
LES FISSURES DU BÉTON

COMMENT IDENTIFIER LEURS ORIGINES ?

COMMENT EN LIMITER LES OUVERTURES ?

Le Panthéon (Rome) : une durée de vie supérieure à 2000 ans !

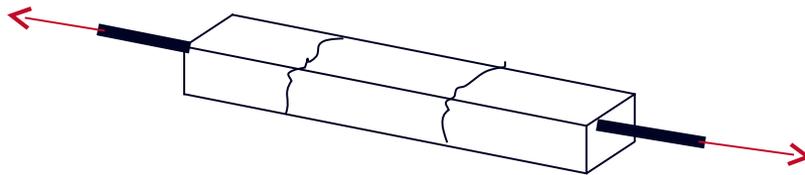


Sommaire

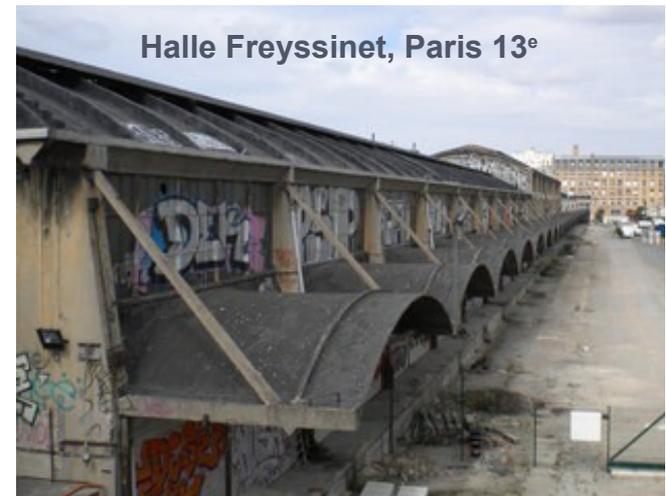
- **Le Béton Armé : des fissures inévitables, mais contrôlables**
 - La poutre en **flexion** : des fissures visibles, mais d'ouverture contrôlée
 - La **peau** du béton est **toujours fissurée** (hormis celle des BHP et BFUP)
 - Une amorce de fissure dans tout **angle rentrant**
- **L'ouverture, paramètre critique, et son facteur de 1^{er} ordre**
 - Pourquoi l'**ouverture de la fissure** est le paramètre clé de la durabilité
 - Pourquoi le retrait du béton est un facteur du second ordre
- **Les outils d'une ingénierie de la durabilité**
 - Comment identifier l'**origine** d'une fissure *in situ* ?
 - Comment **limiter les ouvertures** : un calcul en deux étapes
 - Des **règles constructives** à réactiver et à revisiter
 - Généraliser l'approche **probabiliste**
 - Peut-on spécifier la qualité **esthétique** d'un parement ?

Les fissures de fonctionnement du BA

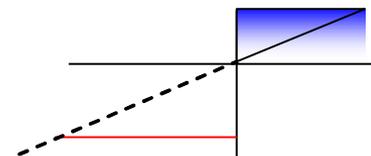
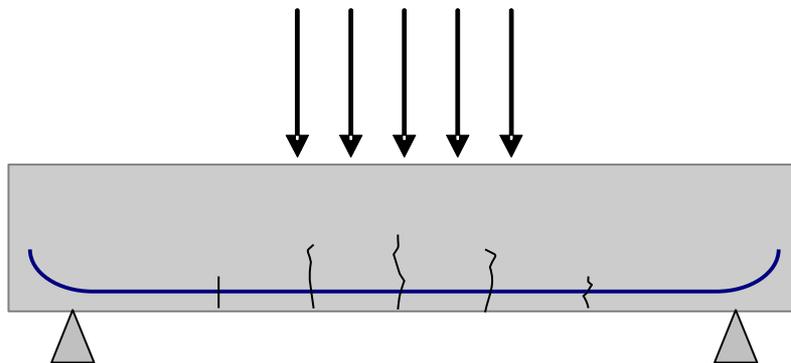
Le tirant BA en traction : des fissures tous les $1,5 \times L_a$ (L_a = longueur d'ancrage)



$d = 30 \text{ à } 60 \text{ cm}$



La poutre BA en flexion : des fissures verticales dans la zone tendue :



partie comprimée
fibre neutre
partie en traction

Corrosion des armatures : porosité ou fissuration ?

Un siècle d'ouvrages en BA montre que :

- La **corrosion** de l'acier résulte toujours d'une modification du pH (par carbonatation, lixiviation ou pénétration des chlorures)
- Un béton **poreux** carbonate rapidement et en profondeur
- La carbonatation d'un béton peu poreux **ferme** progressivement la porosité
- Les fissures **inférieures à 0,3 mm** ne modifient pas le processus de carbonatation



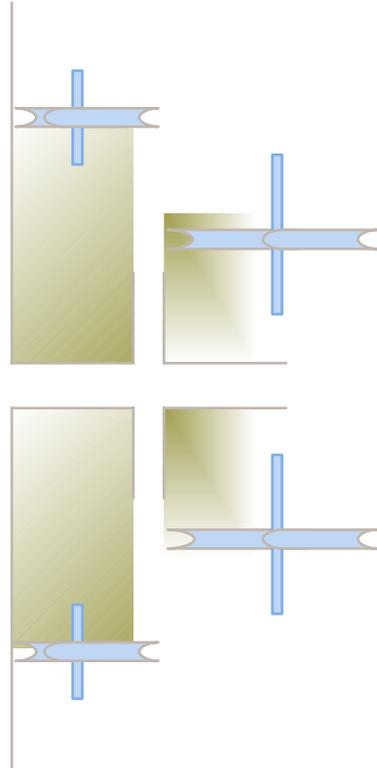
Un lien scientifique avec la durabilité :

la dissymétrie des mouvements d'eau entre sorption et désorption

SORPTION :
(l'humidité augmente ou
la température diminue) :



