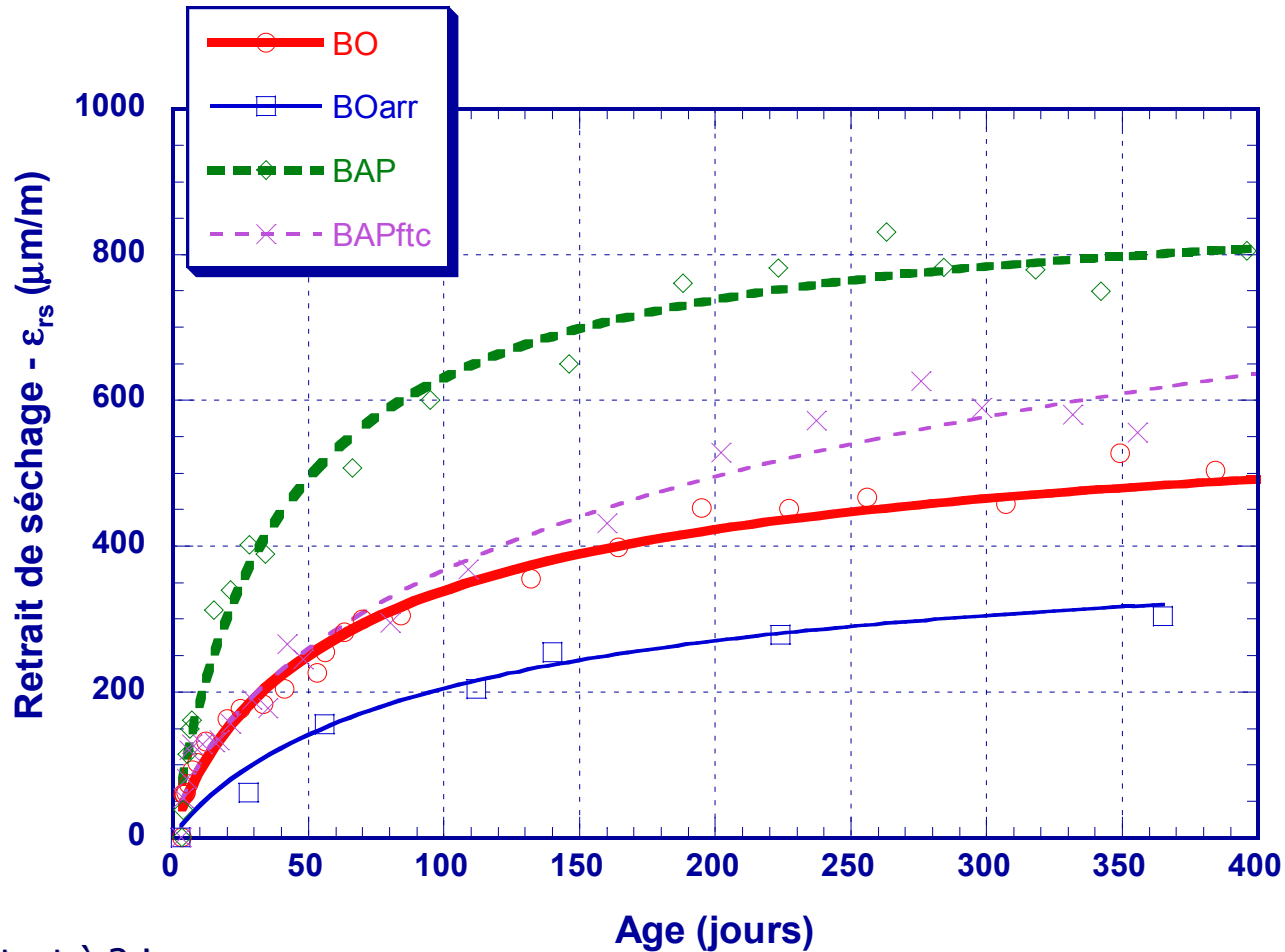
- Des propriétés hydriques différentes



Essai débutant à 24h

Caractérisation des matériaux

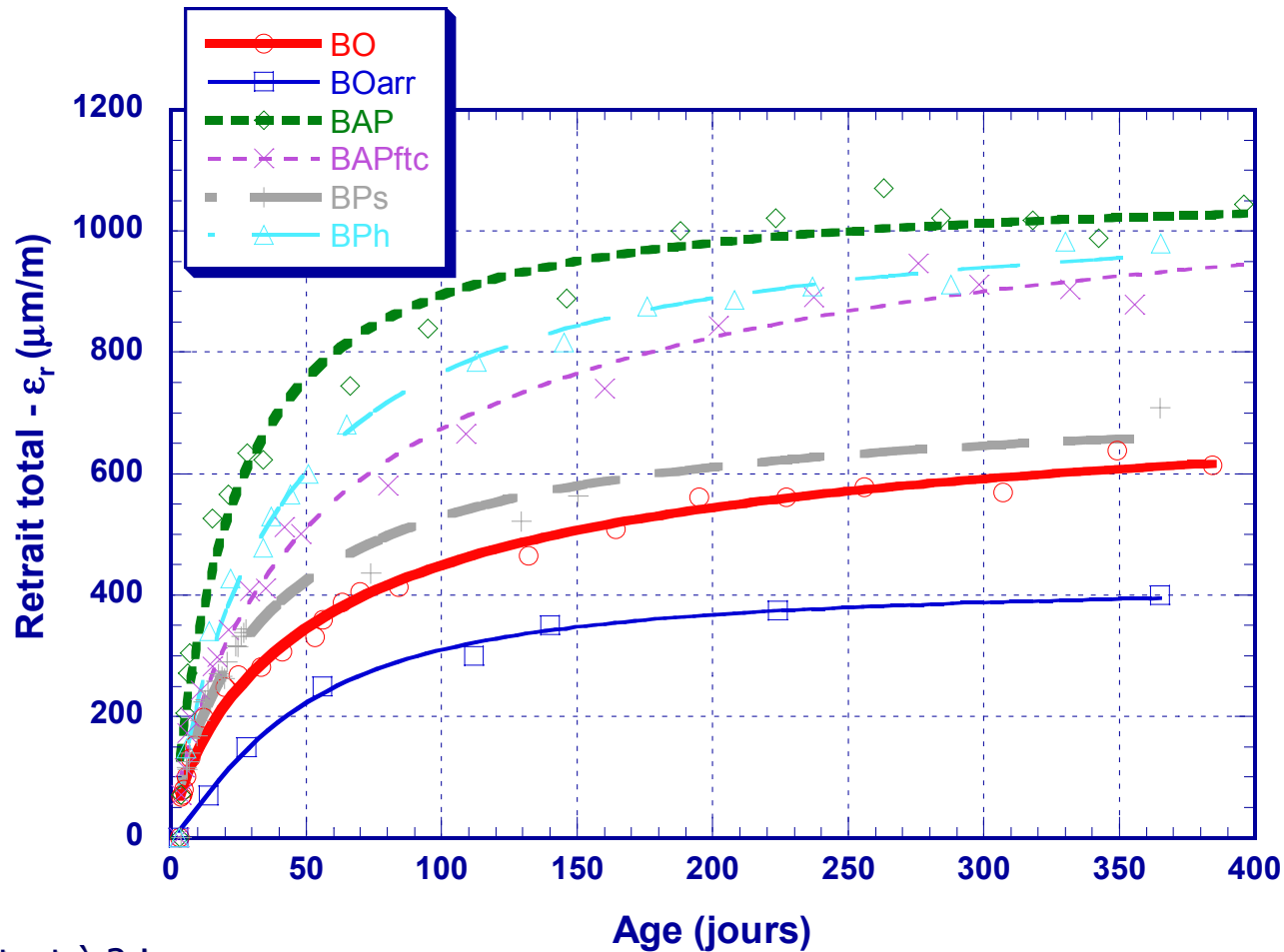
- Des propriétés hydriques différentes



Essai débutant à 3 jours

Caractérisation des matériaux

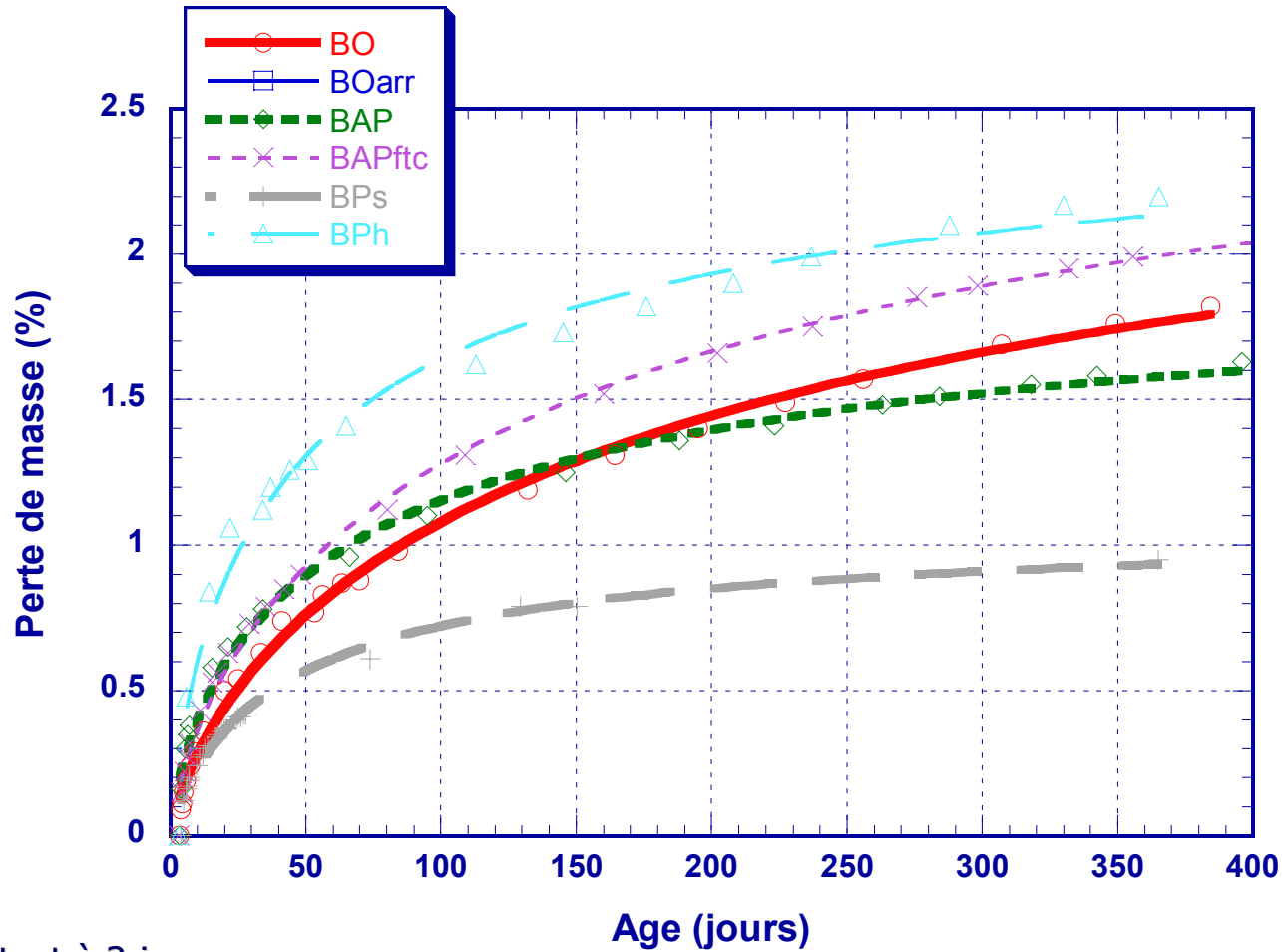
- Des propriétés hydriques différentes



