



# Propriétés mécaniques du béton

Matériaux GC BA2

iTEC

Institute of Construction and  
Environmental Technologies

Dr Julien Ston, ing. Sc. Mat. Dipl. EPFL

# Propriétés des matériaux et comportement

## Propriétés des matériaux

- Indépendantes de la quantité
- Mécaniques
  - Résistance
  - Elasticité (module d'Young)
  - Dureté
  - Limite élastique
- Physiques
  - Masse volumique (densité)
  - Capacité thermique
  - Conductivités (thermique, électrique)

## Comportement des matériaux

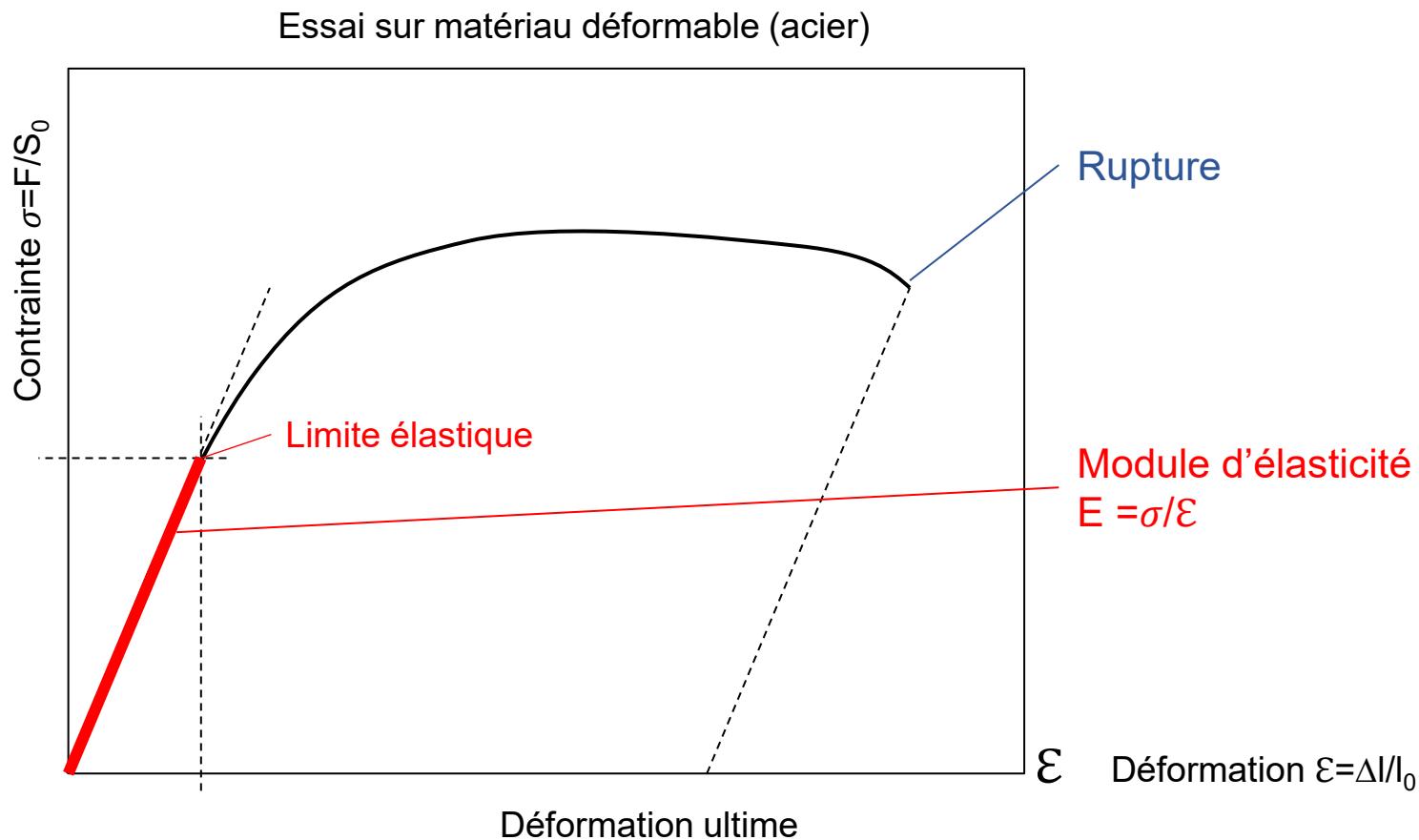
- Dépendent de la géométrie et des sollicitations
- Mécanique
  - Flèche, déformation
  - Fluage
- Physique
  - Poids propre
  - Échauffement
  - Résistance électrique

## La résistance à la compression $f_c$

- Caractéristique mécanique principale exigée pour le béton
- Comme on va le voir, le béton est très mauvais en traction
- C'est pourquoi le béton doit le plus possible travailler en compression dans les structures
- Les armatures sont placées pour récupérer les efforts de flexion et de traction
- Comment se mesure une résistance ?
  - Application d'une force sur une éprouvette standardisée jusqu'à sa rupture, suivant un processus de mise en charge à vitesse de déformation constante



# Essai de résistance



## Graphique contrainte-déformation

- Contrainte  $\sigma = \frac{F}{S_0} \left( \frac{N}{mm^2} = MPa \right)$
- Déformation  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \left( \frac{m}{m}, \frac{mm}{m}, \frac{\mu m}{m} \right)$
- Pente initiale = module élastique  

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (MPa, GPa)$$
- Limite élastique ( $\sigma$  et  $\varepsilon$ )
- Contrainte de rupture

## Résistance à la compression (traction) de quelques matériaux

**Rappel**

50 N/mm<sup>2</sup>

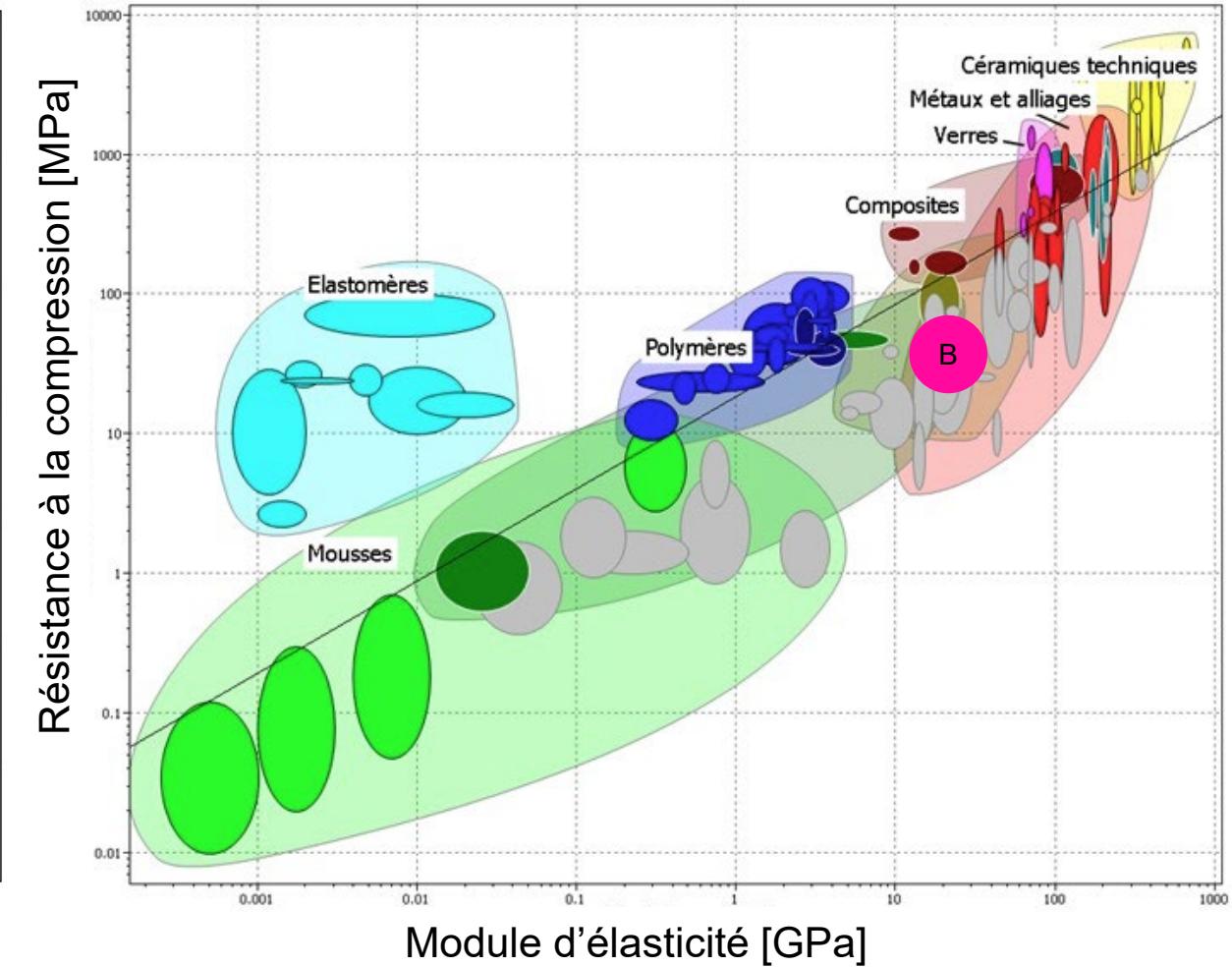
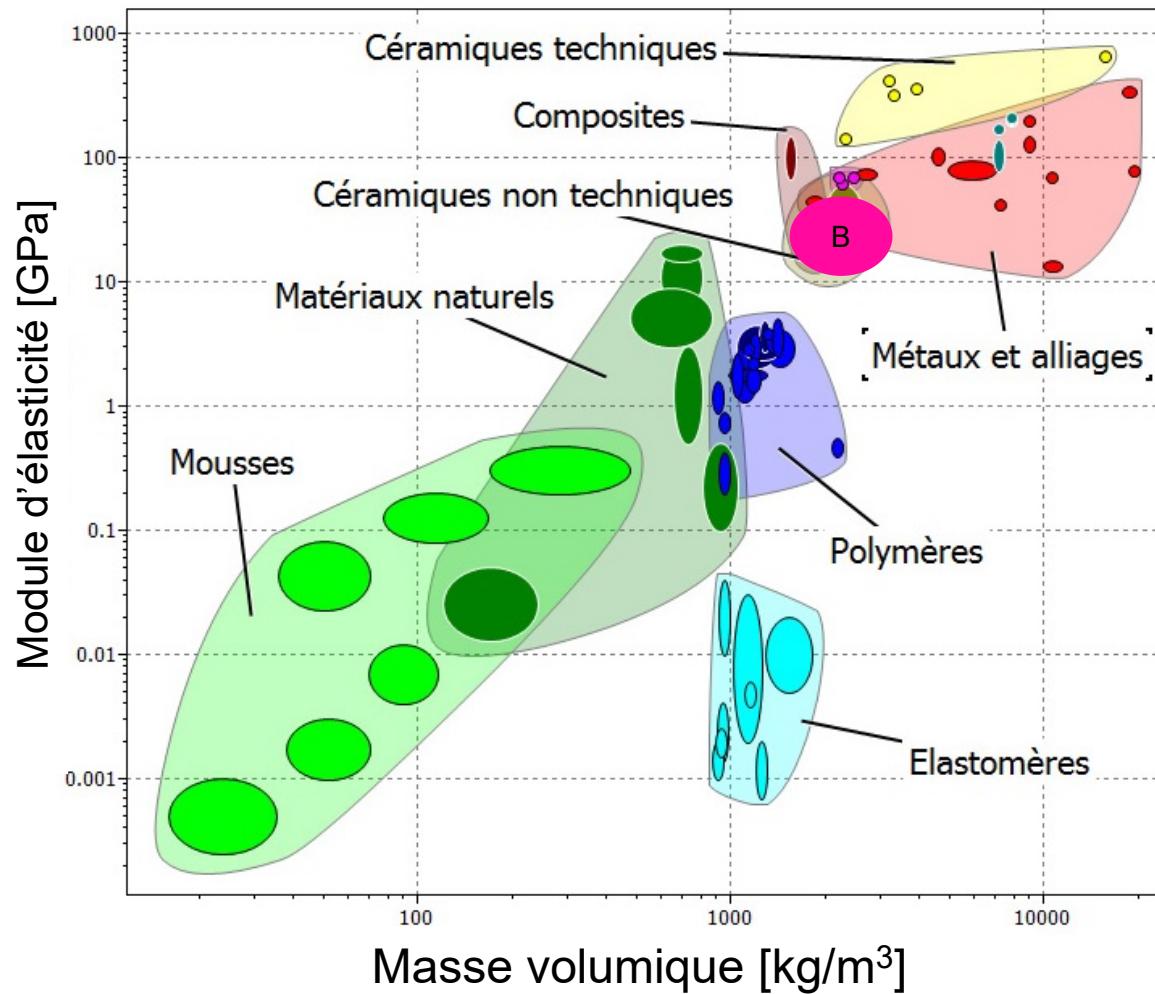
= 50 MPa

≈ 5 kg/mm<sup>2</sup>

= 500 kg/cm<sup>2</sup>

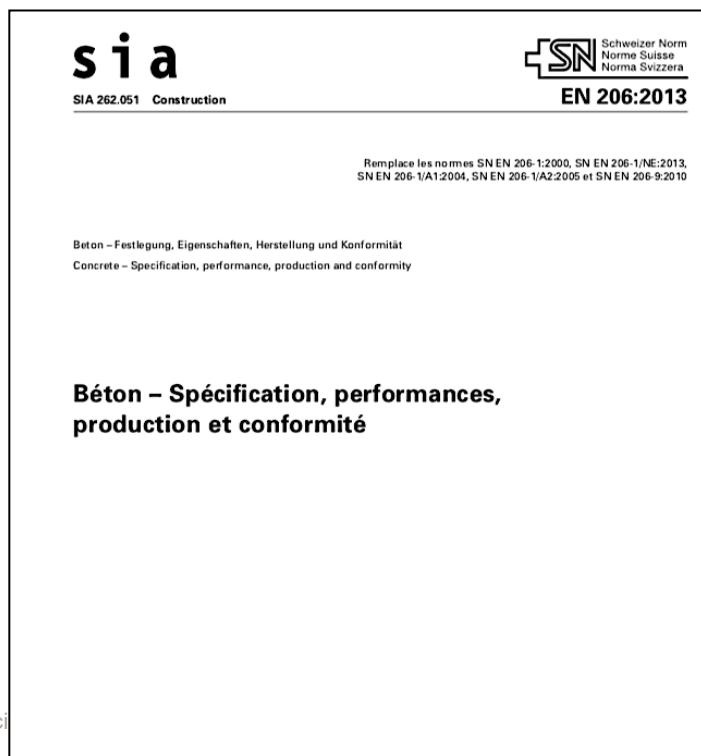
Matériaux	Résistance en MPa ou N/mm <sup>2</sup>
Brique de terre cuite	20 - 30
Bois résineux (sapin) // aux fibres	30 - 50
Bois dur (chêne)	40 - 60
Roche tendre (molasse)	25 - 50
Roche dure (granite)	150 - 200
Béton courant	30 - 60
Béton haute résistance (BHP)	60 - 120
Béton BFUP (béton fibré ultra-performant)	120 – 180
Acier courant	250 - 600
Acier de précontrainte	(1'000 - 2'000)
Fibres de carbone	(2'400 - 3'000)

# Ordres de grandeur dans les différentes classes de matériaux



# Essais normés de résistance à la compression du béton

- En Suisse : les exigences concernant les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons sont définies dans la norme SN EN 206



## NA.4.3.1 Classes de résistance à la compression

Il est recommandé de déterminer la résistance à la compression caractéristique non pas sur des cylindres, mais sur des cubes de 150 mm de longueur de côté.

## B.2 Plan de prélèvement et de contrôle

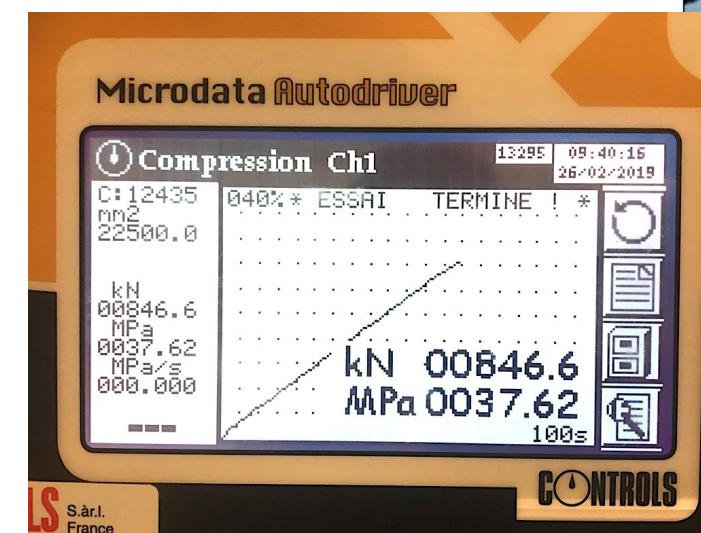
- (4) Sauf convention contraire, le résultat d'essai est la valeur moyenne de trois cubes 150 × 150 × 150 mm confectionnées à partir d'un échantillon de béton frais.
- Cette directive s'applique pour tous les essais de résistance à la compression réalisés sur des éprouvettes confectionnées sur chantier.

## NB.6.2 Bétons de génie civil

- Avec les mélanges d'essai n° 4 à 7 les essais suivants doivent être réalisés:
- Contrôle du béton frais (détermination de la masse volumique du béton frais, mesure de la consistance initiale et 45 min après le gâchage, détermination de la teneur en air)
  - Résistance à la compression sur cube après 2, 7 et 28 jours
  - Essais de durabilité:
    - Perméabilité à l'eau selon SIA 262/1, annexe A
    - Résistance à la carbonatation selon SIA 262/1, annexe I
    - Résistance aux chlorures selon SIA 262/1, annexe B
    - Résistance au gel/dégel en présence de sels de dé verglaçage selon SIA 262/1, annexe C
    - Résistance à la RAG selon SIA 2042.

# Essais normés de résistance à la compression du béton

- **Eprouvette** : cube de 150x150x150 mm
- **Appareillage** : Presse
- **Procédure** :
  - Mesure des dimensions exactes du cube
  - Pesée du cube
  - Préparation des surfaces de contact
  - Application de la charge à **vitesse constante** jusqu'à la rupture



# Classes de résistance à la compression

- Normes SIA 262 et SN EN 206-1

Selon ces normes, on définit la résistance caractéristique  $f_{ck}$  à **28 jours** de cette façon :

p. ex.

Résistance caractéristique sur cylindre	Résistance caractéristique sur cube
---	-------------------------------------

- $f_{ck}$  utilisée pour le dimensionnement
- Cylindre  $\neq$  Cube ?
  - La résistance est un propriété du matériau !