CONDENSATION
en surface



Un lien scientifique avec la durabilité :

la dissymétrie des mouvements d'eau entre sorption et désorption

SORPTION :
(l'humidité augmente ou
la température diminue) :



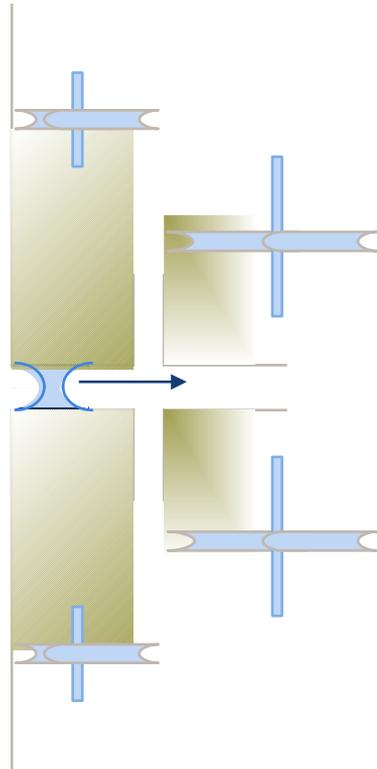
CONDENSATION
en surface



FORCES CAPILLAIRES



déplacement vers
les pores les plus fins



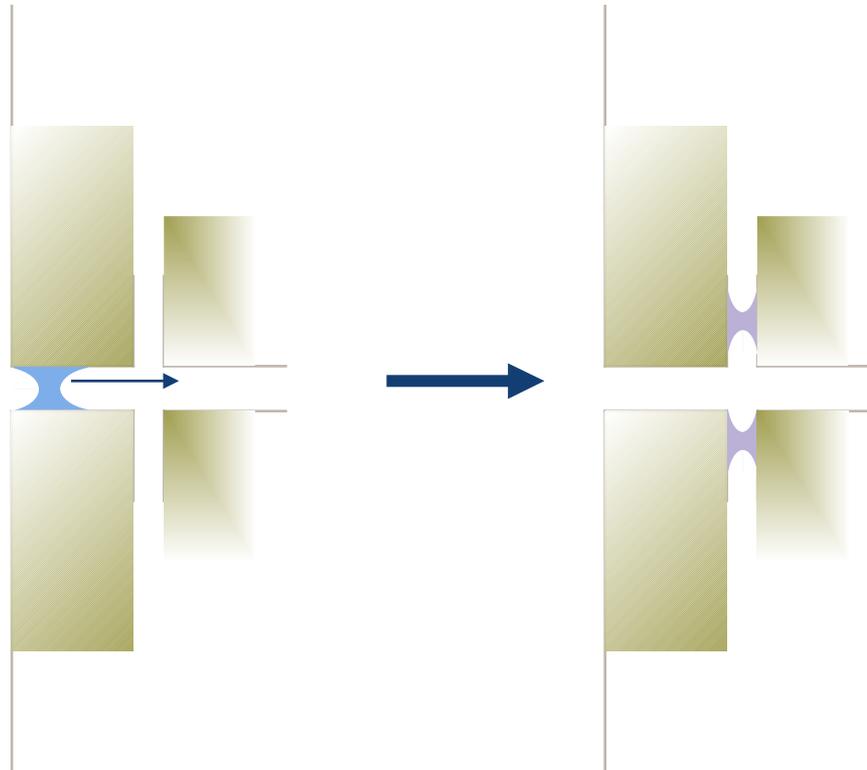
Un lien scientifique avec la durabilité :

la dissymétrie des mouvements d'eau entre sorption et désorption

SORPTION :
(l'humidité augmente ou
la température diminue) :

**CONDENSATION
en surface
+
FORCES CAPILLAIRES
=
déplacement vers
les pores les plus fins**

**L'eau LIQUIDE entraîne
graisses et particules**



Un lien scientifique avec la durabilité :

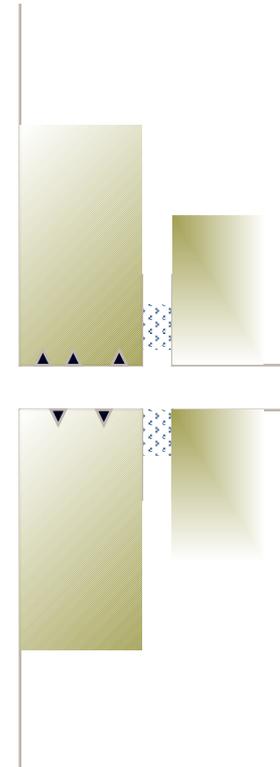
la dissymétrie des mouvements d'eau entre sorption et désorption

DESORPTION :
(l'humidité baisse ou
la température monte) :