Essai débutant à 3 jours

Caractérisation des matériaux

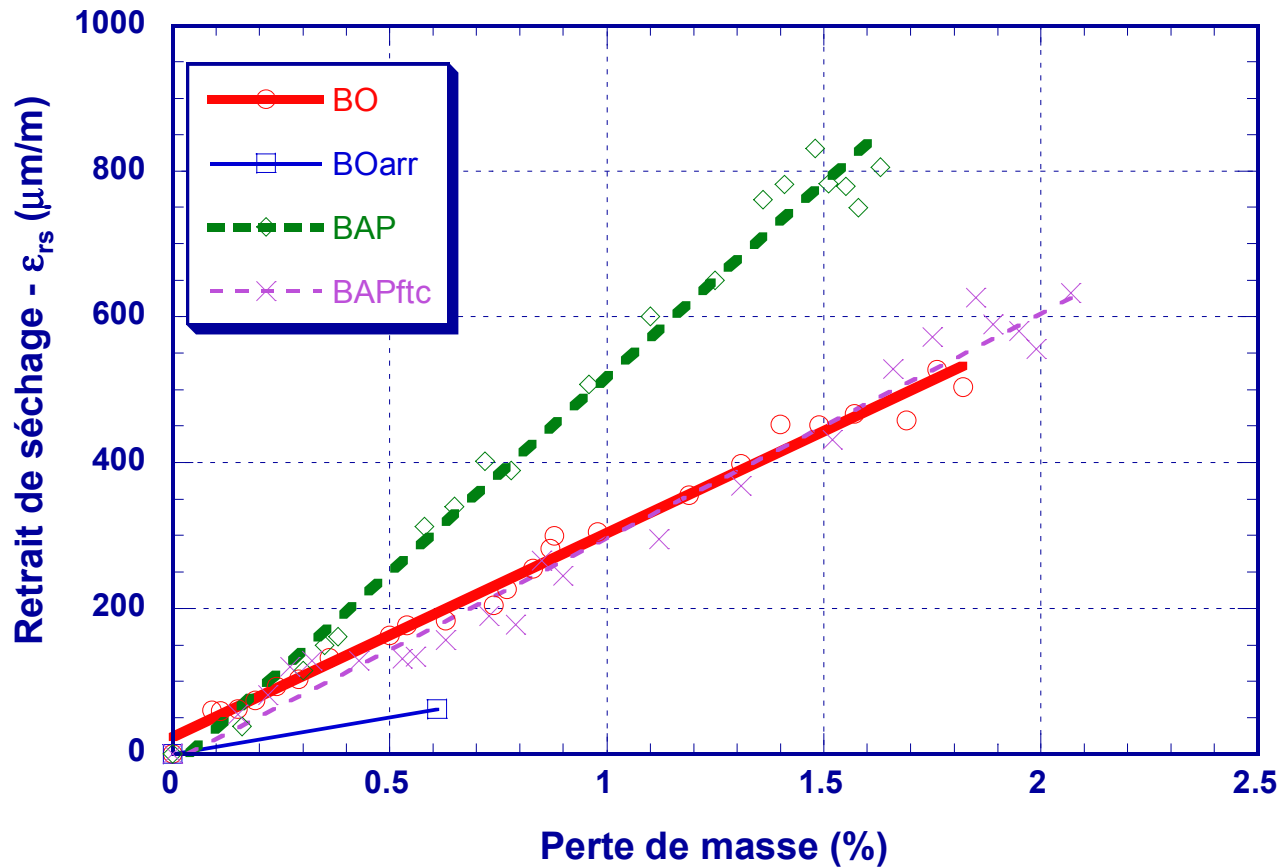
- Des propriétés hydriques différentes



Essai débutant à 3 jours

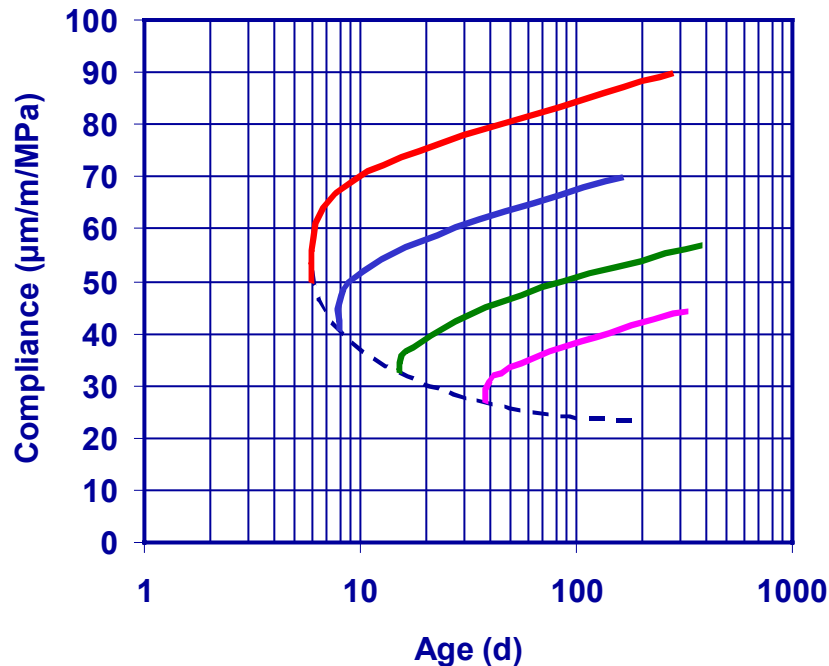
Caractérisation des matériaux

- Des propriétés hydriques différentes



Mécanismes physiques

- Comportement viscoélastique du béton
 - Variation de la déformation sous contrainte constante
 - Forte influence de la teneur en pâte du mélange
 - Proportionnalité avec la contrainte appliquée ($\sigma < 0,5 f_t$)
 - Vieillissement en amplitude



- Cinétique à court terme rapide
7 à 20 jours
- Cinétique à long terme quasi-asymptotique
années

Comparaison avec les codes BA

	Méthode générale		Inertie fictive		Expérimental		
Flèche (mm)	33%	66%	33%	66%	33%	66%	
	4,3	10,3	2,8	5,5	4,5	11	Court terme
	7,5	16,8	8,2	14,2	7,9	13,5	Long terme

	ACI 224 ou CEB/FIB		Expérimental		
Fissure (μm)	33%	66%	33%	66%	
	160	320	75	125	Court terme
	260	415	125	150	Long terme

Calcul du coefficient de restrainte μ



- Hypothèses :
 - Élasticité
 - Diagramme de retrait linéaire
 - Interface parfaite