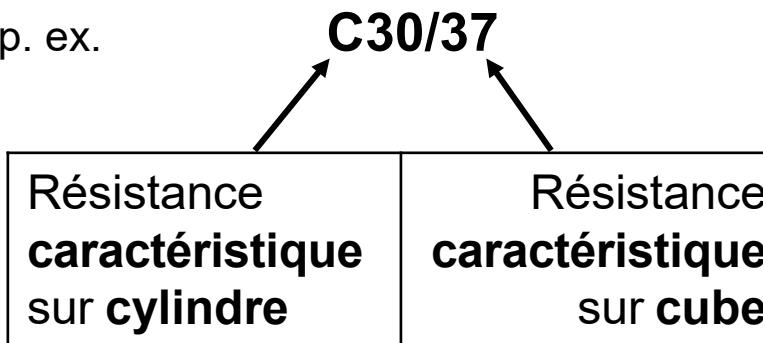
Sorte	Sorte 0 («zéro»)	Sorte A <sup>1)</sup>	Sorte B	Sorte C	Sorte D (T1) <sup>2,3)</sup>	Sorte E (T2) <sup>3)</sup>	Sorte F (T3) <sup>4)</sup>	Sorte G (T4) <sup>4)</sup>
<b>Exigences de base</b>								
Conformité avec cette norme	Béton selon SN EN 206	Béton selon SN EN 206	Béton selon SN EN 206	Béton selon SN EN 206	Béton selon SN EN 206	Béton selon SN EN 206	Béton selon SN EN 206	Béton selon SN EN 206
Classe de résistance à la compression	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
Classe(s) d'exposition (combinaison des classes indiquées)	X0(CH)	XC2(CH)	XC3(CH)	XC4(CH), XF1(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF4(CH)
Dimension maximale nominale du granulat	D <sub>max</sub> 32	D <sub>max</sub> 32	D <sub>max</sub> 32	D <sub>max</sub> 32	D <sub>max</sub> 32	D <sub>max</sub> 32	D <sub>max</sub> 32	D <sub>max</sub> 32
Classe de teneur en chlorures <sup>5)</sup>	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10
Classe de consistance <sup>6)</sup>	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
<b>Exigences supplémentaires pour les classes d'exposition XF2(CH) à XF4(CH)</b>								
Résistance au gel/dégel en présence de sels de dé verglaçage	néant	néant	néant	néant	moyenne	élevée	moyenne	élevée
<b>Exigences supplémentaires (à spécifier selon l'objet)</b>								
Résistance à la RAG	selon chiffre NA.5.3.4.6							
Résistance aux sulfates	néant	néant	néant	selon chiffres NA.5.3.4.9 et NA.5.3.4.10				

# Classes de résistance à la compression

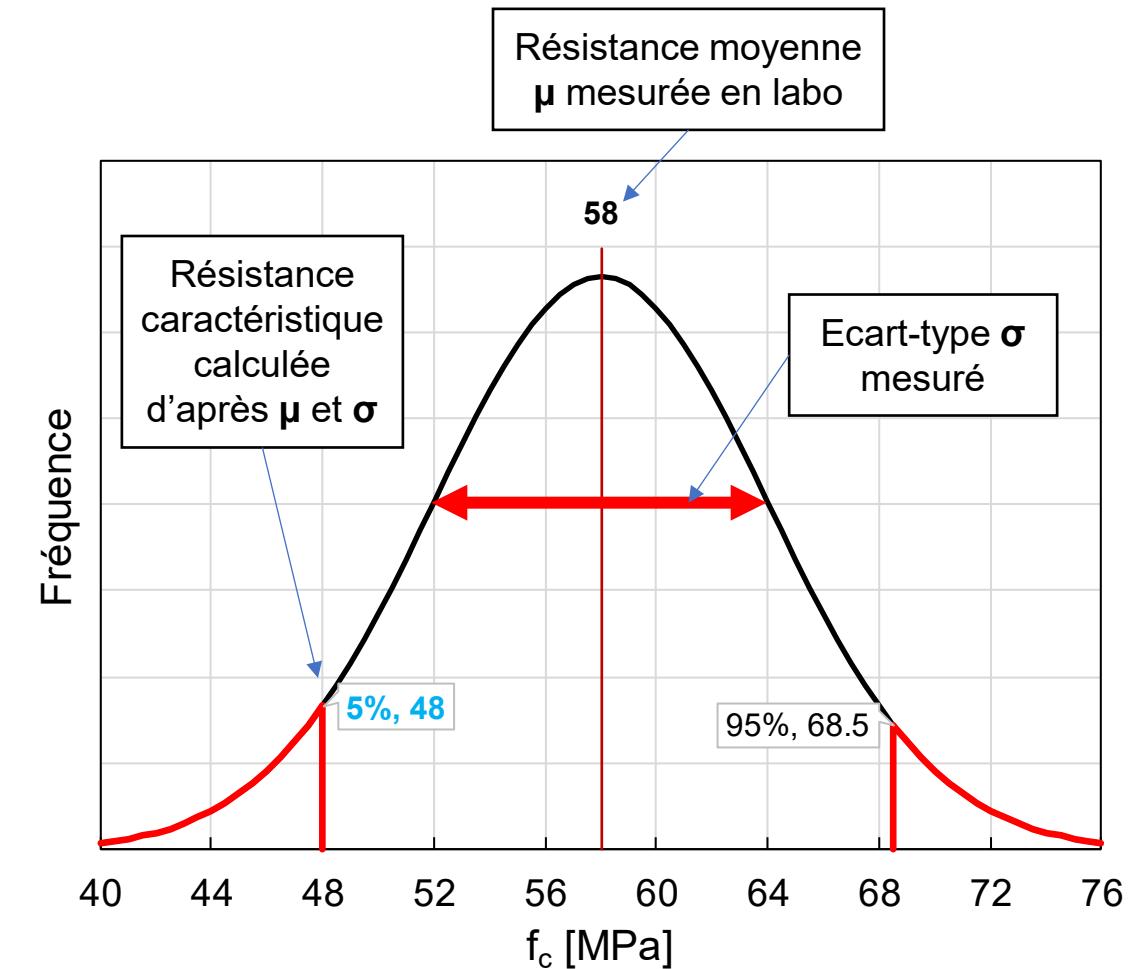
- Normes SIA 262 et SN EN 206-1

Selon ces normes, on définit la résistance caractéristique  $f_{ck}$  à **28 jours** de cette façon :

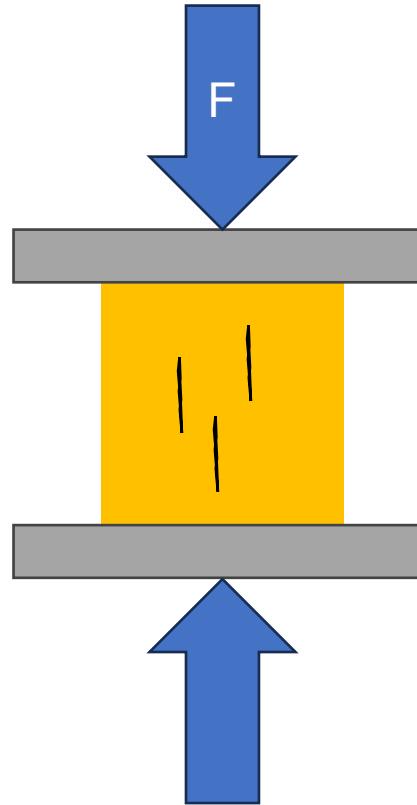
p. ex.



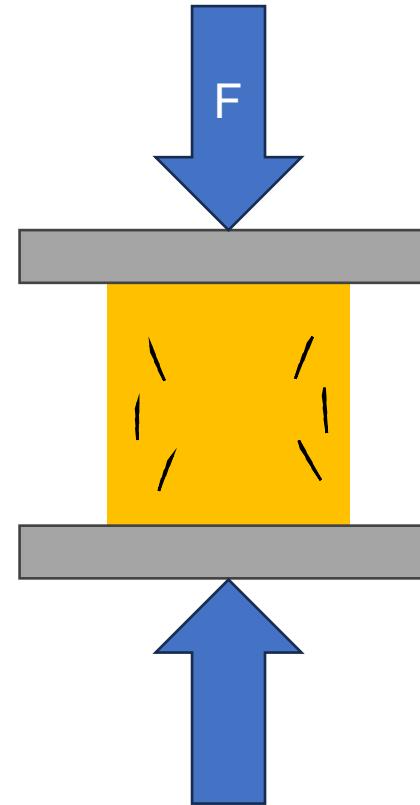
- $f_{ck}$  utilisée pour le dimensionnement
- Cylindre  $\neq$  Cube ?
  - La résistance est un propriété du matériau !



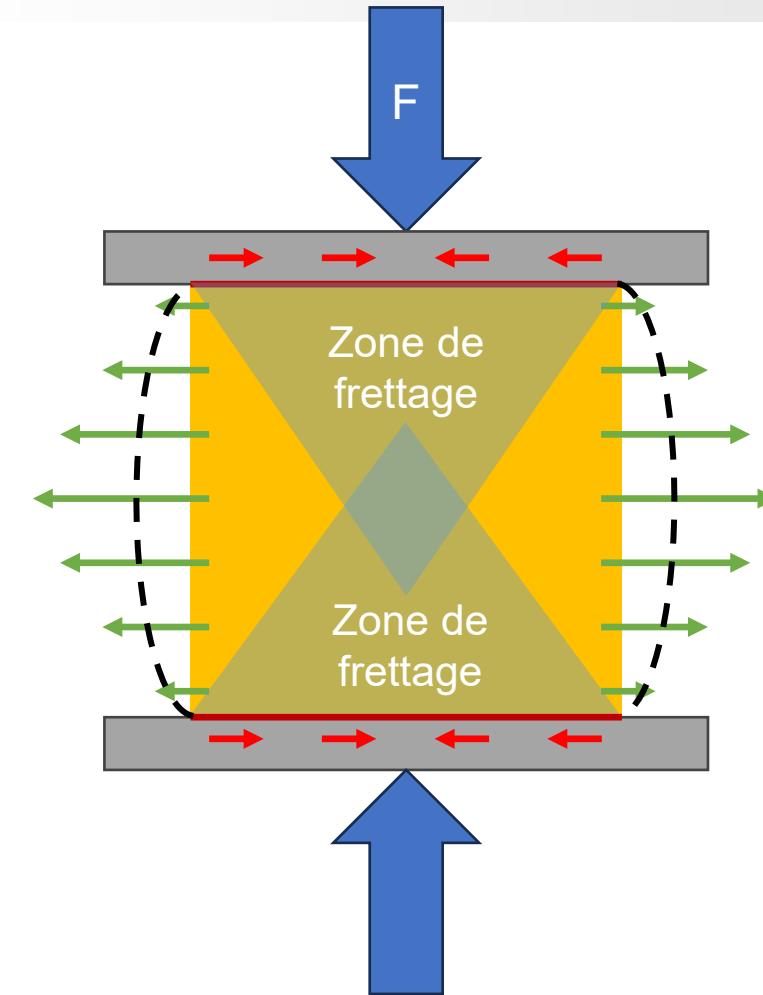
## La rupture en compression



Théorique idéale : aucun frottement, contraintes uniforme, rupture par gonflement latéral

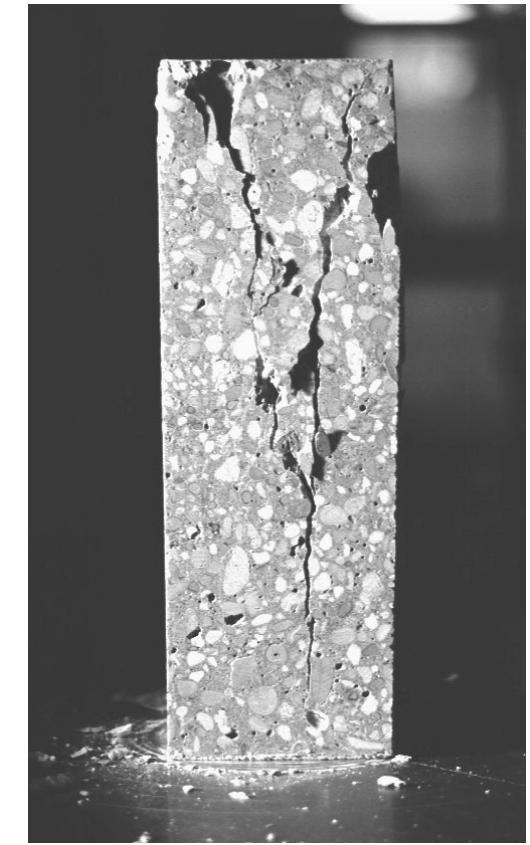
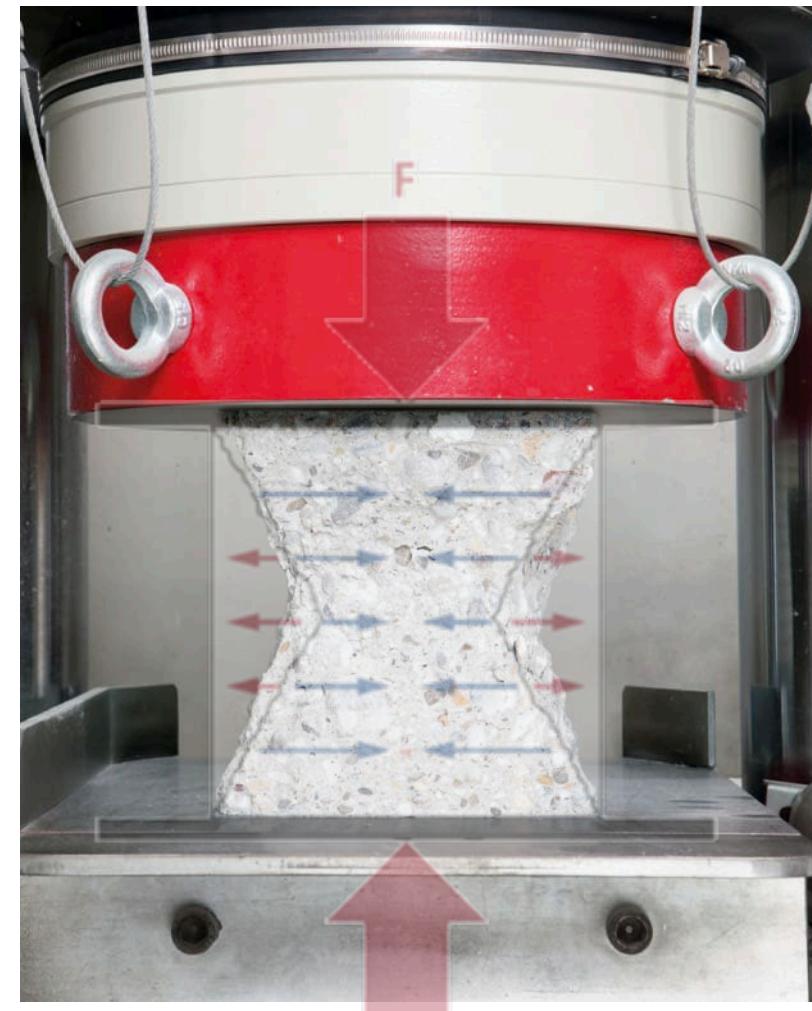
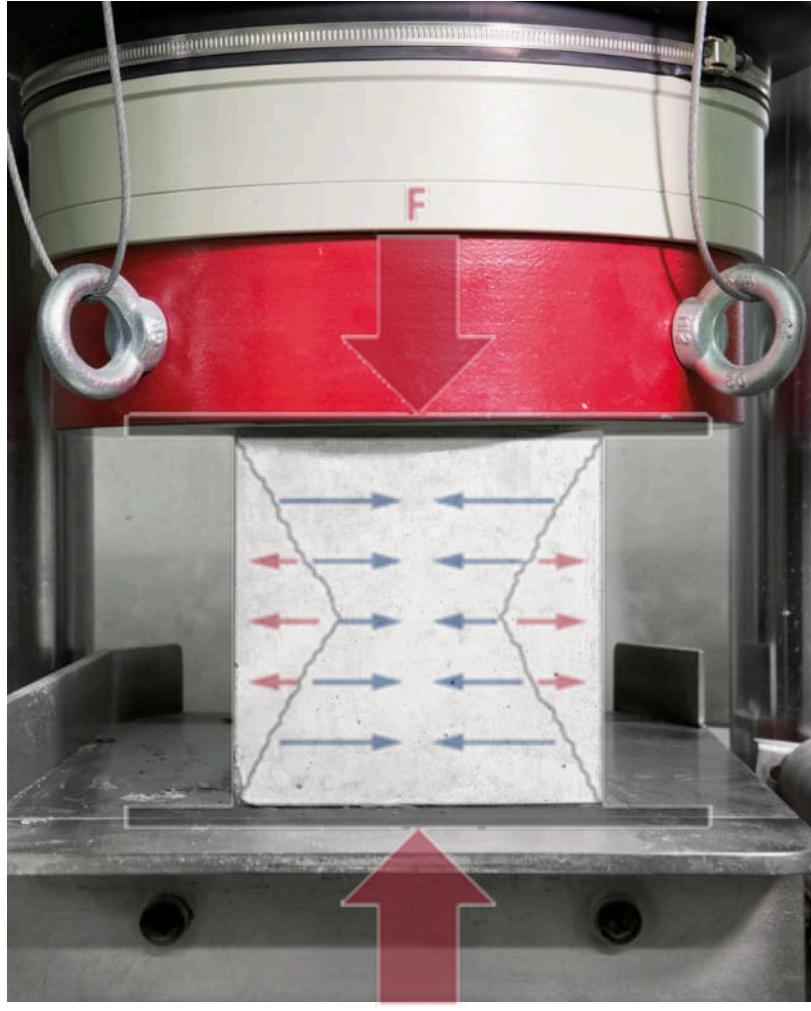


En pratique : frottement contre les plaques, contraintes non-uniformes, rupture par cisaillement

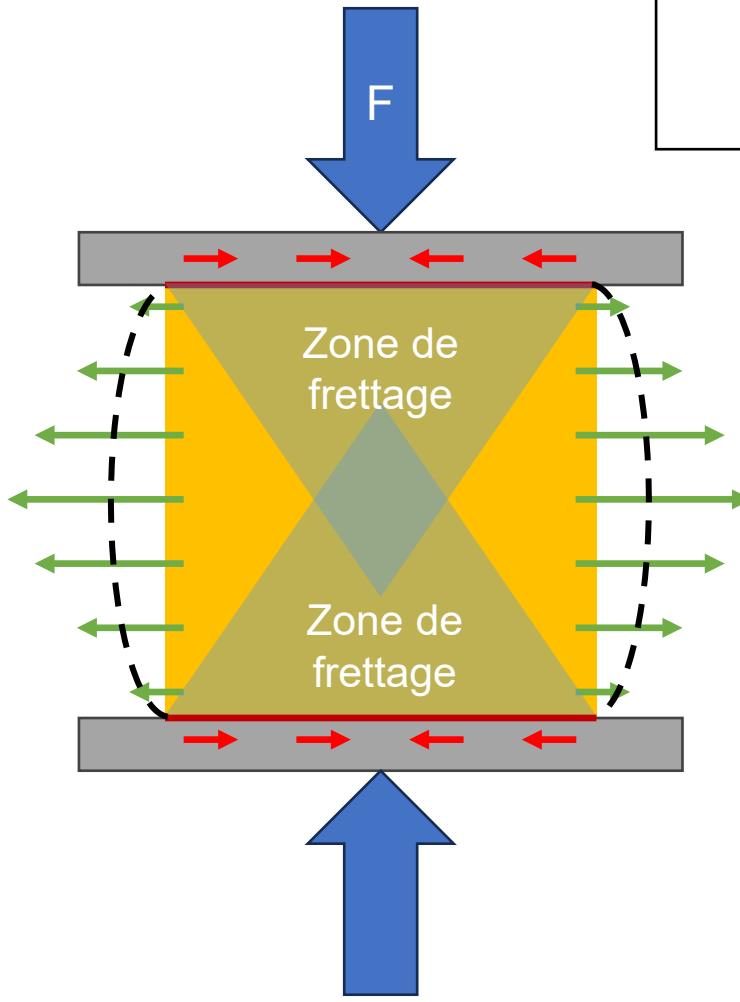


**Frettage** : le frottement contre les plaques retient la déformation latérale de l'échantillon → Déformation en tonneau