EVAPORATION
vers la surface
=
Transport uniquement
en phase gazeuse

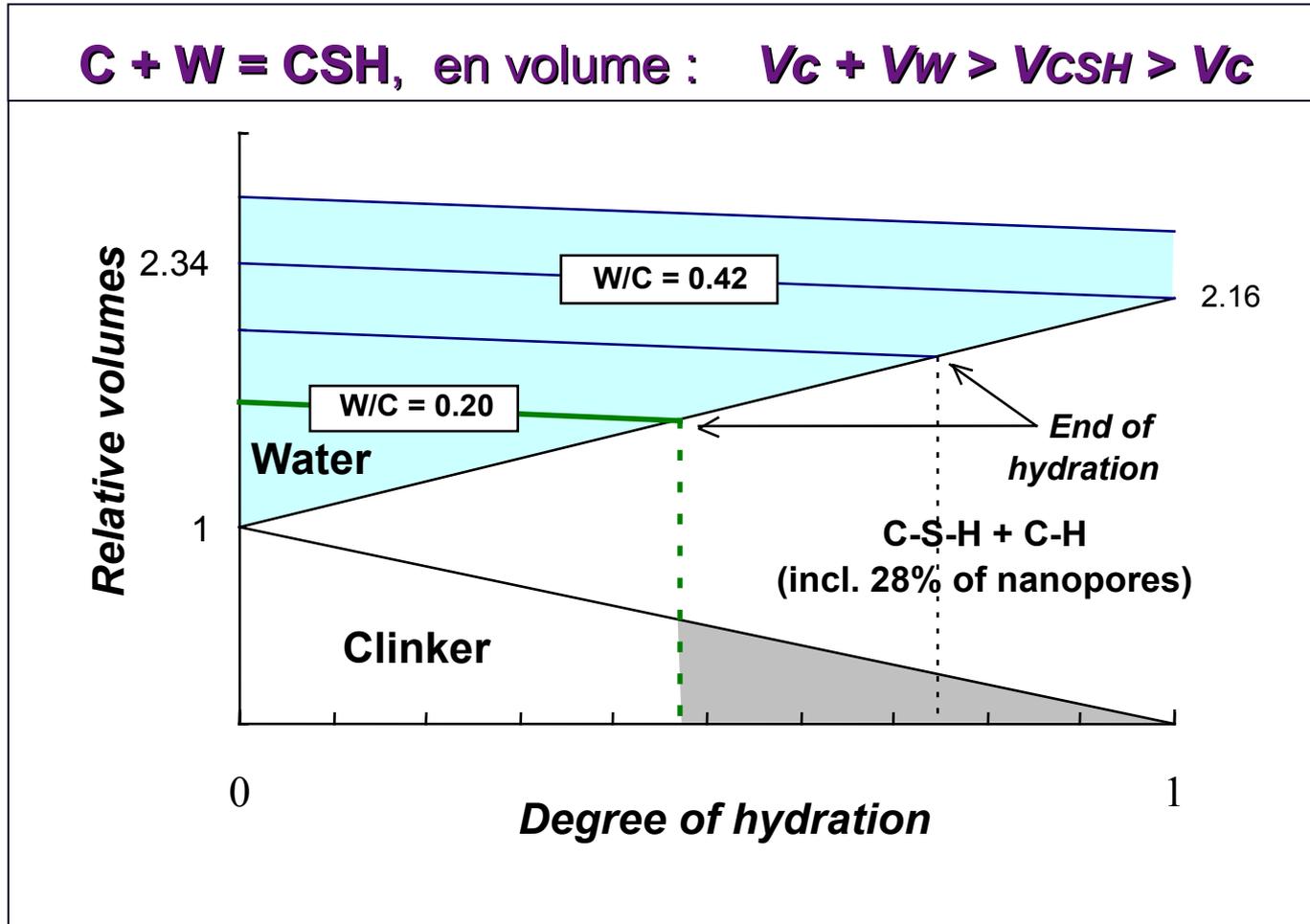
Aucun déplacement de
graisses ni de particules

Aucun déplacement de
chaux vers la surface



Le bilan volumique de l'hydratation :

$$C + W = CSH, \text{ en volume : } V_c + V_w > V_{CSH} > V_c$$

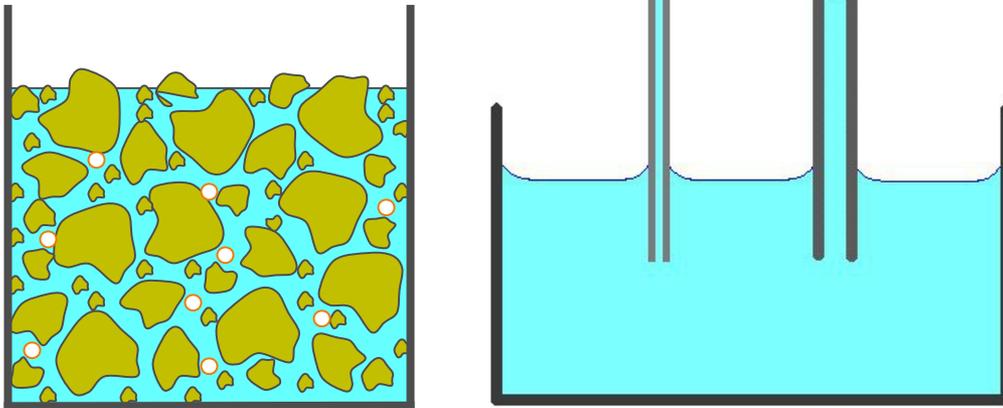


P. ACKER, "Micromechanical analysis of creep and shrinkage mechanisms", in **Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other quasi-brittle Materials**, F.-J. Ulm, Z.P. Bazant, F.H. Wittmann eds., Elsevier, Amsterdam, p.15-25, 2001