## La rupture en compression



## Cube ou cylindre ?



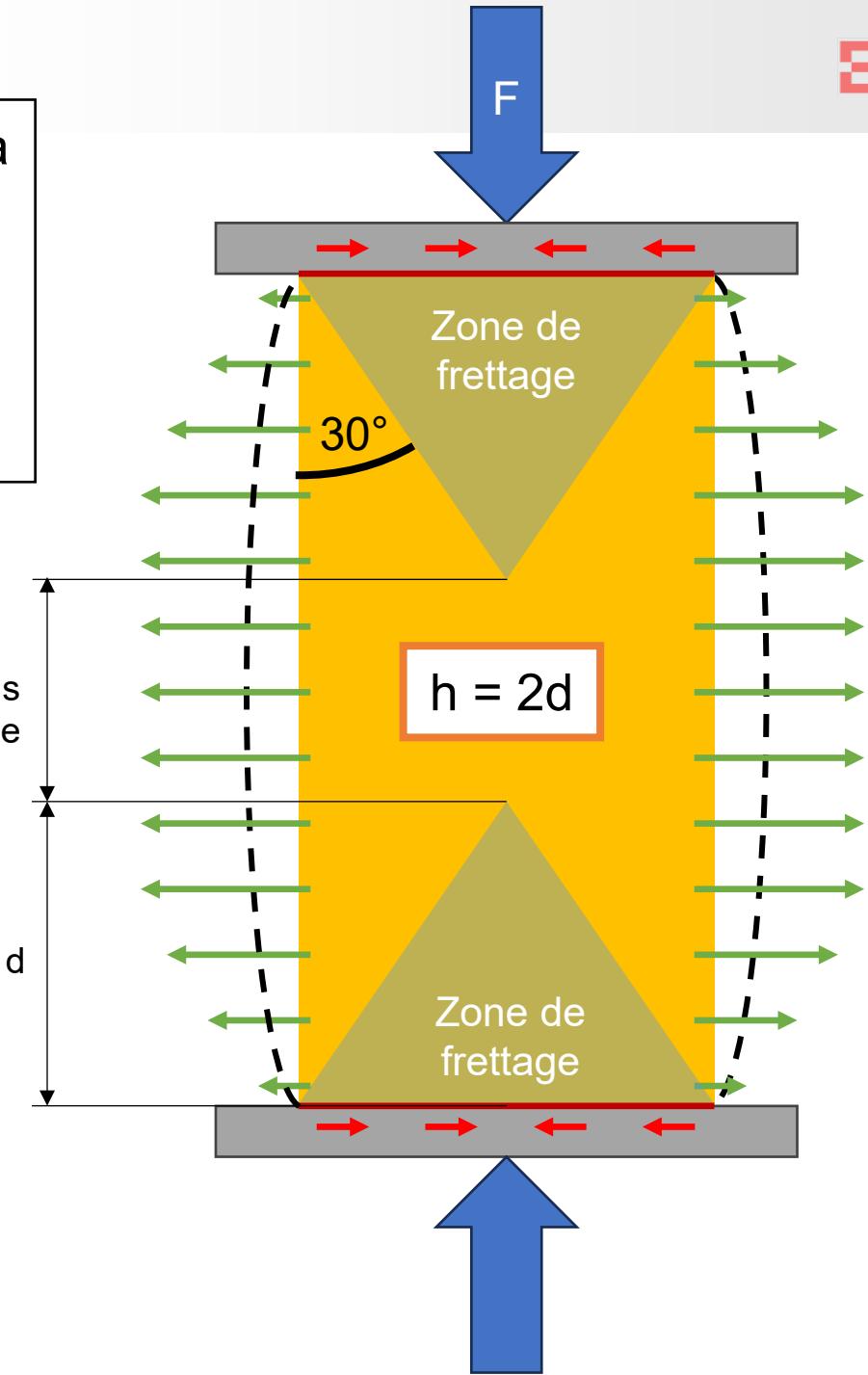
Le frettage augmente la résistance mesurée

$$f_{c,cube} \approx 1.25 \cdot f_{c,cyl}$$

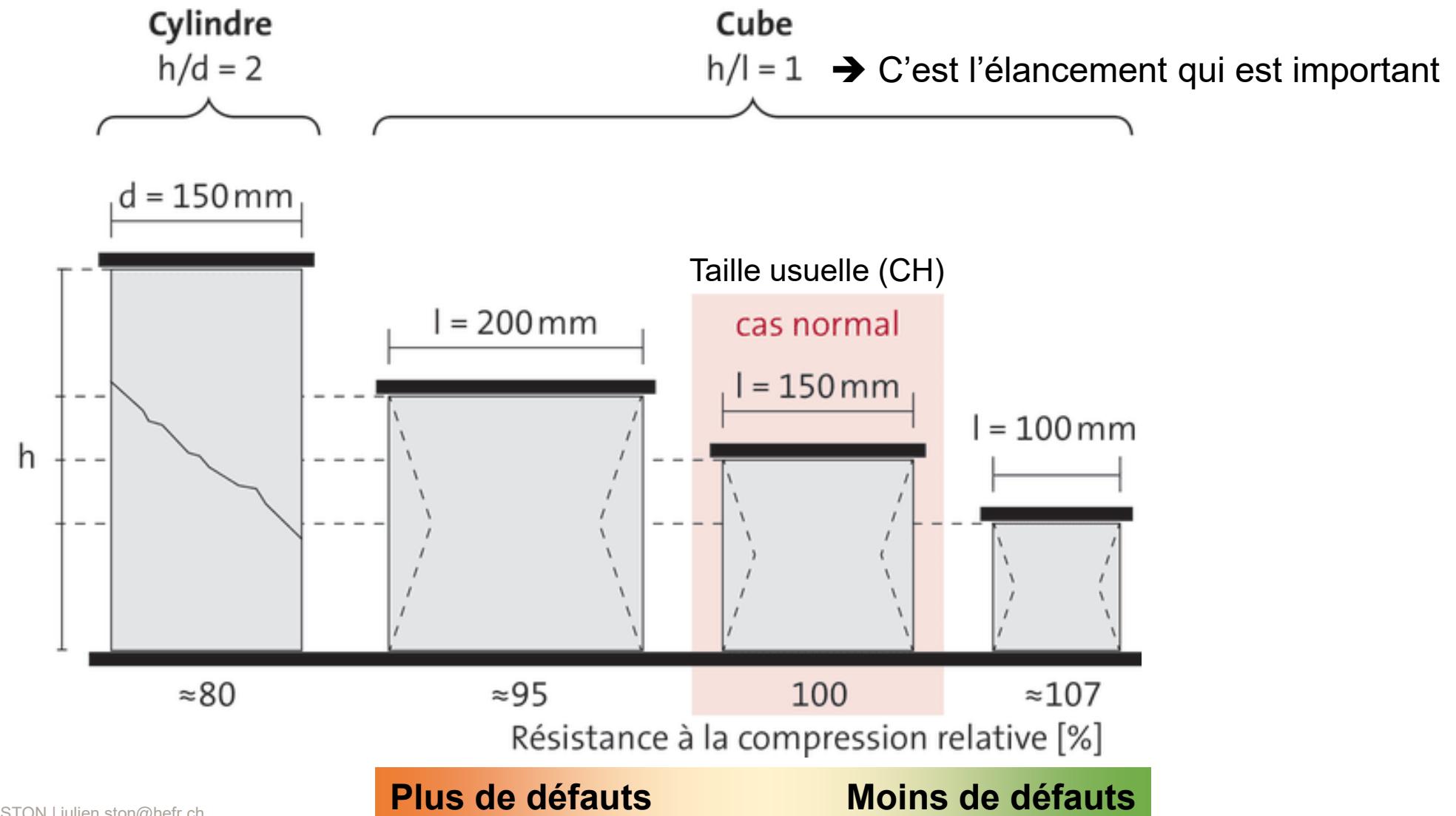
$$f_{c,cyl} \approx 0.8 \cdot f_{c,cube}$$

Zone sans frettage

$\sim 0.866 d$

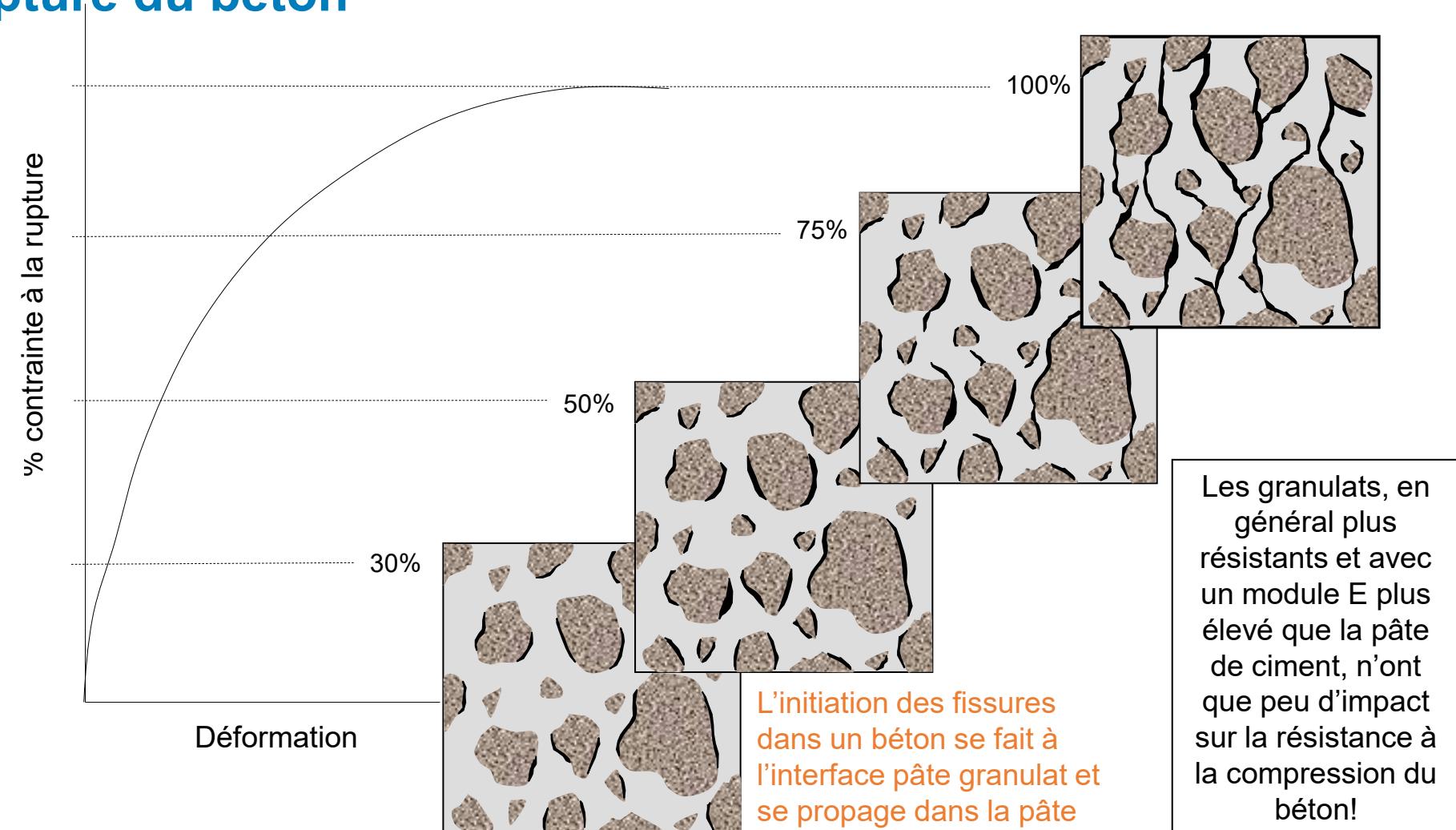
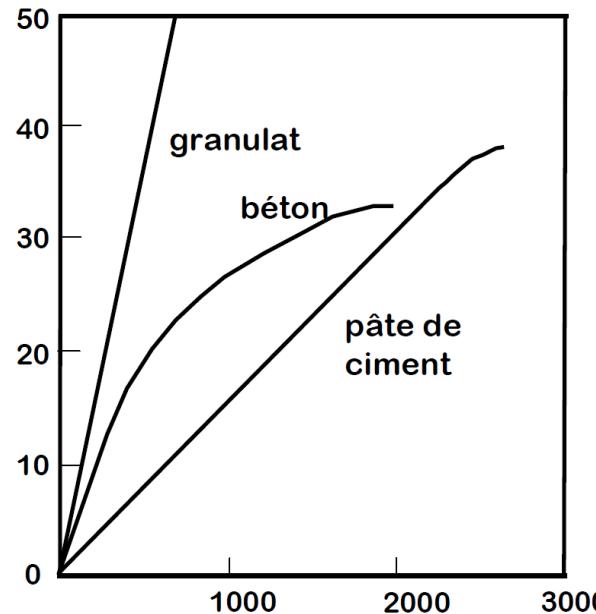


## Influence de la géométrie



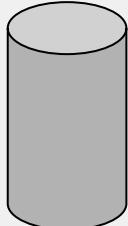
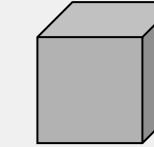
## Phénomène de rupture du béton

- Déformation du milieu et propagation des fissures
- Point faible du béton = pâte de ciment, surtout l'interface pâte/granulat



# Résumé des géométries

- Importance de connaître les conditions d'essai
  - P. ex le module élastique se mesure sur un cylindre et la contrainte appliquée lors de l'essai peut provenir d'un essais sur cube ou cylindre

Pays	USA, France, ...	Suisse, UK, ...
Type d'éprouvette normative	Cylindre	Cube
Dimensions	160 x 320 mm  H/D = 2	150 x 150 x 150 mm  Attention à la dimension max. des granulats: $L_{moule} > (5 \times D_{max})$
Avantages	distribution des contraintes plus uniformes	2 face moulées
Inconvénients	Rectifiage des faces indispensable	Etat des contraintes non uniforme
Résistance relative	0.8	1

## Géométrie de la rupture

- Permet de contrôler la fabrication et la préparation de l'échantillon et le bon fonctionnement de l'équipement de mesure

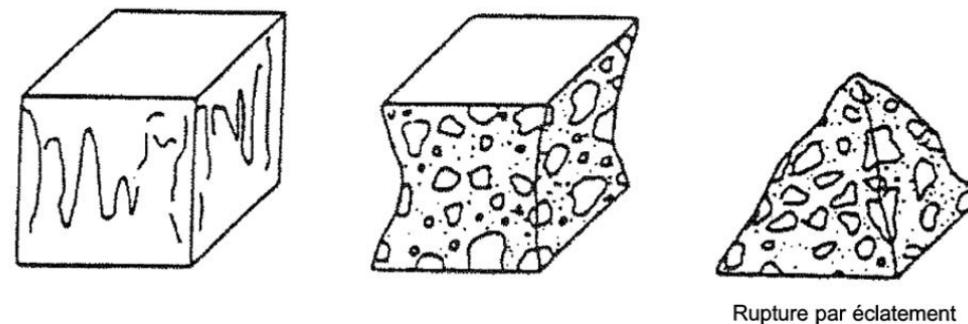


Fig. 4.4.4 Ruptures correctes d'éprouvettes cubiques : les 4 faces exposées sont fissurées approximativement de la même façon, en général sans dommage important des faces en contact avec les plateaux

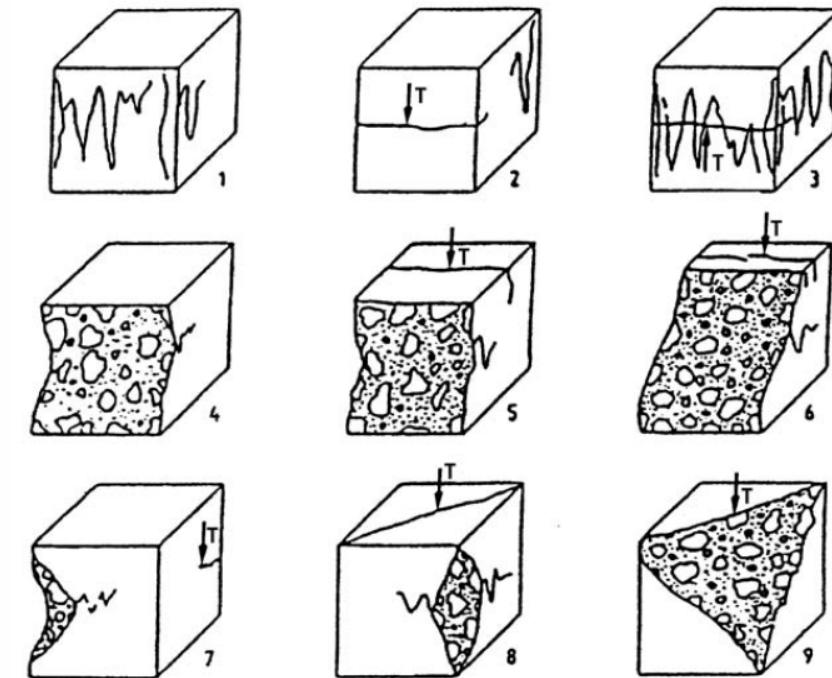


Fig. 4.4.5 Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cubiques



## Résistance à la traction/flexion du béton

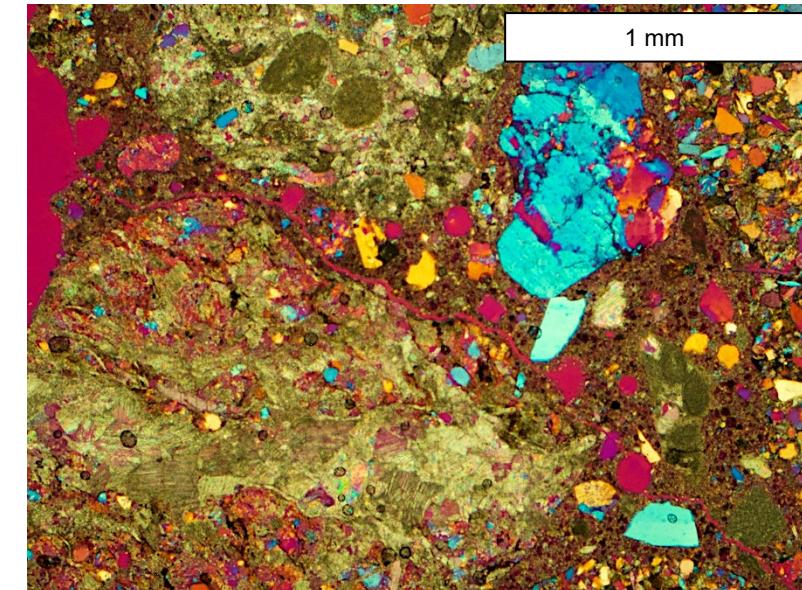
- Le béton est un matériau comprenant dès fissures dès sa prise!
  - Fissures de retrait
  - Fissures de mise en service
  - Fissures d'expansion
  - ...

La résistance à la traction/flexion des bétons est très basse :

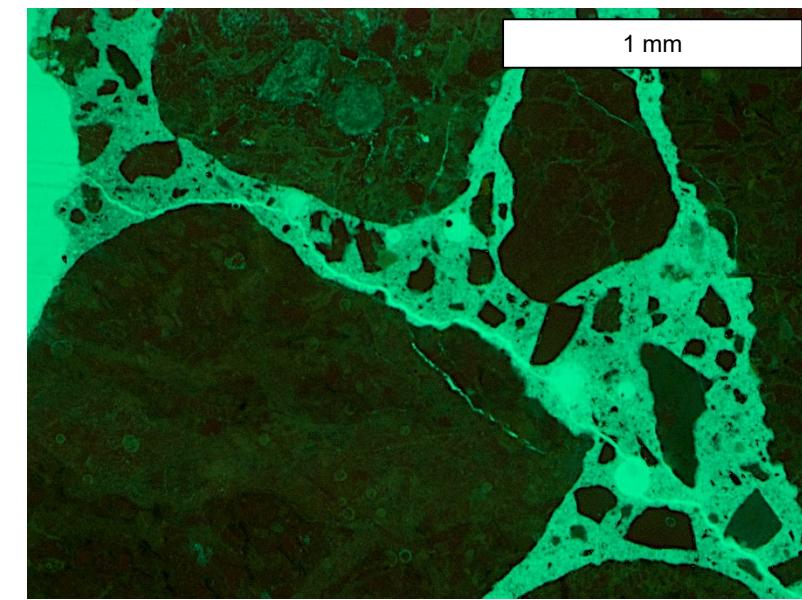
En général quelque MPa (cf ~300-500 acier)

$$R_{\text{compression}} \sim 10 \times R_{\text{traction}}$$

En conséquence les bétons sont toujours utilisés en compression. Ce sont les armatures qui reprennent les efforts en traction et flexion.



Section polie d'un échantillon de béton (~ cm) imprégné de **résine époxy fluorescente**



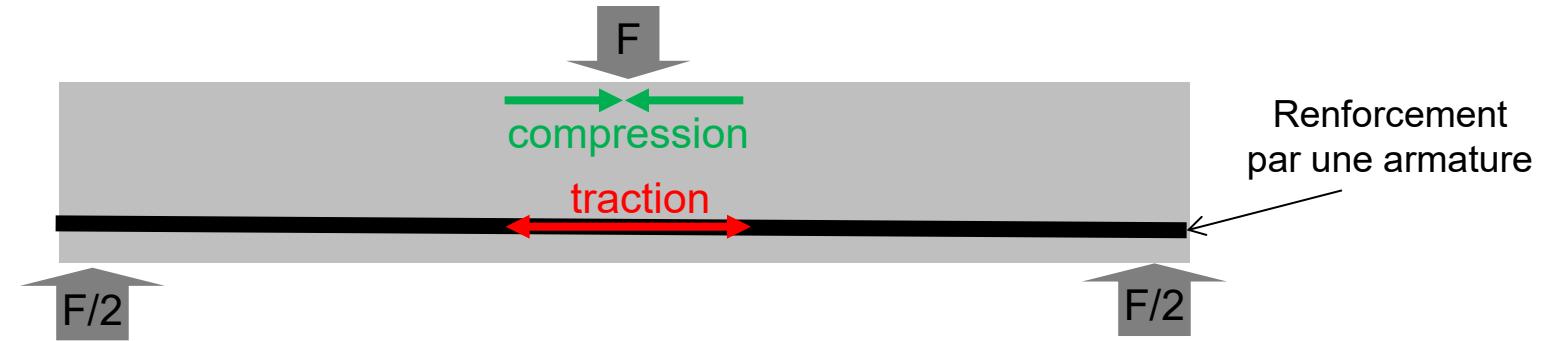
En lumière polarisée, la résine est rose et les textures minéralogiques apparaissent

En lumière UV, les zones lumineuses sont les moins denses

## Résistance à la traction/flexion du béton

- Afin de pouvoir être utilisé également en traction / flexion, le béton doit être armé (renforcé par des armatures en acier)

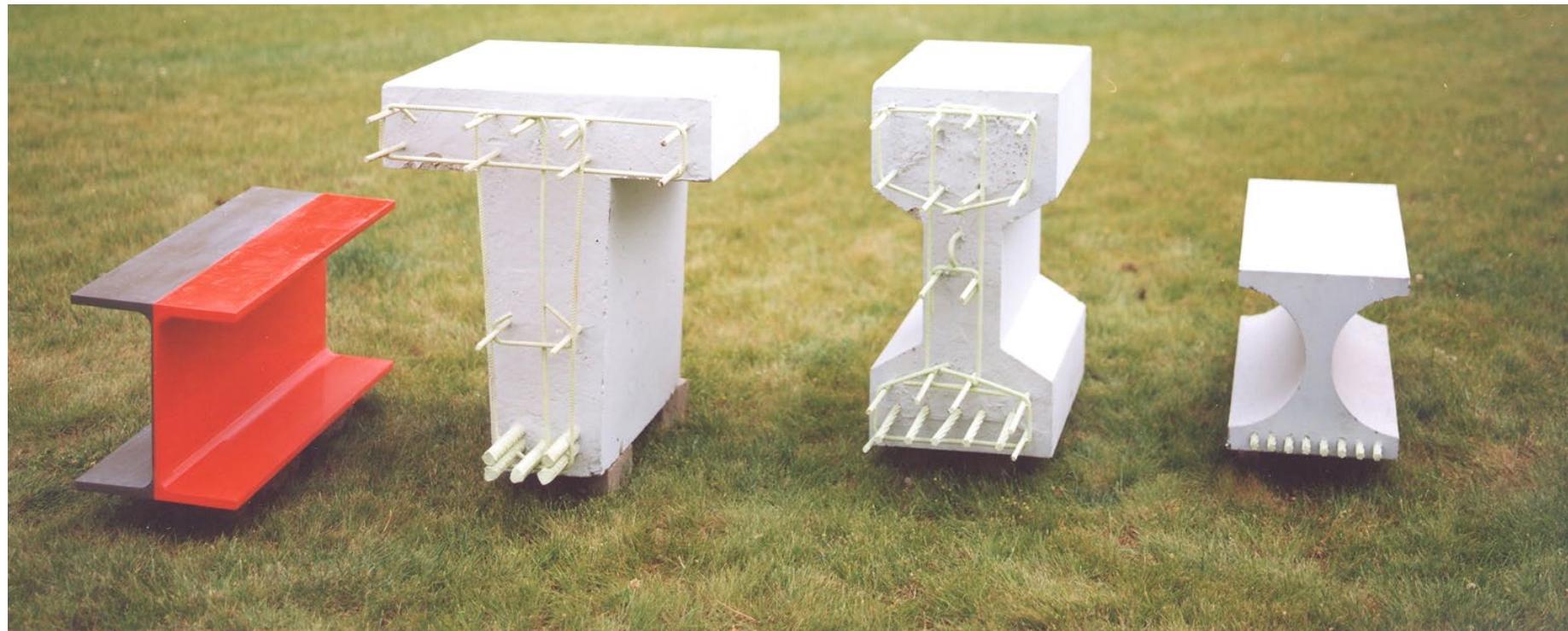
Exemple d'une poutre :



La résistance à la traction du béton est admise comme nulle dans les codes de construction :  $R_t = 0$

## Importance des armatures

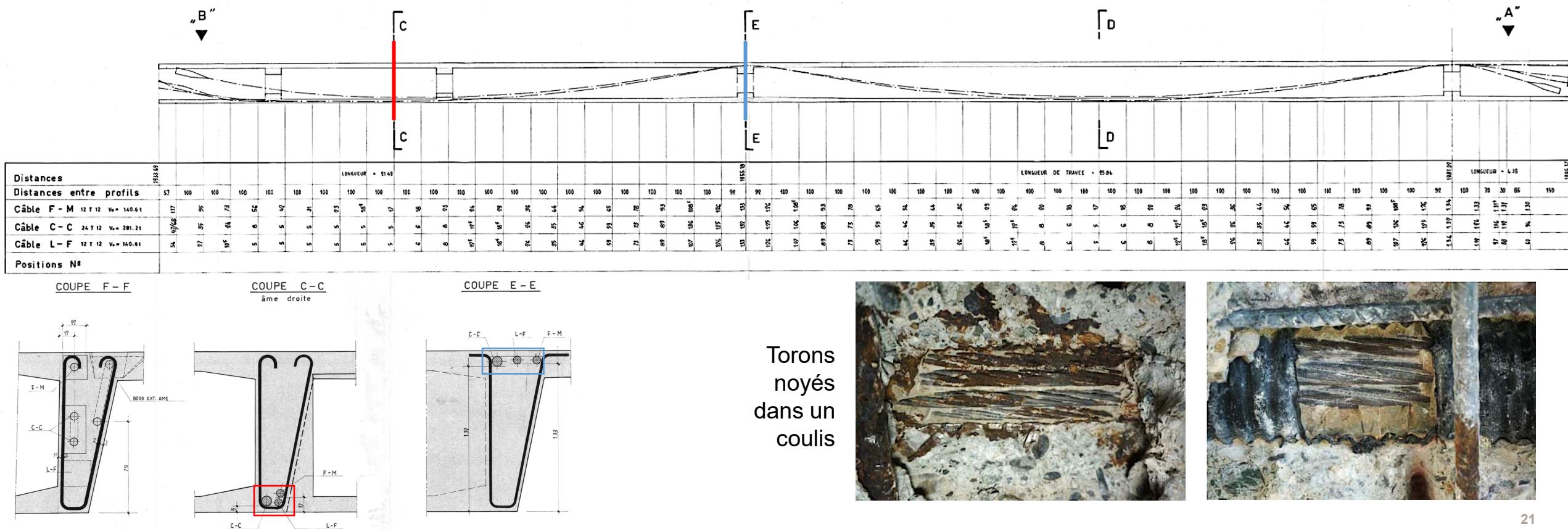
- Poutres avec capacité porteuse équivalente



	Acier	Béton armé	Béton précontraint	BFUP / CFUP
Masse linéique (kg/m)	117	530	467	140

# Armature ou précontrainte ?

- Armature : le béton cède en traction, se (micro)fissure et les armatures reprennent les efforts
- Précontrainte : un système interne ou externe constraint l'élément de sorte que sa charge propre/de service le ramène à un état partiellement ou totalement sans volumes en traction



# Les essais de traction/flexion sur béton

## Traction directe

### Avantages

- Vraie mesure de  $f_{ct}$

### Inconvénients

- Préparation délicate (surfaçage, sablage, collage)
- L'alignement force-échantillon est critique
- La colle peut être le point faible



	Traction directe
Principe	
Recommandation, respectivement norme	Rilem Recommendation CP27
Eprouvettes	cylindre (aussi entaillé)
Charge	traction centrée le long de l'axe du cylindre
Paramètres	$T = \text{force de rupture (traction)}$ $d = \text{diamètre de l'éprouvette}$
Résultat de l'essai	$f_{ct} = \frac{T}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}$
Corrélation approximative	—
Ordre de grandeur [N/mm <sup>2</sup> ]	1.5–4.0

# Les essais de traction/flexion sur béton

## Traction par fendage (brésilien)

### Avantages

- Aucune préparation de l'échantillon requise
- Fonctionne aussi sur des prismes (en principe)

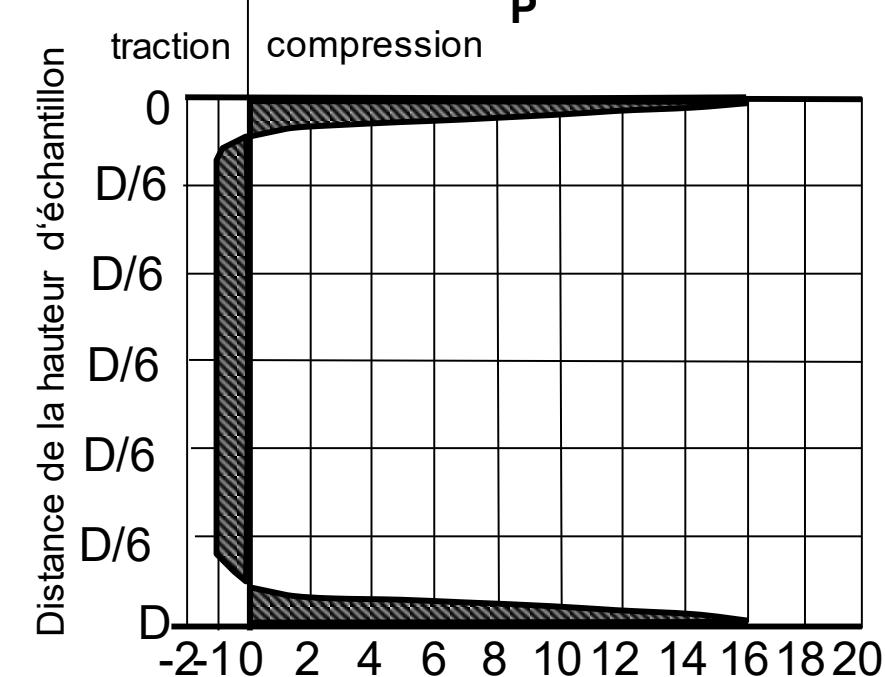
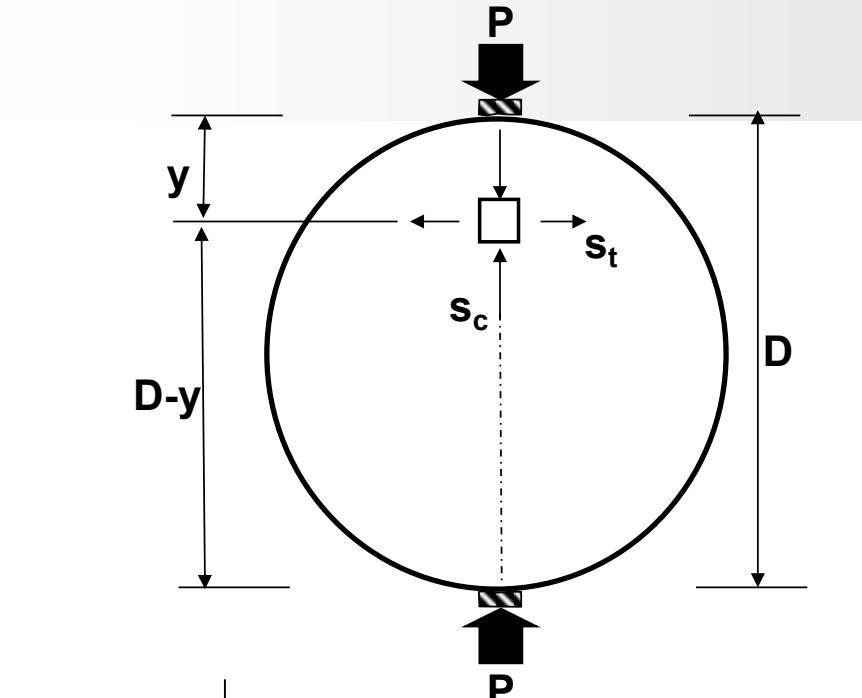
### Inconvénients

- La surface latérale doit être bien lisse. Problématique avec des carottes, risque de bombement avec moules carton, ok avec moules PE
- Application non uniforme de la force (= risque de sous-estimation)
- Faible volume de l'échantillon mis sous contrainte (= risque de surestimation)
- Alignement délicat

	Traction par fendage (essai Brésilien)
Principe	
Recommandation, respectivement norme	SN EN 12390-6
Éprouvettes	cylindre
Charge	compression le long de deux lignes opposées dans le plan axial
Paramètres	$F$ = force de rupture (compression) $d$ = diamètre de l'éprouvette $L$ = longueur de l'éprouvette
Résultat de l'essai	$f_{c, \text{fendage}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{F}{d \cdot L}$
Corrélation approximative	$f_{c, \text{fendage}} \approx 1.25 f_{ct}$
Ordre de grandeur [N/mm <sup>2</sup> ]	2.0–6.0

# Les essais de traction/flexion sur béton

## Traction par fendage (brésilien)



# Les essais de traction/flexion sur béton

## Traction par flexion 3 points (ou 4 points)

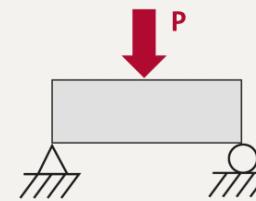
### Avantages

- Aucune préparation de l'échantillon requise
  - Prismes uniquement

### Inconvénients

- L'échantillon n'est pas en traction pure

Le plus souvent utilisé sur matériaux de chapes, pâtes de ciment, mortiers, bétons fibrés...