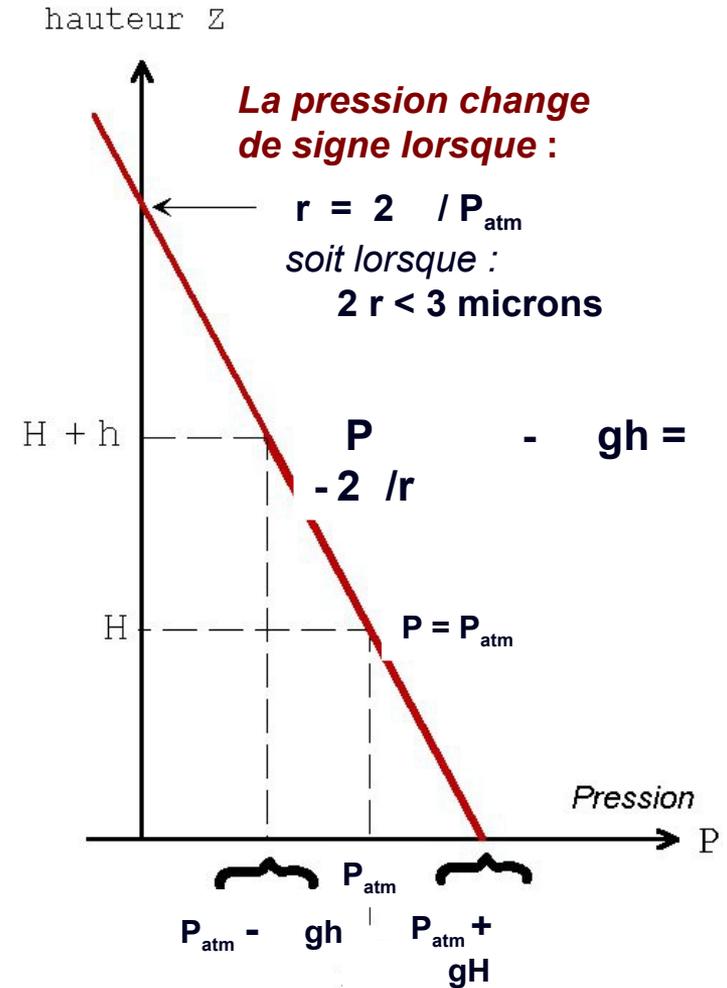
Calcul des bilans volumiques pour différents types de bétons

		Ordinary concrete	High-strength concrete	BFUP
A water-cement ratio		0.65	0.38	0.19
B initial cement content (kg/m ³)		300	475	720
C initial air content (<i>common value</i>)		20	20	30
D fraction of clinker consumed		0.9	0.8	0.44
E initial cement volume (l/m ³)	B / 3.15	95	151	229
F initial water content (kg/m ³ or l/m ³)	A × B	195	181	137
G residual weight of clinker	B (1-D)	30	95	403
H volume of clinker residues	G / 3.15	10	30	128
J consumed weight of clinker	B - G	270	380	317
K volume of consumed clinker	E - H	86	121	101
L consumed water	K × 1.34	115	162	135
M final weight of C·S·H	J + L	385	542	452
N final volume of C·S·H	K × 2.16	185	261	217
P final free water volume	F - L	80	19	2
R increase of gas volume	K × 0.18	15	22	18
S final gas volume	C + R	35	42	48
T final C·S·H pore volume	N × 0.28	52	73	61
U final porosity (l/m ³ or ‰)	P + S + T	167	134	111
V final degree of saturation	1 - S / U	0.79	0.69	0.57
W filling fraction of capillary pores	P / (P+S)	0.69	0.31	0.04

Séchage et *retrait plastique* : l'effet des Pressions capillaires



L'évaporation crée des ménisques en surface et une dépression capillaire qui draine l'eau sur une certaine profondeur (de quelques cm à quelques dm)



Humidité relative et pression capillaire (donc retrait) sont liées par des équations thermodynamiques

			Ordinary concrete	High-strength concrete	BFUP
Internal relative humidity	% RH	h	98	92	75
Pressure in liquid water	MPa	$P_w = R.T.\ln(h)/e_w$	2.73	11.3	38.9
Radius of water meniscii	nm	$r_w = 2 \sigma_w/P_w$	53	13	3.7
Mercury pressure	MPa	$P_{Hg} = 2 \sigma_{Hg}/r_{Hg}$	18	73	(253)
Conventional size of this pore	nm	$d = 2r_{Hg}/\cos \theta_{Hg}$	44	10.5	3

P. ACKER, "Swelling, shrinkage and creep: a mechanical approach to cement hydration", Concrete Science & Engineering, Vol.37, p.237-243, May 2004.

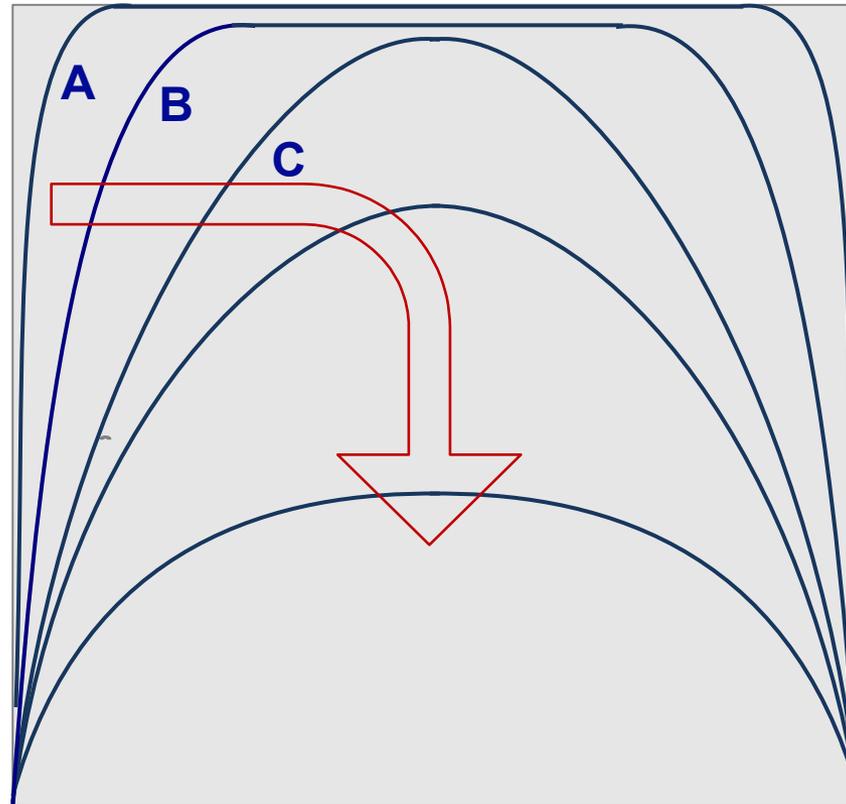
Cinétique de séchage :