	Flexion 3 points
Principe	
Recommandation, respectivement norme	SN EN 12390-5
Éprouvettes	prisme
Charge	charge centrée en un point
Paramètres	$P$ = force de rupture $h$ = hauteur de l'éprouvette $b$ = largeur de l'éprouvette $L$ = portée entre appuis
Résultat de l'essai	$f_{c, \text{flexion}} = \frac{M}{W} = \frac{P \cdot L}{4} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2}$
Corrélation approximative	$f_{c, \text{flexion}} \approx 2.0 f_{ct}$
Ordre de grandeur [N/mm <sup>2</sup> ]	3.0–8.0

# Les essais de traction/flexion sur béton

## Essai « double punch » (double poinçon)

### Avantages

- Peu voire aucune préparation de l'échantillon requise
- État de contrainte presque uniforme

### Inconvénients

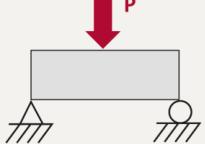
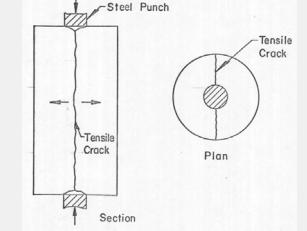
- Alignement de l'échantillon avec la presse
- Essais non normé



	Double poinçon
Principe	
Recommandation, respectivement norme	N/A
Eprouvettes	Cylindre
Charge	Compression axial sur des disques de surface réduite
Paramètres	$F$ = charge appliquée $b$ = rayon du cylindre $H$ = hauteur du cylindre $a$ = rayon du poinçon
Résultat de l'essai	$f_{c,2p} = \frac{F}{\pi(1.2 \cdot bH - a^2)}$ , pour $\frac{b}{a} \leq 5$ ou $\frac{H}{2a} \leq 5$
Corrélation approximative	$f_{c,2p} \cong 1 \text{ à } 1.1 f_{ct}$
Ordre de grandeur [N/mm <sup>2</sup> ]	2.0-5.0

# Mesure de la résistance en traction - résumé

Les essais de traction présentent en général une plus grande dispersion que les essais de compression, car plus sensibles aux défauts (micro)structuraux

	Traction directe	Traction par fendage (essai Brésilien)	Flexion 3 points	Double poinçon
Principe				
Recommandation, respectivement norme	Rilem Recommendation CP27	SN EN 12390-6	SN EN 12390-5	N/A
Éprouvettes	cylindre (aussi entaillé)	cylindre	prisme	Cylindre
Charge	traction centrée le long de l'axe du cylindre	compression le long de deux lignes opposées dans le plan axial	charge centrée en un point	Compression axial sur des disques de surface réduite
Paramètres	$T$ = force de rupture (traction) $d$ = diamètre de l'éprouvette	$F$ = force de rupture (compression) $d$ = diamètre de l'éprouvette $L$ = longueur de l'éprouvette	$P$ = force de rupture $h$ = hauteur de l'éprouvette $b$ = largeur de l'éprouvette $L$ = portée entre appuis	$F$ = charge appliquée $b$ = rayon du cylindre $H$ = hauteur du cylindre $a$ = rayon du poinçon
Résultat de l'essai	$f_{ct} = \frac{T}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2}$	$f_{c, \text{fendage}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{F}{d \cdot L}$	$f_{c, \text{flexion}} = \frac{M}{W} = \frac{P \cdot L}{4} \cdot \frac{6}{b \cdot h^2}$	$f_{c,2p} = \frac{F}{\pi(1.2 \cdot bH - a^2)}$
Corrélation approximative	-	$f_{c, \text{fendage}} \approx 1.25 f_{ct}$	$f_{c, \text{flexion}} \approx 2.0 f_{ct}$	$f_{c,2p} \cong 1 \text{ à } 1.1 f_{ct}$
Ordre de grandeur [N/mm <sup>2</sup> ]	1.5–4.0	2.0–6.0	3.0–8.0	2.0–5.0

## Le module d'élasticité

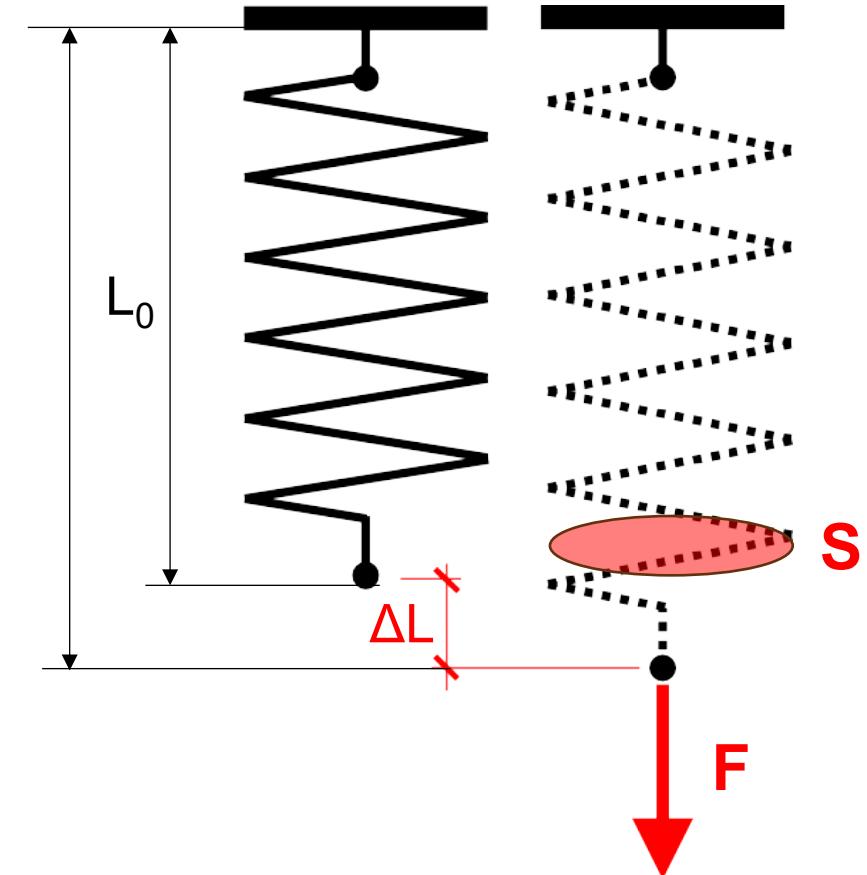
- Représente la force (contrainte) qu'il faut pour allonger un matériau.
- **Ressort Loi de Hooke**

$$F = k\Delta L \rightarrow \Delta L = \frac{F}{k}$$

- **Matériaux Module d'Young**

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = E \cdot \frac{L - L_0}{L_0}$$

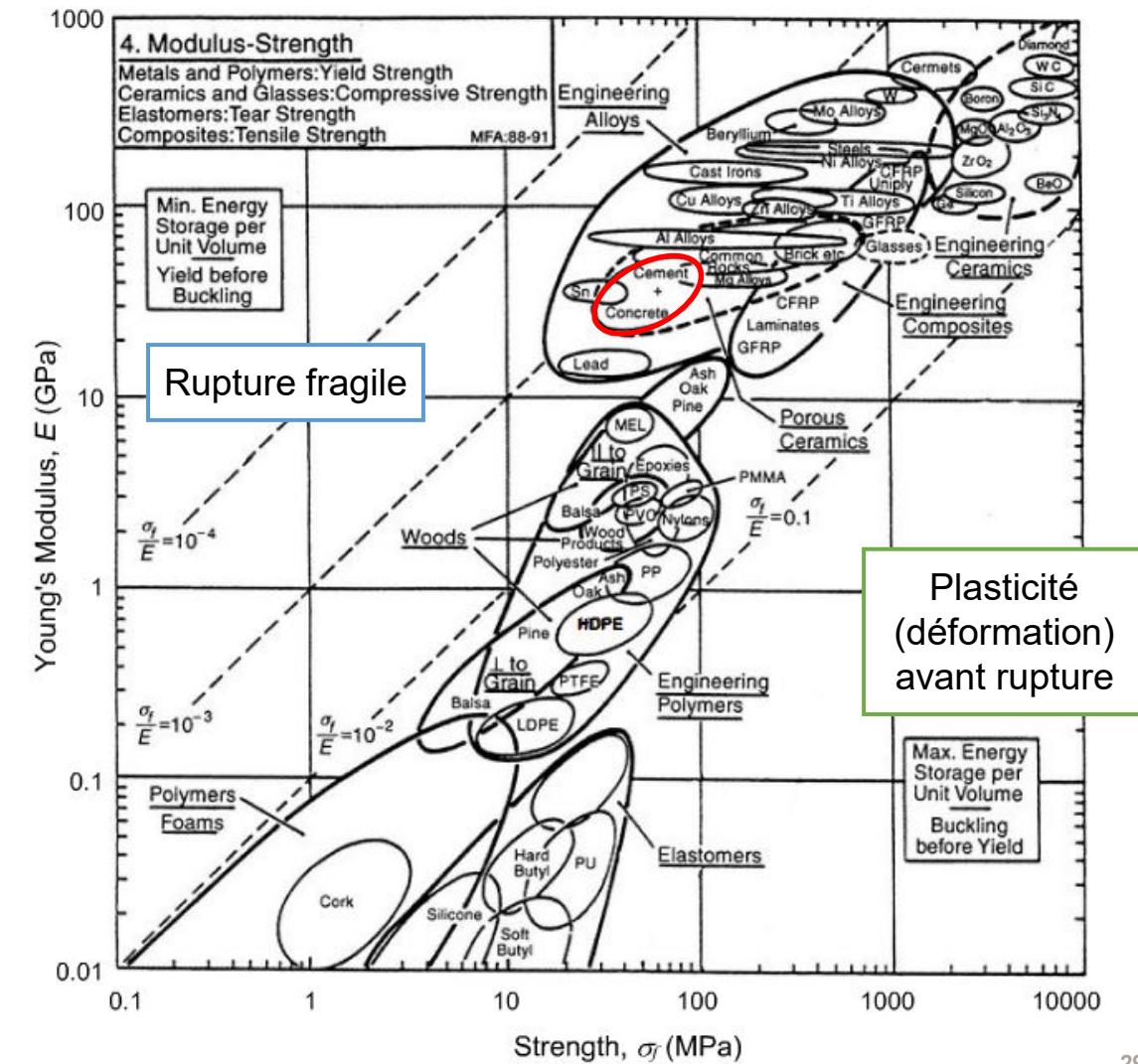
$\sigma$	Contrainte	MPa, N/mm <sup>2</sup>
$E$	Module d'Young, Module élastique	MPa, GPa N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Déformation relative	m/m, cm/m (%), mm/m (‰), µm/m (ppm)
$k$	Constante du ressort	N/m



# Ordres de grandeur du module élastique

Matériaux	Module [GPa]	Module [MPa]	Famille
Diamant	1000	1 000 000	Céramiques, oxydes, verres
Carbure de tungstène	650	650 000	Céramiques, oxydes, verres
Fibre de carbone	600	600 000	Polymères
Tungstène	400	400 000	Métaux
Alumine	400	400 000	Céramiques, oxydes, verres
Acier	210	210 000	Métaux
Bronze	125	125 000	Métaux
Fonte	120	120 000	Métaux
Titane	110	110 000	Métaux
Dent	80	80 000	Naturel
Aluminium	70	70 000	Métaux
Silice	70	70 000	Céramiques, oxydes, verres
Verre	70	70 000	Céramiques, oxydes, verres
Granite	60	60 000	Céramiques, oxydes, verres
Calcaire	45	45 000	Céramiques, oxydes, verres
<b>Béton</b>	<b>35</b>	<b>35 000</b>	<b>Céramiques, oxydes, verres</b>
Os	18	18 000	Naturel
Bois	12	12 000	Naturel
Nylon	3.5	3 500	Polymères
Epoxy	3.5	3 500	Polymères
Plexiglas	2.3	2 300	Polymères
Caoutchouc	0.05	50	Polymères

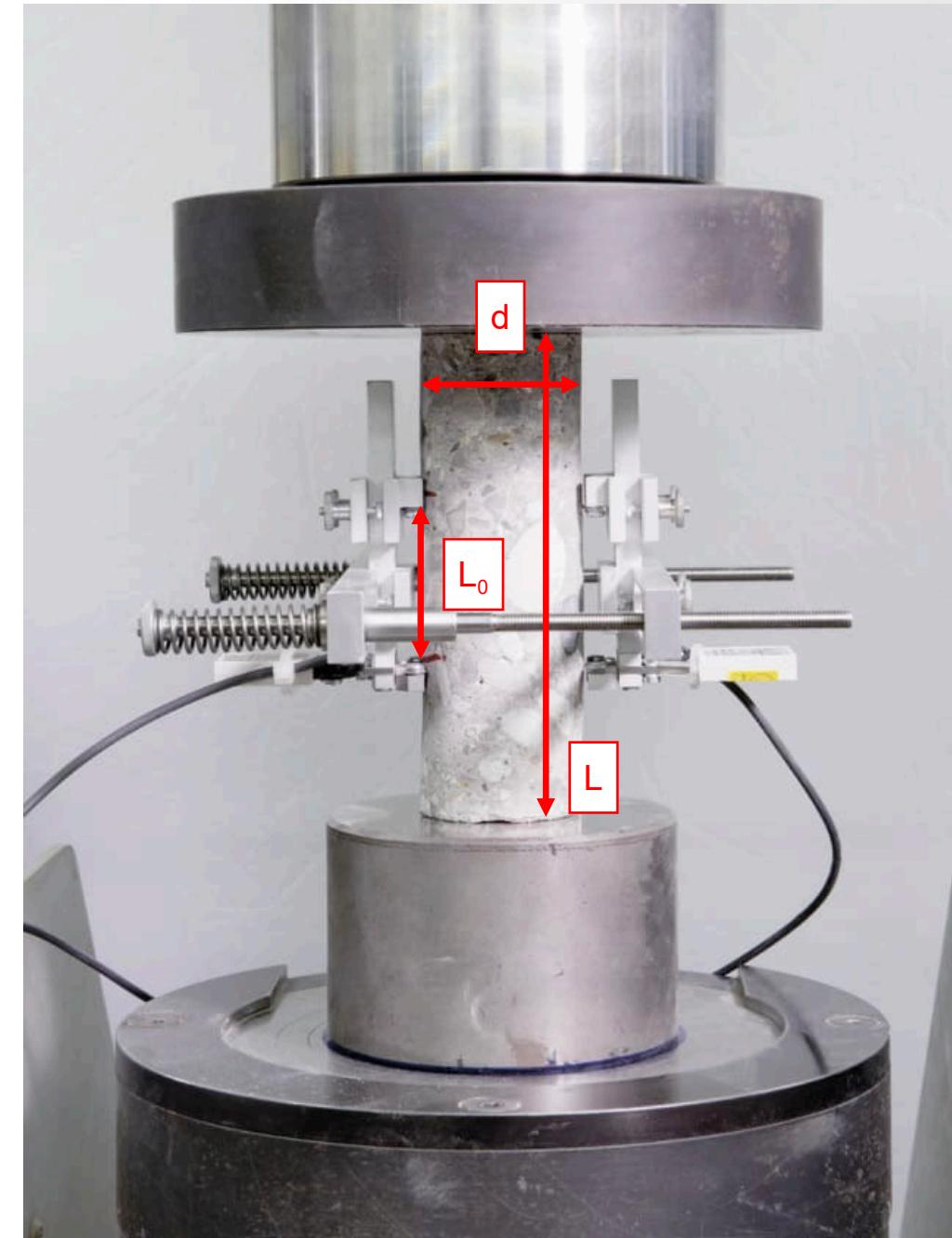
En général, les matériaux résistants sont aussi rigides



# Mesure du module élastique

## Essais selon SIA SN EN 12390-13

- Prismes ou cylindres moulés, carottes
  - Elancement  $2 \leq L/d \leq 4$
  - Généralement cylindre  $d=150$  et  $L=300$  mm
- Appareillage de mesure appliqué contre l'éprouvette
  - Base de mesure  $2/3*d \leq L_0 \leq L/2$
  - $L_0 \geq 3 * D_{max}$



# Mesure du module élastique

## Essais selon SIA SN EN 12390-13

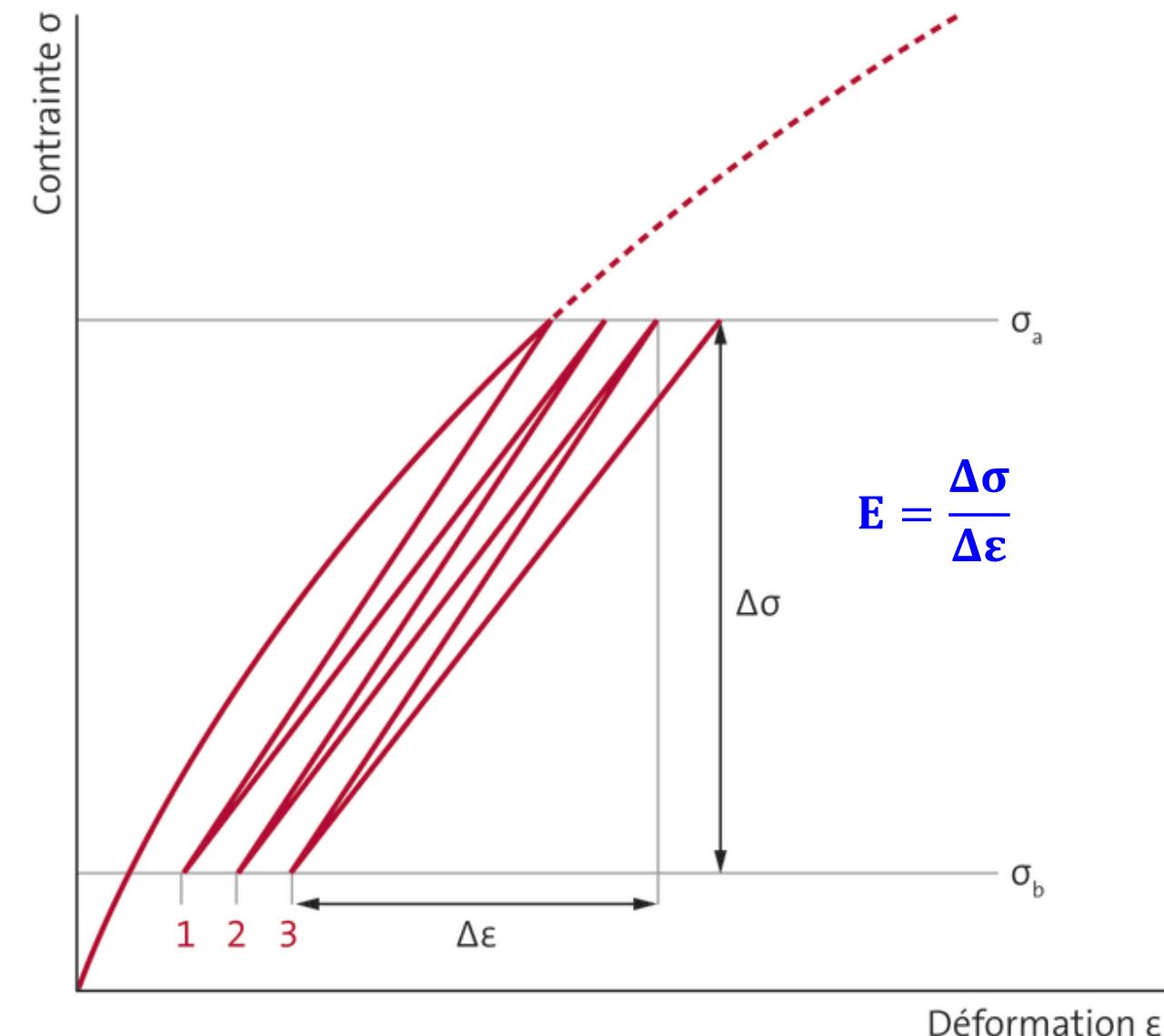
- Prismes ou cylindres moulés, carottes
  - Elancement  $2 \leq L/d \leq 4$
  - Généralement cylindre  $d=150$  et  $L=300$  mm
- Appareillage de mesure appliqué contre l'éprouvette
  - Base de mesure  $2/3 \cdot d \leq L_0 \leq L/2$
  - $L_0 \geq 3 \cdot D_{\max}$
- 3 cycles de charge/décharge (méthode B)

Vitesse  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s

$$\sigma_a = \frac{f_c}{3}$$

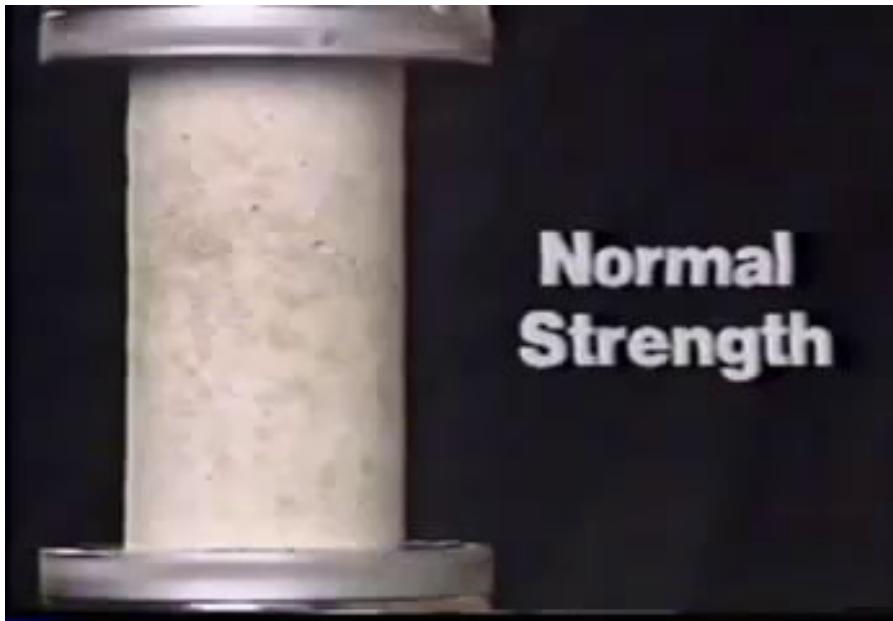
$$0.10 \cdot f_c \leq \sigma_b \leq 0.20 \cdot f_c$$

Le module est mesuré sur le dernier cycle



## Impact du module élastique sur le comportement en rupture

- Béton classique
  - 25 à 40 MPa



- Béton haute performance
  - 50 à 120 MPa



- 2 à 3 fois plus d'énergie de déformation

## Rôle des fissures et des défauts

- La résistance théorique d'un matériau est de l'ordre de

$$\sigma_{\theta} \sim \frac{E}{10}$$

$\sigma_{\theta}$  résistance en traction, E module d'élasticité

- En réalité, les résistances réelles pour les matériaux fragiles est plus proche de

$$< \sim 10^{-3} \cdot E$$

Cette chute de la résistance par rapport aux valeurs théoriques est due principalement aux défauts présents dans les matériaux

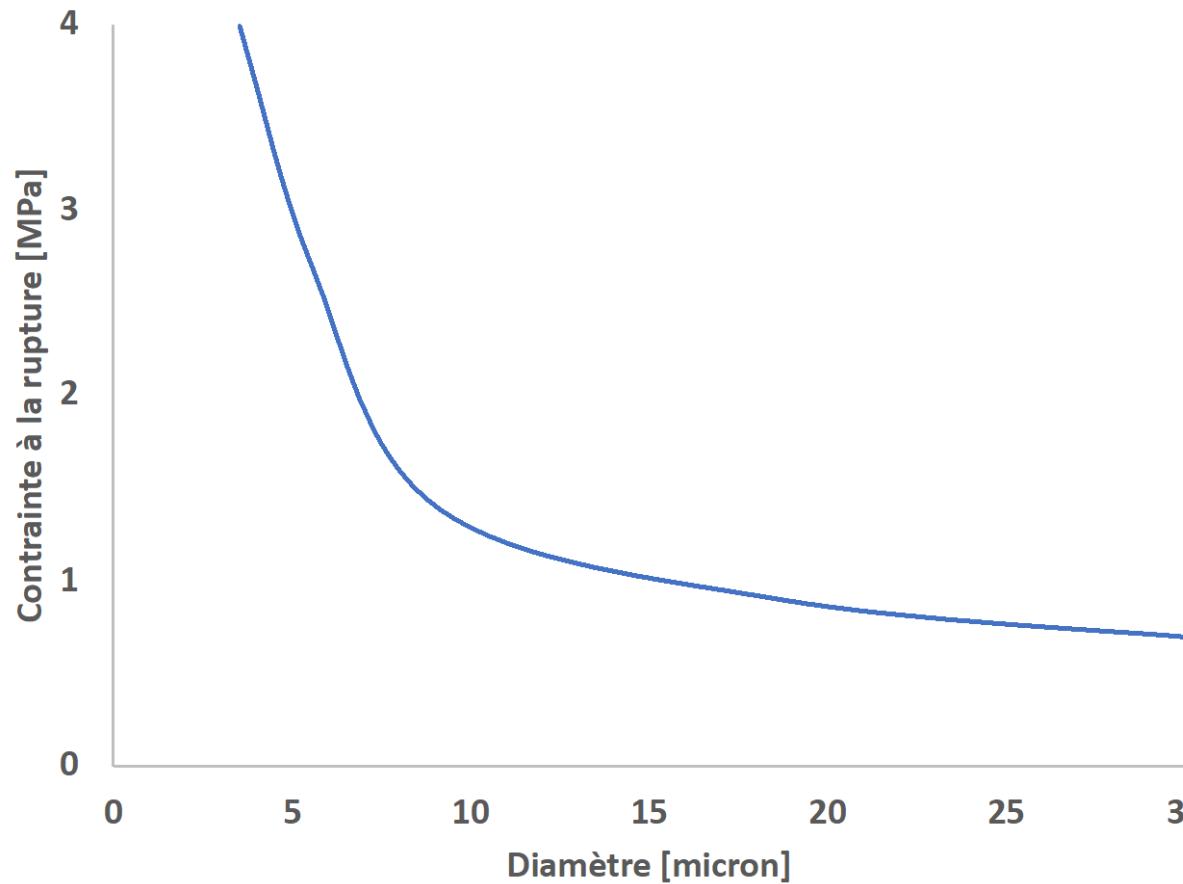
- Exemples de défauts dans un matériau:

- Défauts cristallins (impuretés, dislocations...)
- Fissures
- Porosité
- Défauts de surface (rayures, rugosité...)

- Pour des fibres très minces, il est possible de s'approcher de la résistance théorique, même pour des matériaux fragiles

## Rôle des fissures et des défauts

- Travail de Griffith sur les fibres de verre



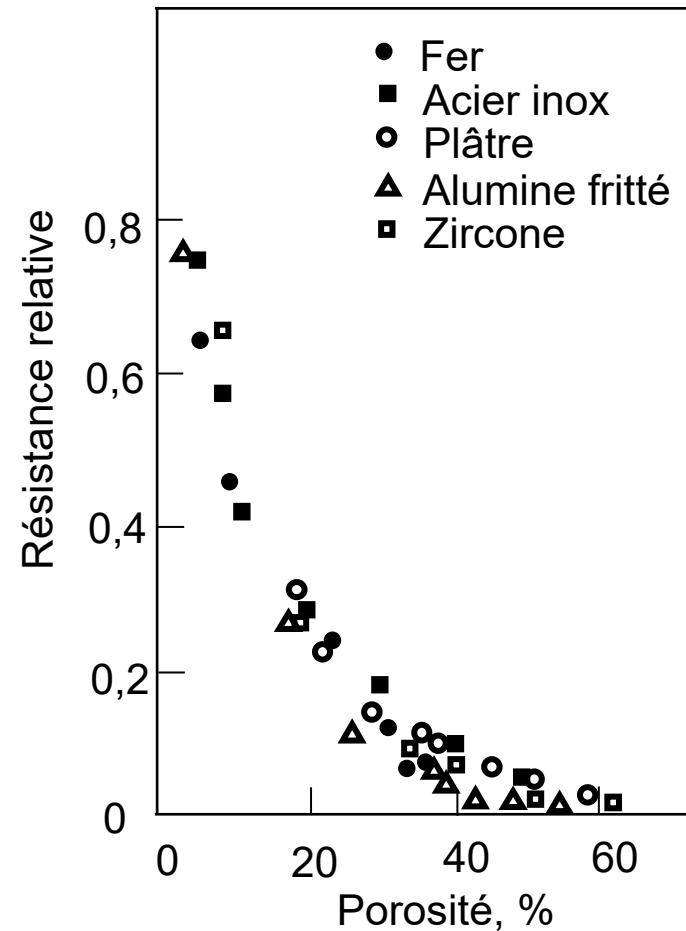
- La résistance des fibres augmente quand leur diamètre diminue

A diagram of a rectangular specimen with a central circular inclusion. A crack is shown originating from the bottom edge of the specimen. Arrows point from the text labels to the corresponding parts of the diagram. The text labels are:

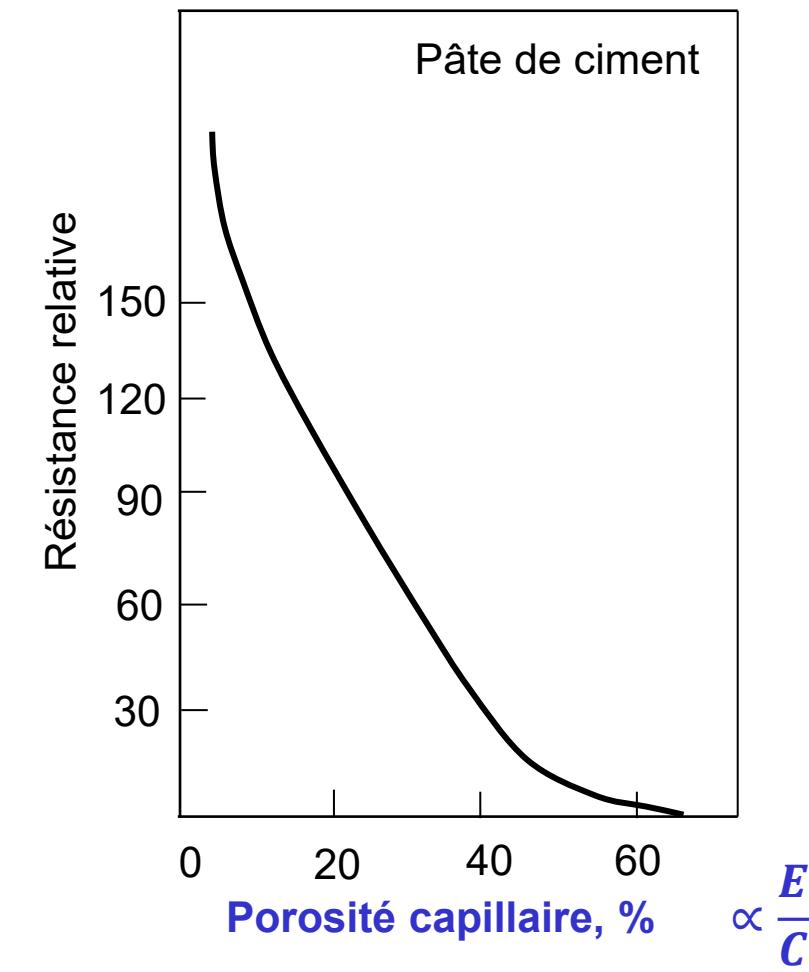
- contrainte à la rupture (tensile stress)
- $\sigma_c \propto \frac{1}{\sqrt{c}}$  (stress proportionality equation)
- longueur de fissure (length of the crack)

## Rôle des fissures et des défauts

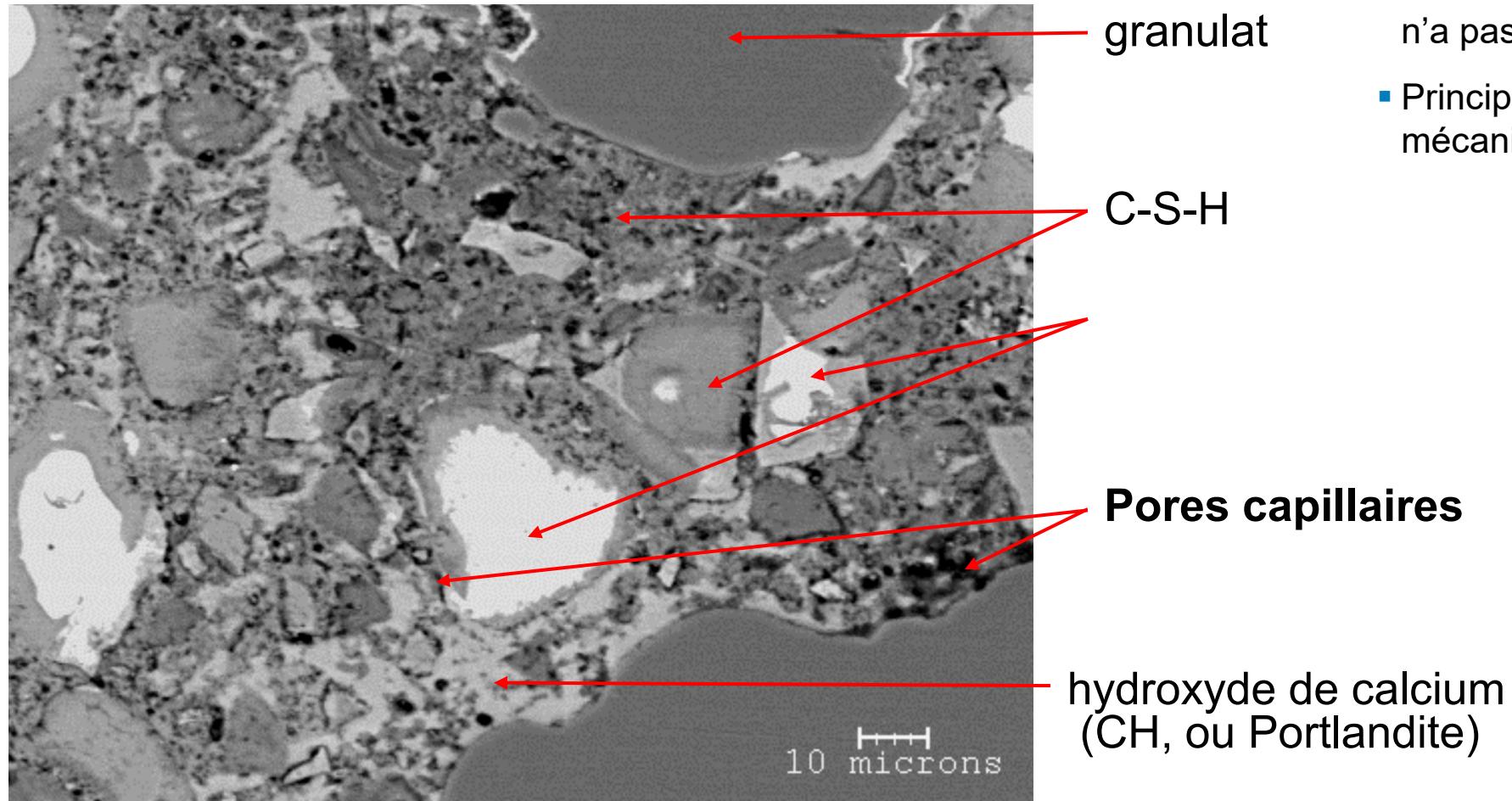
- La porosité impacte la résistance des matériaux



- Dans tous les matériaux, les pores influencent fortement la résistance



## Rôle des fissures et des défauts



- La **porosité capillaire** de la pâte de ciment est principalement formée des vides laissés par l'eau excédentaire qui n'a pas participé à l'hydratation
- Principale influence sur les propriétés mécaniques du béton

Image en microscopie électronique d'une section polie d'un échantillon de béton.  
Zones claires = denses  
zones sombres = vides

# Rôle des fissures et des défauts

- Echelles de porosité dans la pâte de ciment

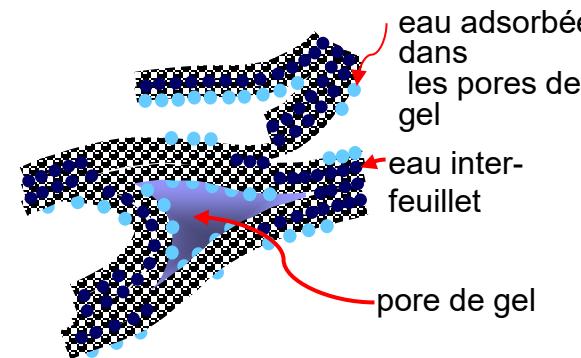


image au microscope électronique à balayage

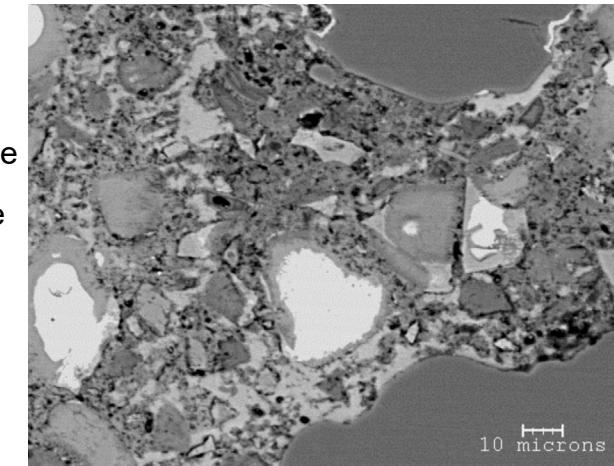
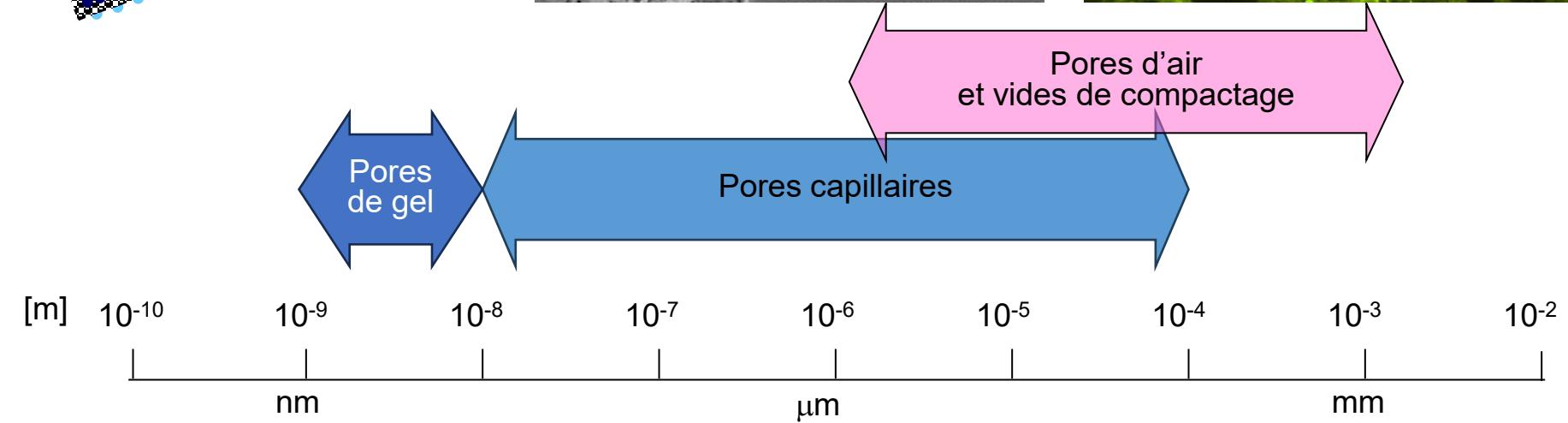
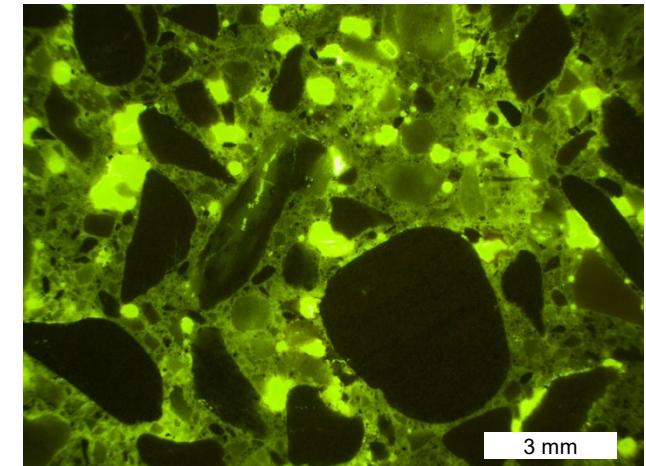
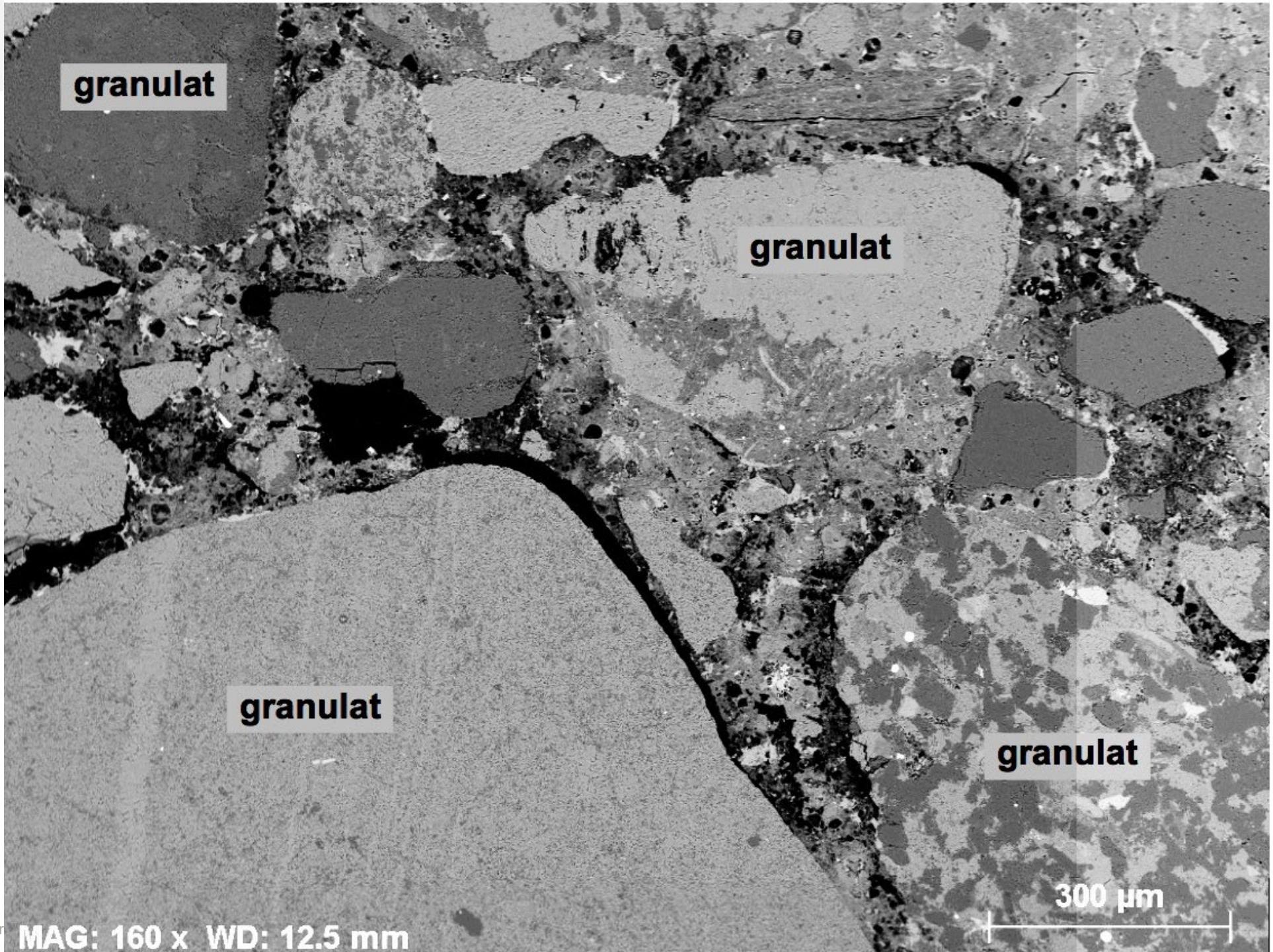