un processus lent, en deux phases, invariant en T/L^2

Phase A-B-C :

un effet de surface

- 1 cm à 5 jours
- 2 cm à 3 semaines
- 4 cm à 3 mois
- 8 cm à 1 an
-



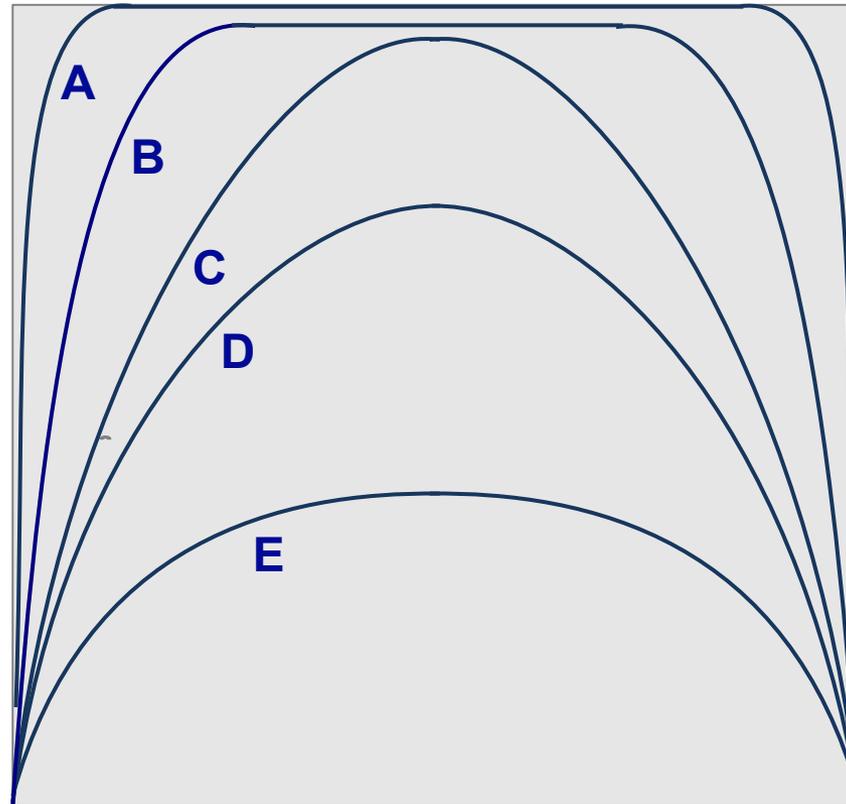
R. MENSI, P. ACKER, A. ATTOLOU, "Séchage du béton : analyse et modélisation",
Materials & Structures, Vol.21, n°121, p.3-12, Janvier 1988.

Cinétique de séchage : un processus lent, en deux phases, invariant en T/L^2

Phase A-B-C :

un effet de surface

- 1 cm à 5 jours
- 2 cm à 3 semaines
- 4 cm à 3 mois
- 8 cm à 1 an
-



Phase C-D-E :

ré-équilibre en volume

- 16 cm : 1an → 10 ans
- 32 cm : 4 ans → 40 ans
- 1 m : 40 ans → 400 ans
- etc.

R. MENSI, P. ACKER, A. ATTOLOU, "Séchage du béton : analyse et modélisation",
Materials & Structures, Vol.21, n°121, p.3-12, Janvier 1988.

Barrage des Olivettes : 3 fissures distantes de 90 m !

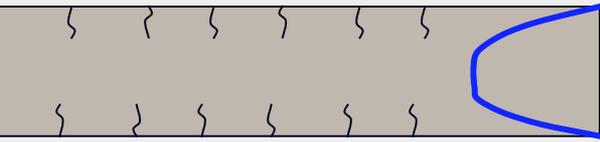


J.M. DURAND, G. DEGOUTTE, P. ROYET, M. JENSEN, “**La technique du béton compacté au rouleau (BCR)**“, Sud Sciences et Technologies, n°1, p.56-62, Janvier 1998.

Distance entre deux fissures : une grandeur très variable !

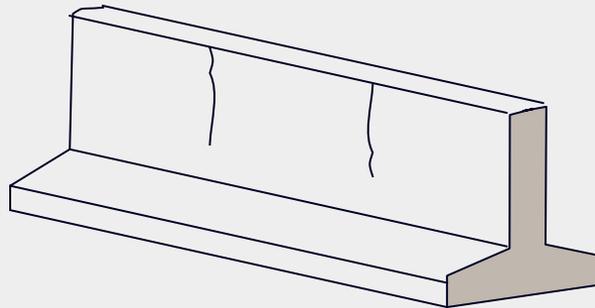
en peau (*faïençage*) :

d prof $< e/4$



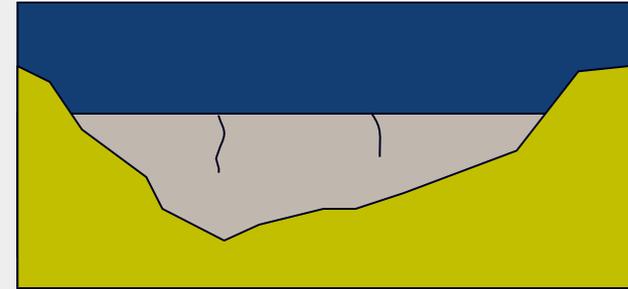
1 à 10 cm

Mur : d 1 à 1,5 h



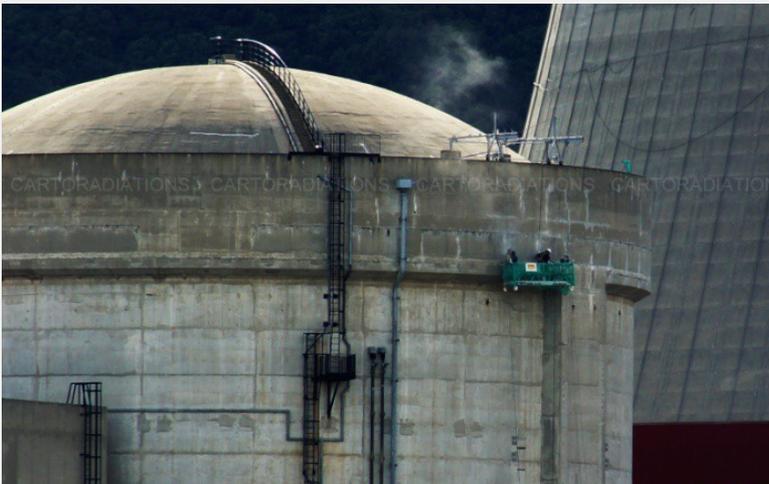
1 à 10 m

Barrages : 2 à 3 h



10 à 100 m

La levée d'un réservoir : d h



$d = 2$ à 3 m

La route en béton : $2 \times L_{fr}$

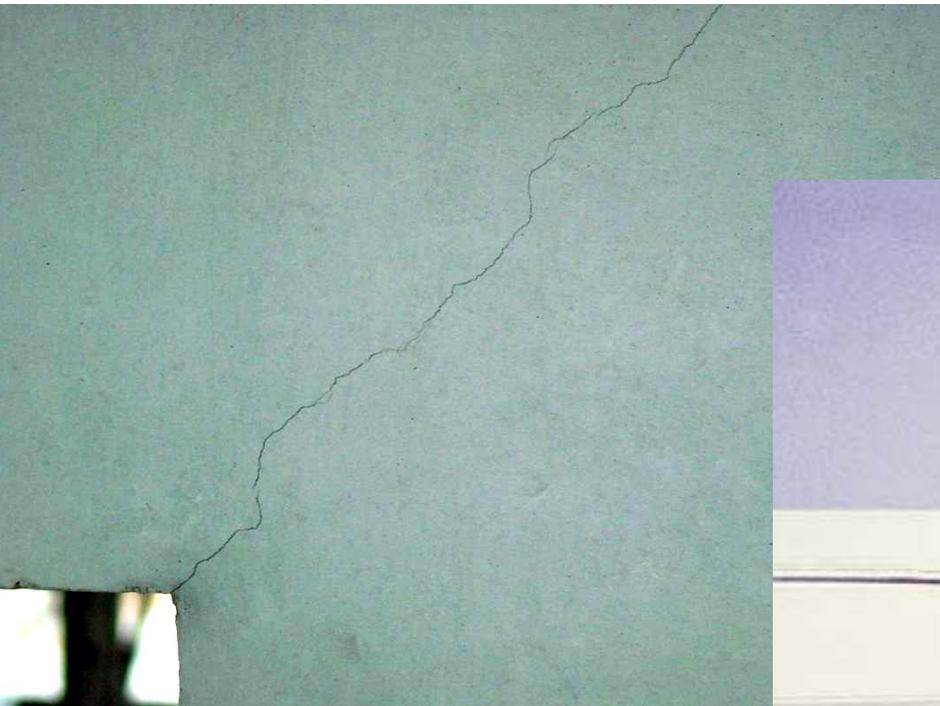
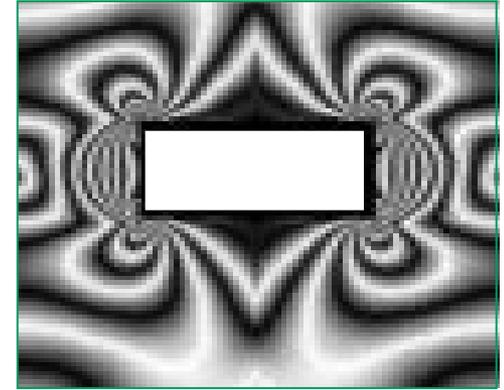
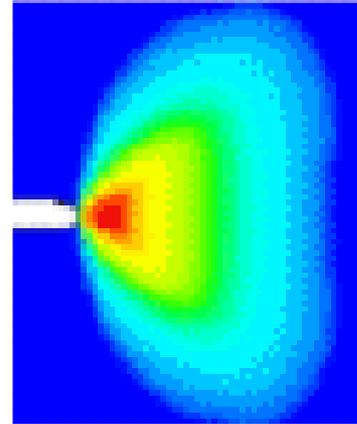


$d = 3$ à 60 m

P. ACKER, G. GUERIN, "Chaussées en béton armé continu : réflexions sur le comportement mécanique et l'origine de la fissuration", Bulletin de Liaison des LPC, n°191, p.3-14, 1994.

Dans tout angle rentrant : une concentration de contrainte !

$$\sigma_{xy} \approx \left(\frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{xy}(\theta)$$



La fissuration des bétons : une large palette de configurations !



Retraits et gonflements ne sont **pas uniformes** (*gradients*) mais sont **isotropes** (non orientés), ce qui génère des fissures de type **faïençage**.

La peau du béton non immergé est toujours fissurée (le seuil de résolution de l'œil humain est de 30 microns).

A retrait égal, l'**ouverture** des fissures est **inversement proportionnelle à la distance entre fissures** successives, qui est voisine de leur **profondeur**

Le ferrailage ne peut pas lutter contre le retrait !

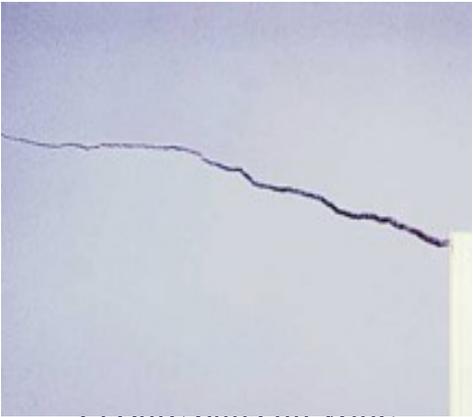
Comment identifier l'origine d'une fissure ?