image au microscope optique en lumière fluorescente



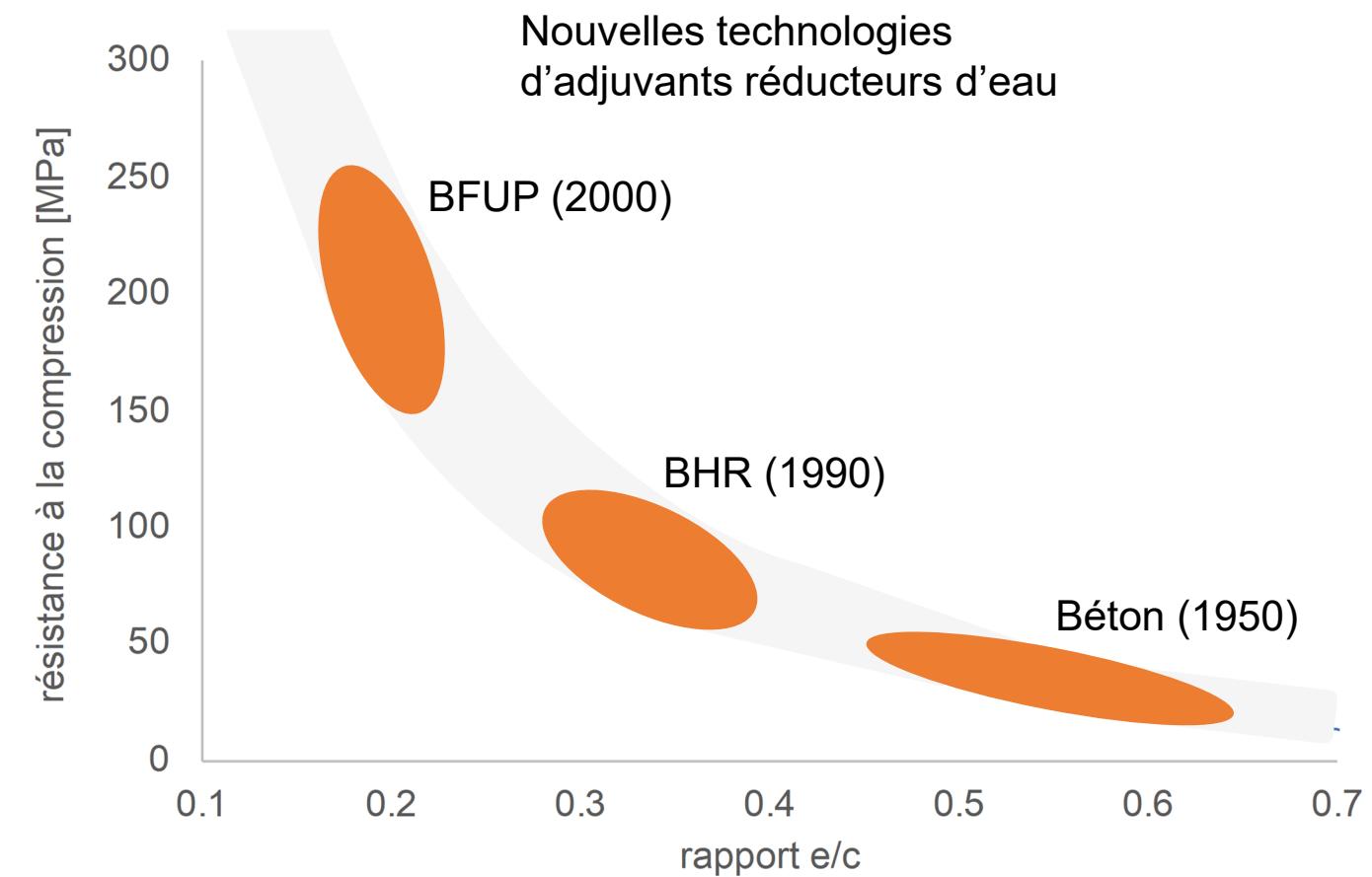
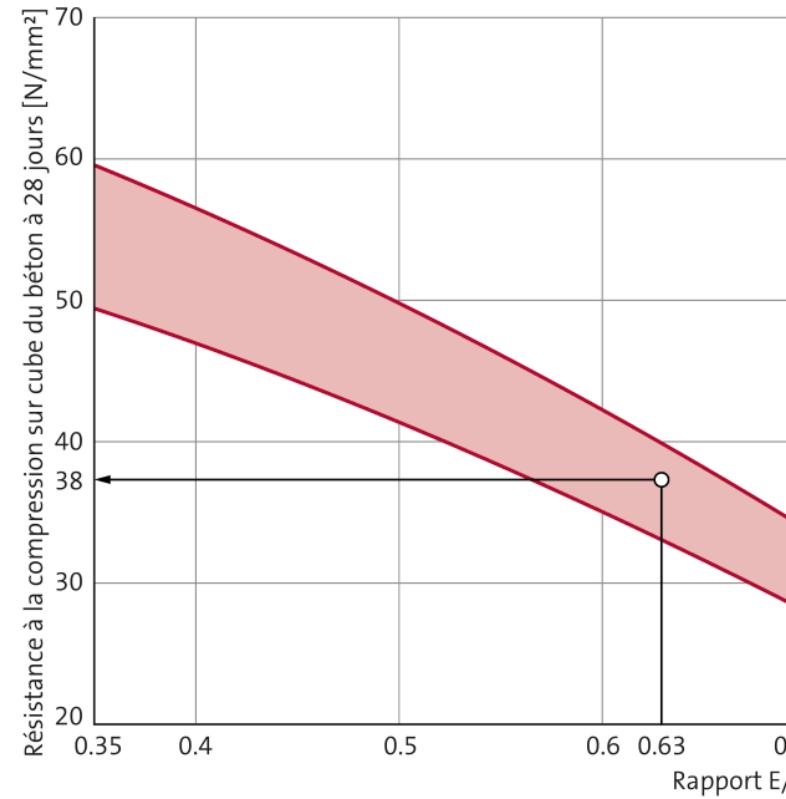
## E/C élevé

- Forte porosité
- Décollement à l'interface



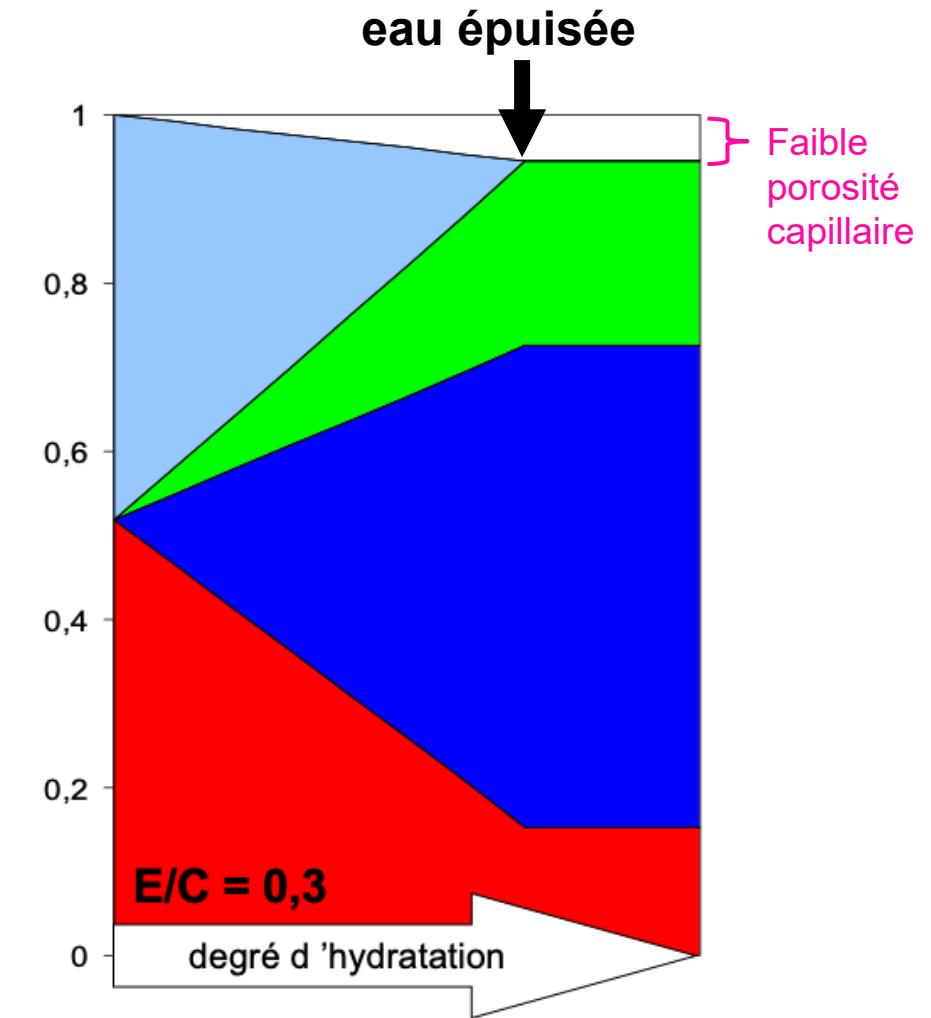
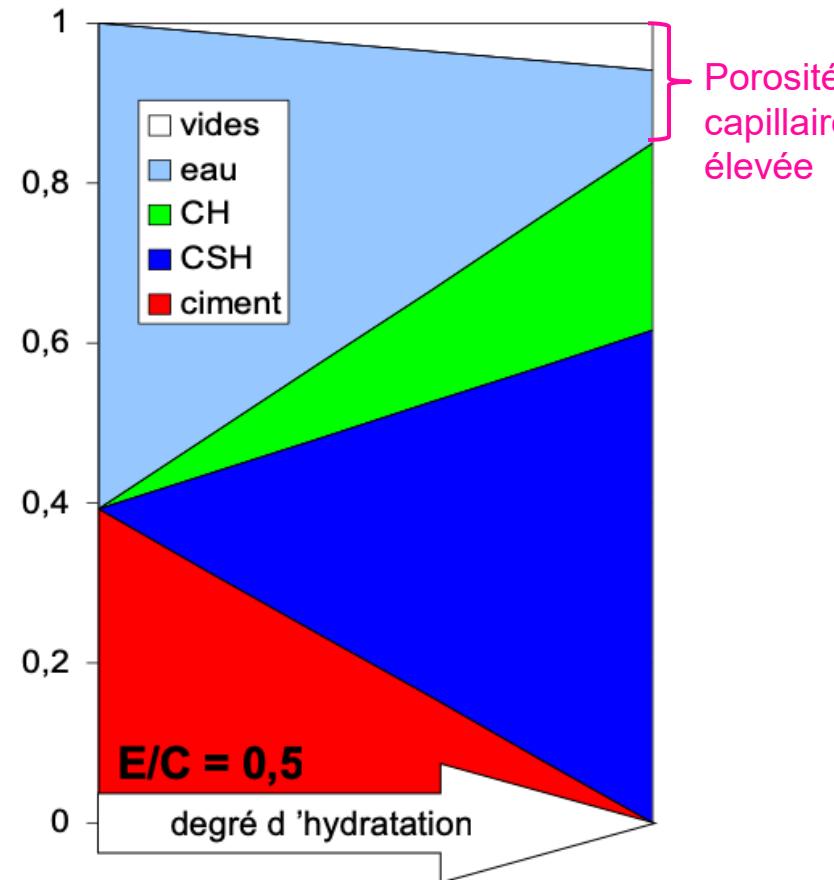
# Les paramètres qui influencent la résistance du béton

- Le rapport E/C



# Les paramètres qui influencent la résistance du béton

- Le rapport E/C

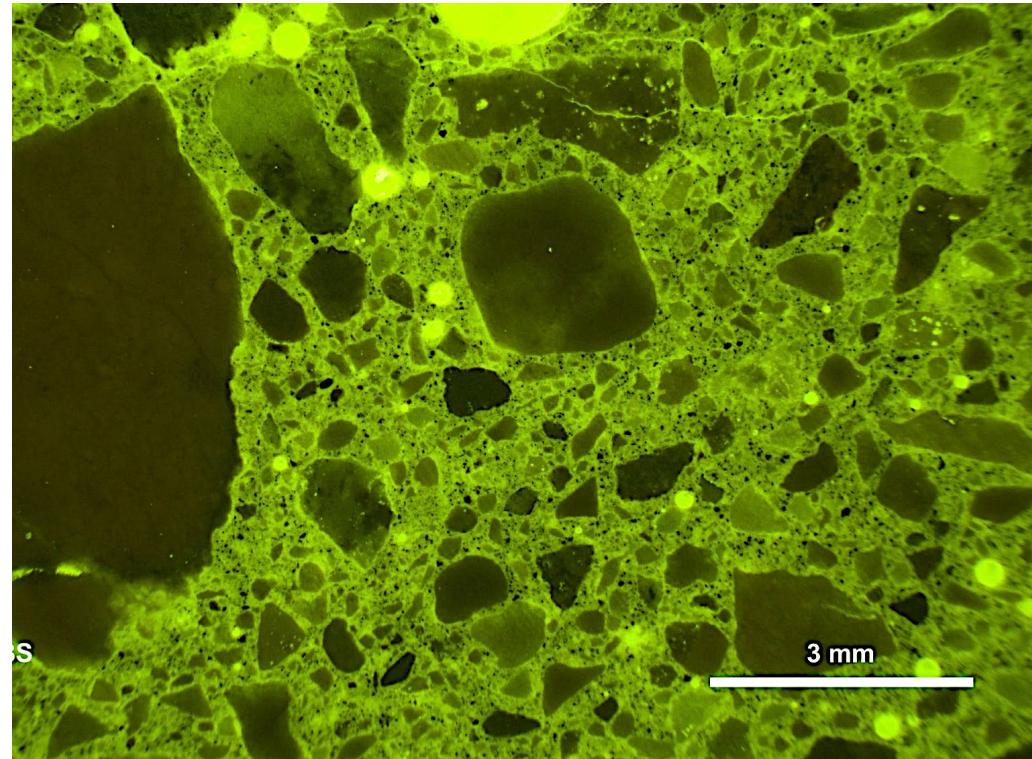


# Les paramètres qui influencent la résistance du béton

- Le rapport E/C

Rapport e/c élevé :

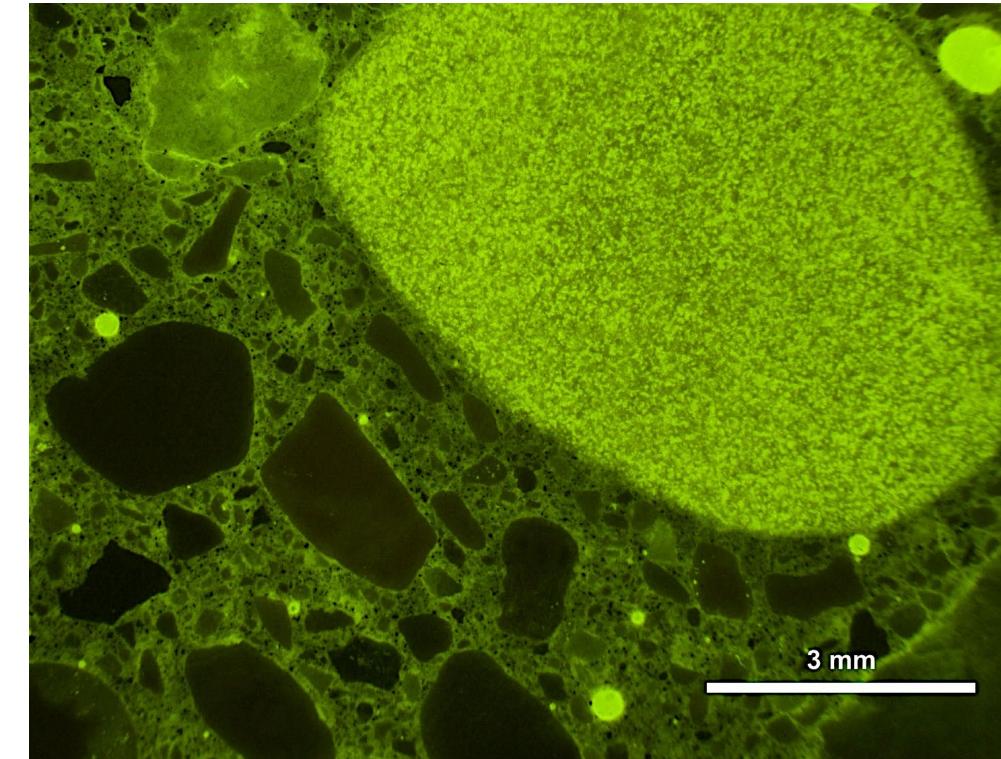
Porosité capillaire élevée



Il y a beaucoup plus de résine fluorescente dans la pâte à forte capillarité

Rapport e/c faible :