Certains patterns constituent une signature unique

<i>Exemples de fissures</i>	<i>Observations - conditions</i>	<i>Origine</i>
 <p data-bbox="200 751 600 776">Faiçonnage de petite main</p>	<p data-bbox="678 454 1132 491">La pièce est d'épaisseur faible</p> <p data-bbox="678 576 1161 614">Son épaisseur dépasse un mètre</p>	<p data-bbox="1193 454 1818 529">→ Dessiccation (ces fissures ont ensuite tendance à se refermer)</p> <p data-bbox="1193 582 1818 701">→ Amorçées au jeune âge par la chaleur d'hydratation, ces fissures ont tendance à s'ouvrir, la dessiccation prenant le relais.</p>
 <p data-bbox="200 1236 600 1262">Faiçonnage à large main</p>	<p data-bbox="678 901 1174 1019">La pièce est massive, la surface est accessible au ruissellement des eaux de pluie ou de marnage</p>	<p data-bbox="1193 901 1470 938">Gonflements dus :</p> <p data-bbox="1193 943 1673 981">→ soit à des granulats réactifs,</p> <p data-bbox="1193 986 1688 1062">→ soit à une réaction sulfatique (d'origine interne ou externe),</p> <p data-bbox="1193 1105 1808 1223"><i>à confirmer par l'analyse des sulfates dans les prélèvements de béton et, le cas échéant, de sol.</i></p>

Comment identifier l'origine d'une fissure ?

Confronter les patterns avec les simulations numériques

<i>Exemples de fissures</i>	<i>Observations - conditions</i>	<i>Origine</i>
	<p>Le tracé de la fissure est conforme au tracé d'une fissure de flexion, mais cette fissure est plus ouverte</p>	<p>Excès de chargement ou défaut de ferrailage</p> <p><i>à confirmer par l'identification du chargement excessif ou du défaut et, si nécessaire, de la simulation numérique du champ de contrainte qui en résulte.</i></p>
 <p>Fissure dans un voile</p>	<p>Fissure partant d'un angle, révélant des contraintes de traction dans la direction perpendiculaire</p>	<p>Retrait gêné par des encastremements ou des frottements d'appui.</p> <p><i>ou</i></p> <p>Tassement différentiel (à vérifier par examen des fondations et, si besoin, par un calcul).</p> <p><i>à confirmer par la simulation numérique des champs de contrainte résultant des différentes hypothèses.</i></p>

Comment évaluer l'ouverture d'une fissure ?

Une démarche en deux étapes

*Pas besoin d'une valeur précise, on raisonne en **borne supérieure***

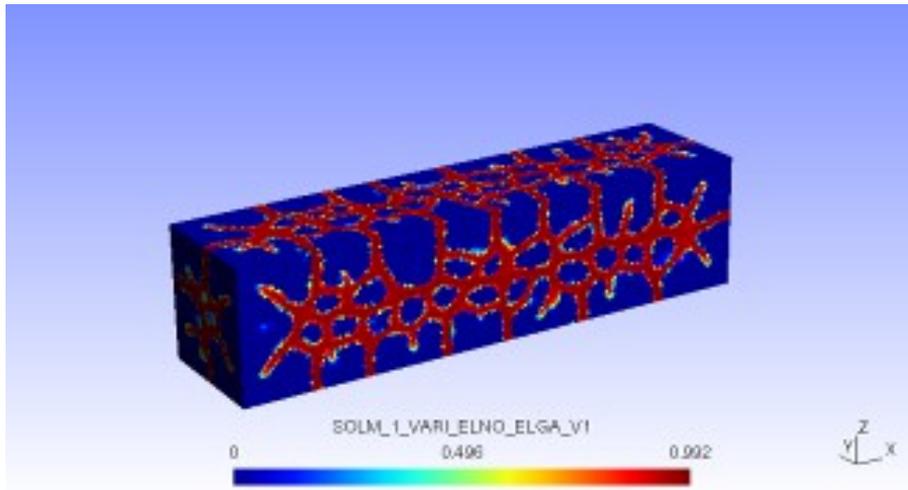
1. On localise la première fissure par le calcul du champ de contrainte :

- Calcul élastique avec retrait imposé et conditions aux limites :
 - Encastremements (sol ou levée précédente),
 - appuis,
 - frottements sur le substratum
- On identifie le trajet de la première fissure, qui part d'une singularité ou d'un axe de symétrie et suit la crête du champ de contrainte
- Pour une structure continue (route, voile sur fondation), on part directement avec une fissure et on cherche la seconde (cf. le tirant BA)

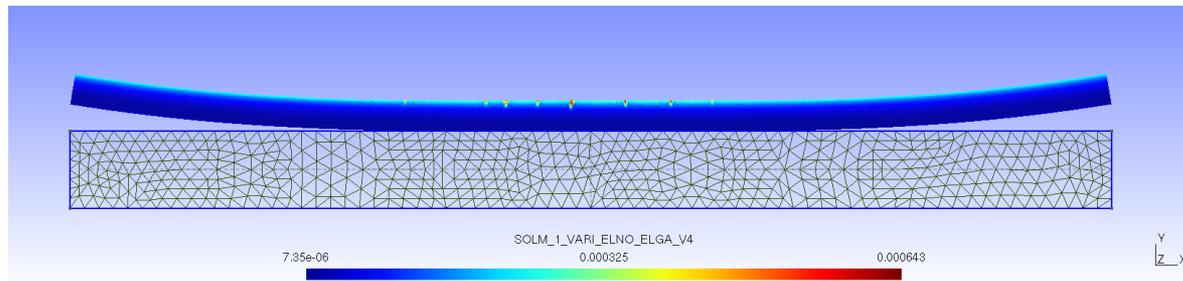
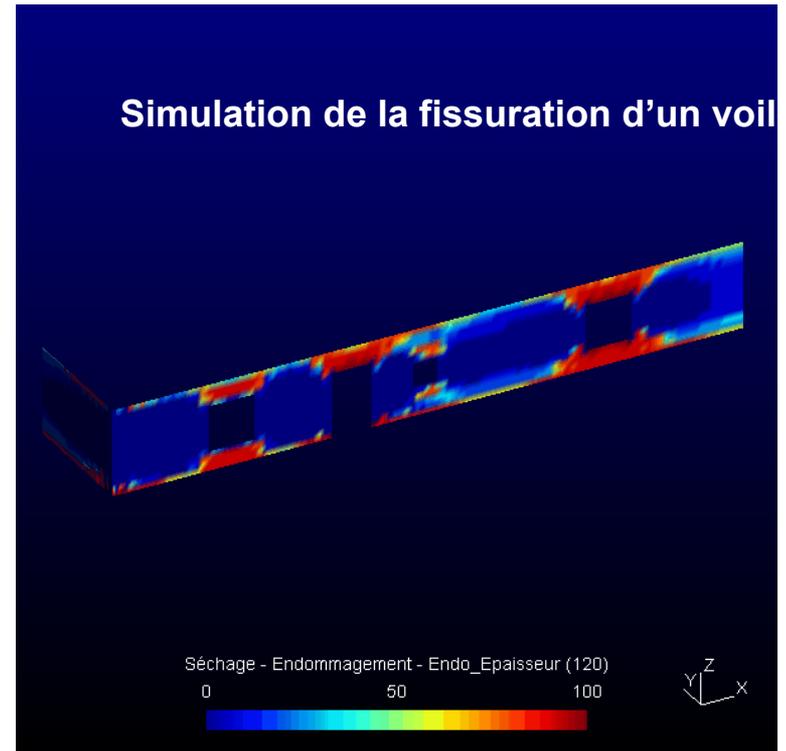
1. On refait le calcul en simulant cette fissure :

- On reproduit dans le maillage cette fissure comme une (ou deux) surface(s) libre(s)
- On refait le même calcul et on obtient une demie-ouverture

Aujourd'hui des logiciels de calcul non élastique sont disponibles



Calcul de la fissuration due au retrait de séchage



Calcul du tuilage d'un dallage ou d'une chape

Quelques règles simples à rappeler ou à réactiver

On ne peut pas supprimer les fissures de retrait, mais on peut en limiter l'ouverture

1. Façades et parements visibles :

- capturer les fissures par des joints ou des modénatures adaptées

1. Murs de soutènement et voiles longs :

- inutile de calculer un ferrailage, il vaut mieux couler par plots alternés et marquer les joints

1. Fissures d'angle dans les bétons de parement et les BAP :

- remplacer les 2 HA6 du DTU par 2 HA10, c'est nettement plus fiable et plus économique que de chercher à formuler un béton à faible retrait !

1. Dallages :

- désolidariser systématiquement les points durs (poteaux, réservations, etc.) par un joint souple et épais (> 10 mm !)
- vérifier la planéité du sol juste avant coulage
- vérifier la désolidarisation des points durs juste avant coulage

Le CHANNEL TUNNEL (1988-90)

1^{er} béton industriel dimensionné en termes de durée de vie



Peut-on évaluer la durée de vie du matériau ?

La nécessité de l'approche probabiliste

On n'a pas besoin d'une valeur précise, seulement d'une borne inférieure

1. On liste tous les mécanismes de dégradation possibles, selon 4 familles :

- Carbonatation, retrait de séchage, pénétration des chlorures = Diffusion (gaz, ions)
- Lixiviation = Diffusion ou Perméation
- RAG, DEF, attaques sulfatiques = Cinétique et potentiels chimiques
- Abrasion, fatigue, fluage = Processus mécaniques
- ... *gel-dégel* ?

1. On montre que le processus de dégradation inclut un processus de diffusion ou de perméation, et que celui-ci en constitue **donc une enveloppe par défaut**.

2. Pour chaque processus de perméation ou de diffusion, **on sélectionne** (et sinon on le **conçoit** !) **un essai dans lequel on peut démontrer que la dégradation va plus vite que dans les conditions de service** (seul cas non résolu : **le gel-dégel** !)

3. On réalise **un nombre d'essais suffisant pour pouvoir déterminer**, au sens de la Théorie des Probabilités, **un fractile** correspondant à 80 ou 90% (*confidence limit*).

4. On calcule, avec cette valeur, le **temps d'atteinte du critère d'état limite de service** :

- Carbonatation ou chlorures : valeur critique au niveau du premier lit d'armature (*covercrete*)
- Lixiviation : teneur critique en chaux ?

Peut-on spécifier la qualité esthétique d'un parement ?

Des grandeurs mesurables, qui peuvent donc être spécifiées dans un contrat

Caméra CCD + Analyse d'image = quantification

- ***Homogénéité des teintes***
- ***Taches, dimensions et nombre, histogramme***
- ***Fissures : linéaire avec seuil***

**Fascicule de documentation P 18-503 " Surfaces et parements de béton
– *Éléments d'identification* "**

Novembre 1989

" *Résultats et recommandations du projet national CALIBÉ* "

Presses de l'ENPC

" *Parements des ouvrages en béton - Etablissement de spécifications pour marchés* "

Publication du LRPC de Clermont-Ferrand - Juin 1992

Remerciements et références

Remerciements à :

- **Frédéric GLUZICKI**, rédac' chef de **Béton[s] le Magazine**
- **Jocelyne JACOB**, *AFGC*
- **Victor DAVIDOVICI**
- **Laurent XERCAVINS**
- **Gilles CHANVILLARD**, *Lafarge*
- **François SEGRETAIN**, *Lafarge*

Références

- **BLM n°46 et 47**, www.acpresse.fr
- **J.M. JANCOVICI**, www.manicore.com

paulacker6@gmail.com