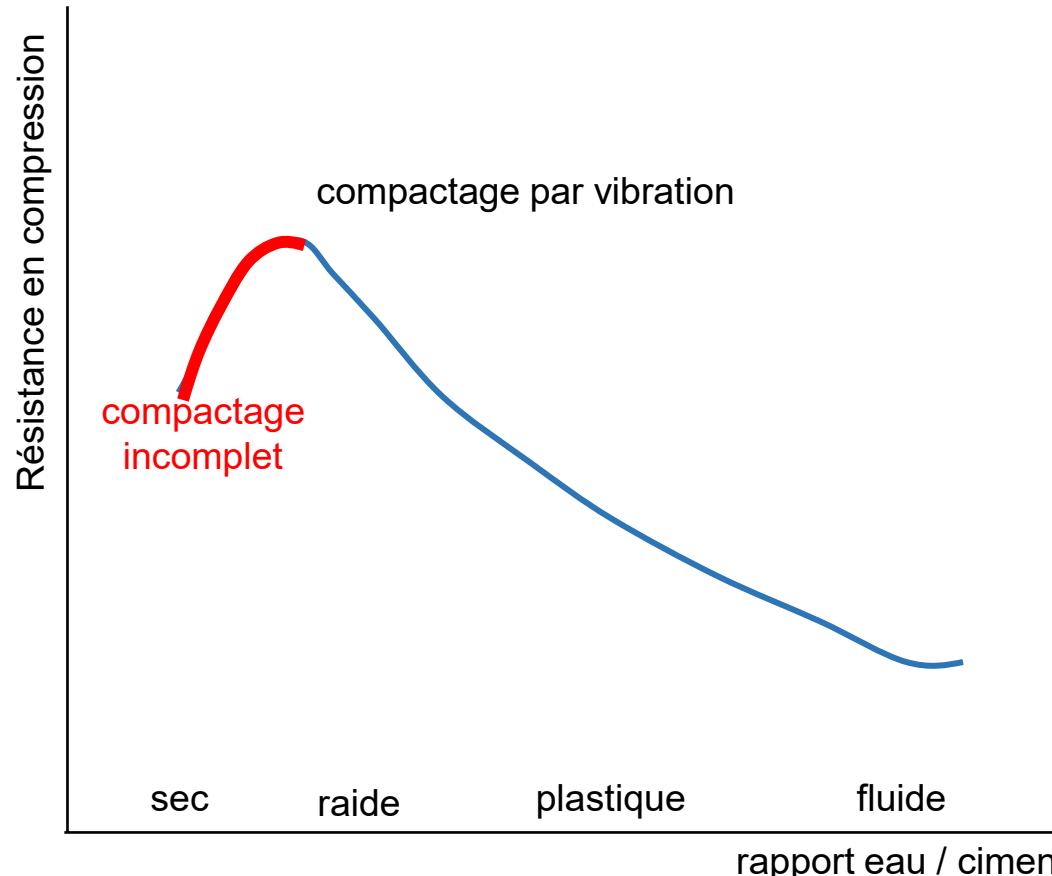
Faible porosité capillaire



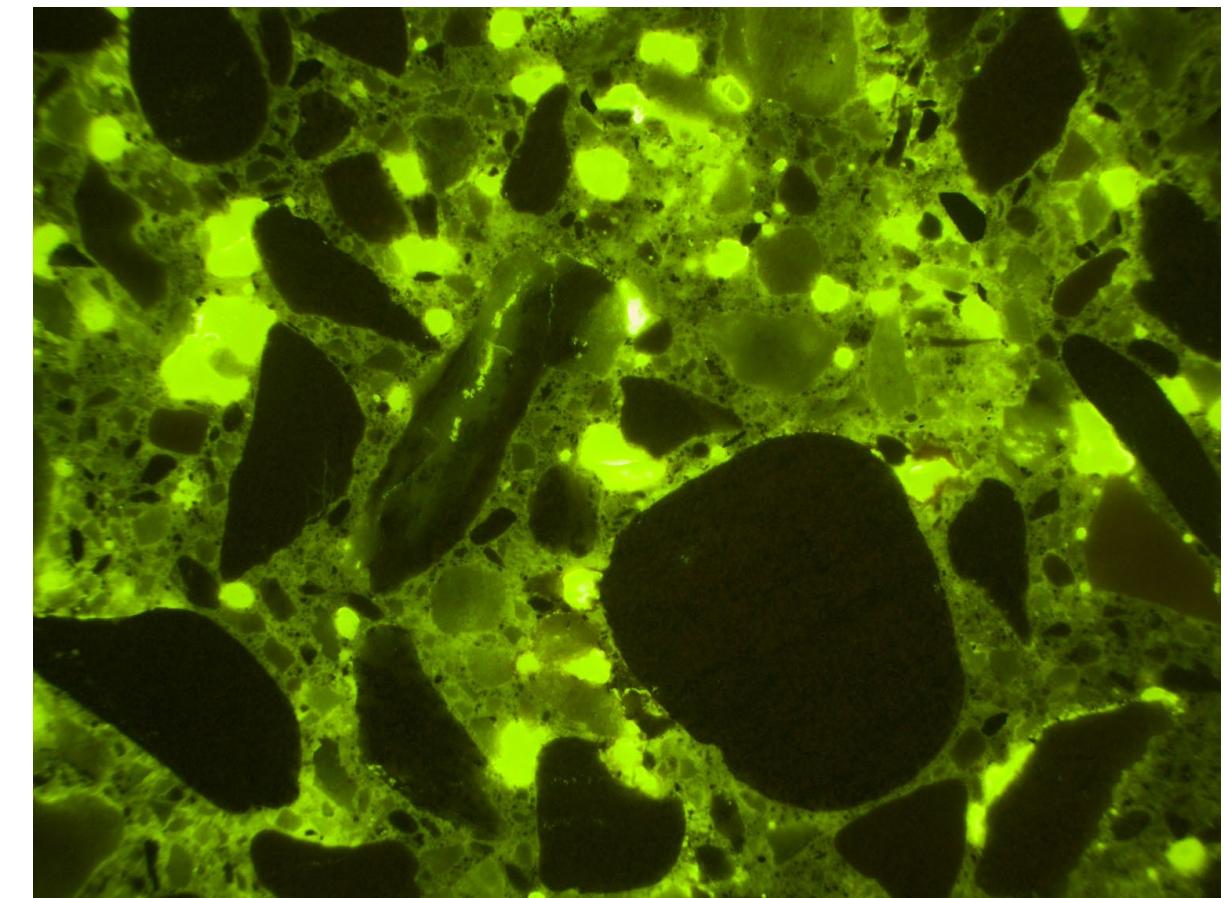
# Les paramètres qui influencent la résistance du béton

Faible rapport E/C...

Mais attention à l'ouvrabilité !



Un rapport e/c trop faible ( $< 0,4$ ) peut engendrer une baisse de la résistance à la compression du béton  
→ problème de mise en place et bulles d'air

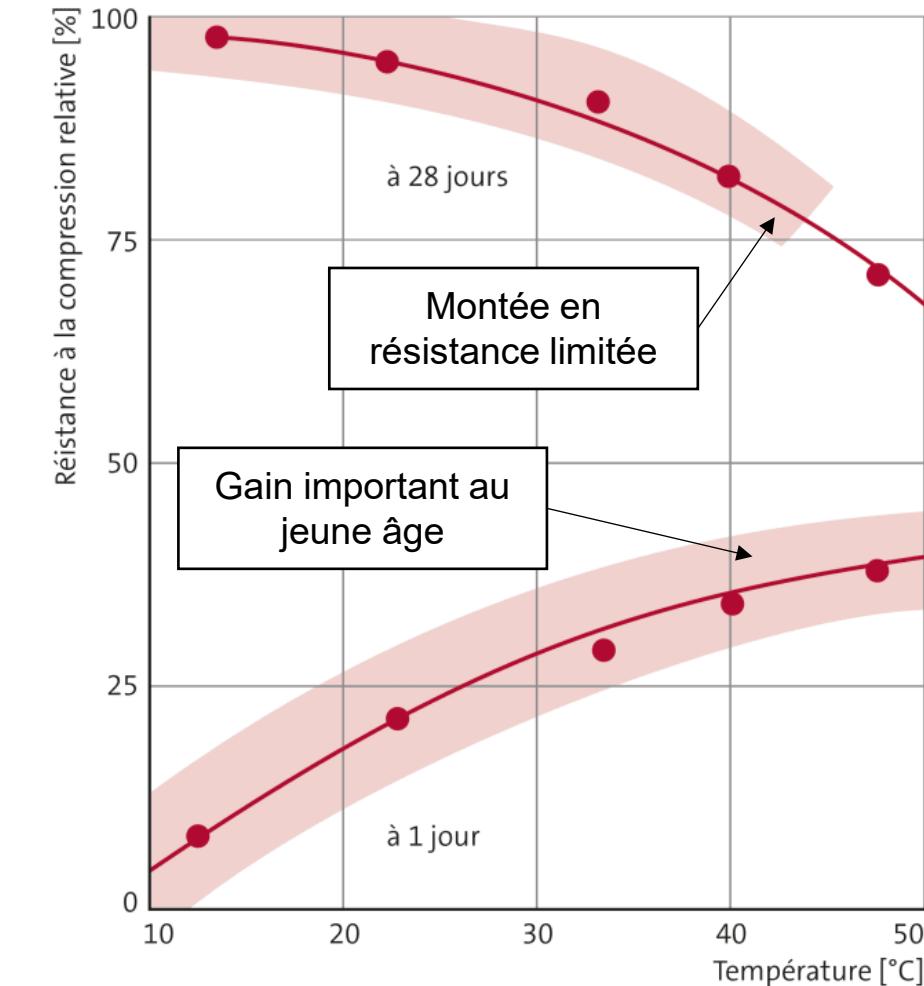
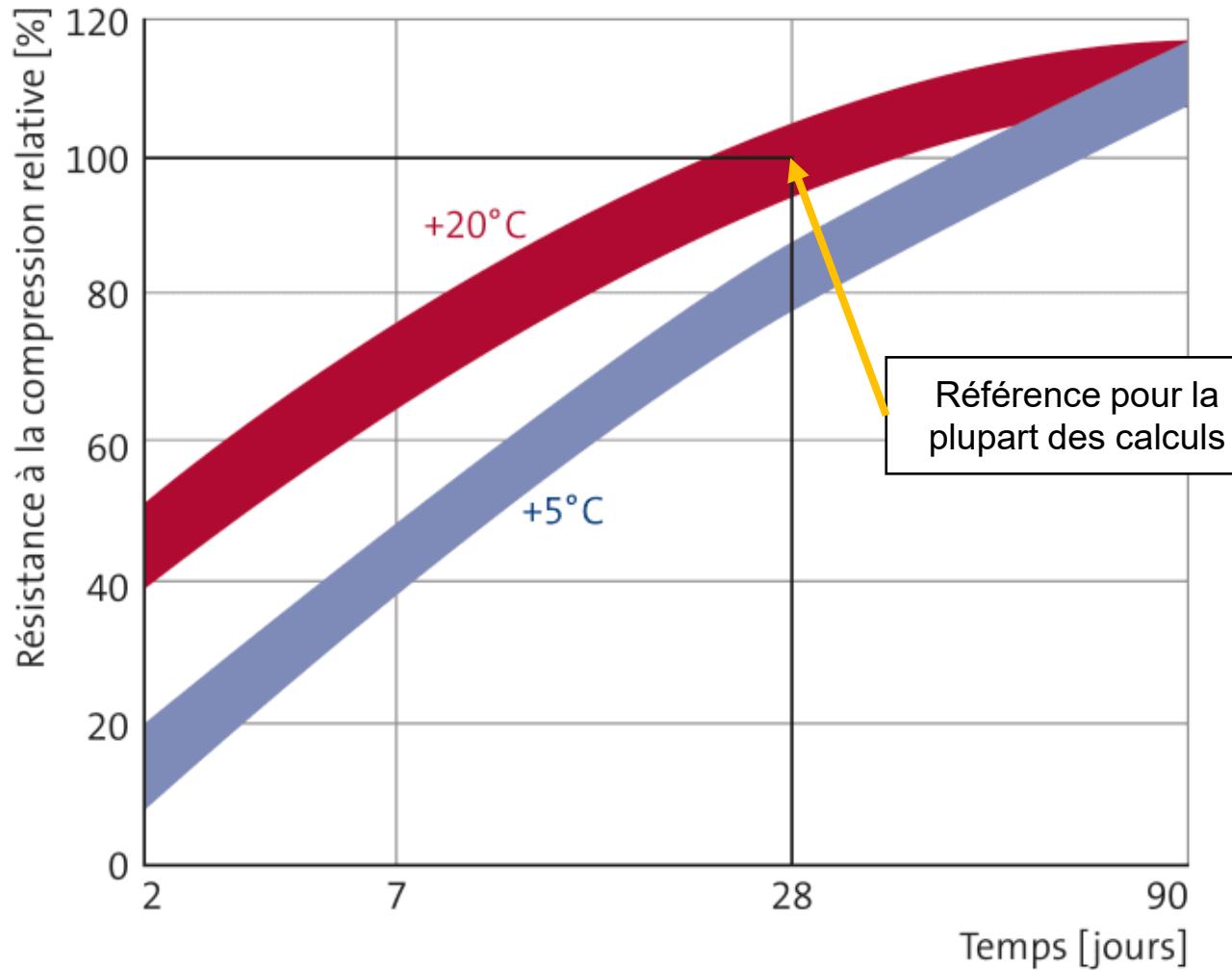


# Problèmes de mise en place



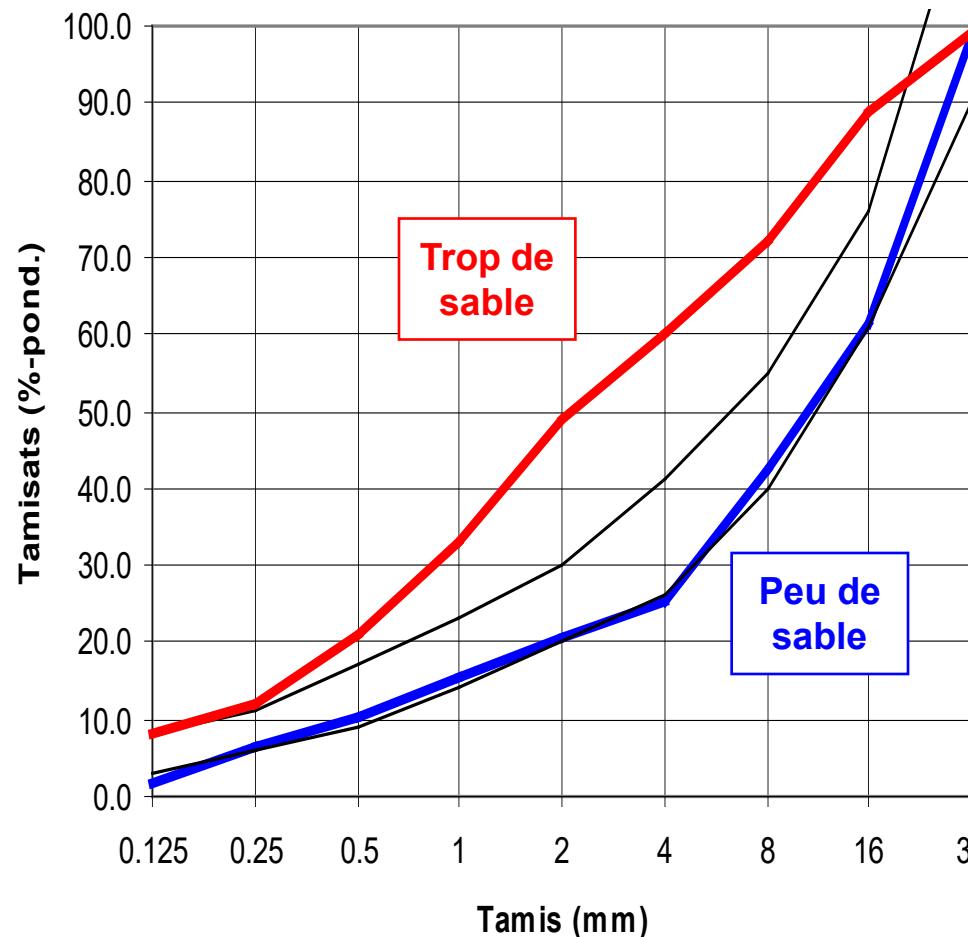
## Les paramètres qui influencent la résistance du béton

- Effet de la température



# Les paramètres qui influencent la résistance du béton

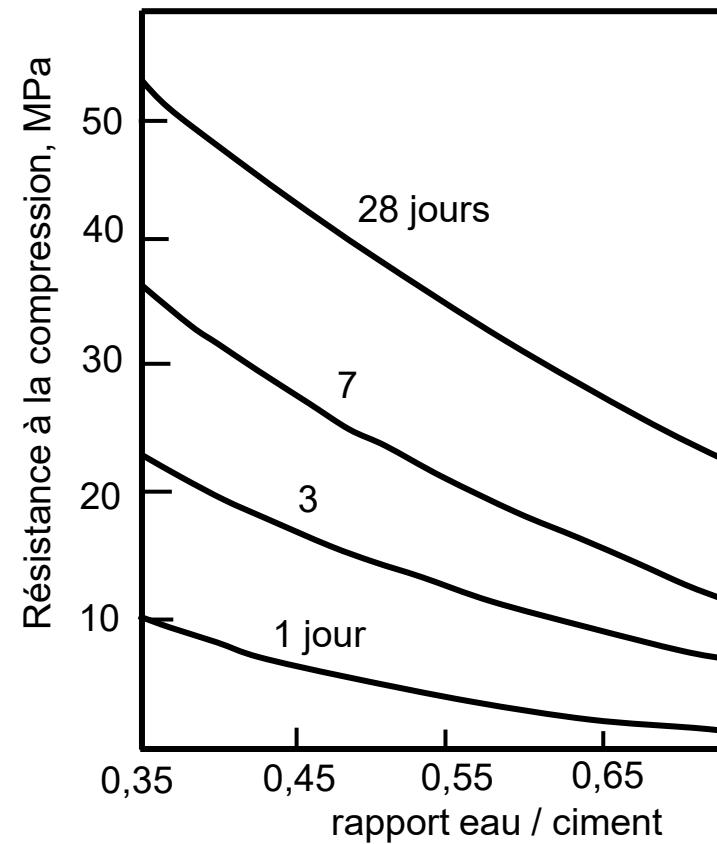
- La granularité



Granularité	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (l/m <sup>3</sup> )
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	300	300
Etalement	410	420
Eau (l/m <sup>3</sup> )	<b>198</b>	<b>150</b>
E/C	0.66	0.50
Rc 28 j (N/mm <sup>2</sup> )	26.7	37.0
Classe	<b>C20/25</b>	<b>C25/30</b>
Retrait	Elevé	Faible
Qté de pâte	Elevée	Faible

# Les paramètres qui influencent la résistance du béton

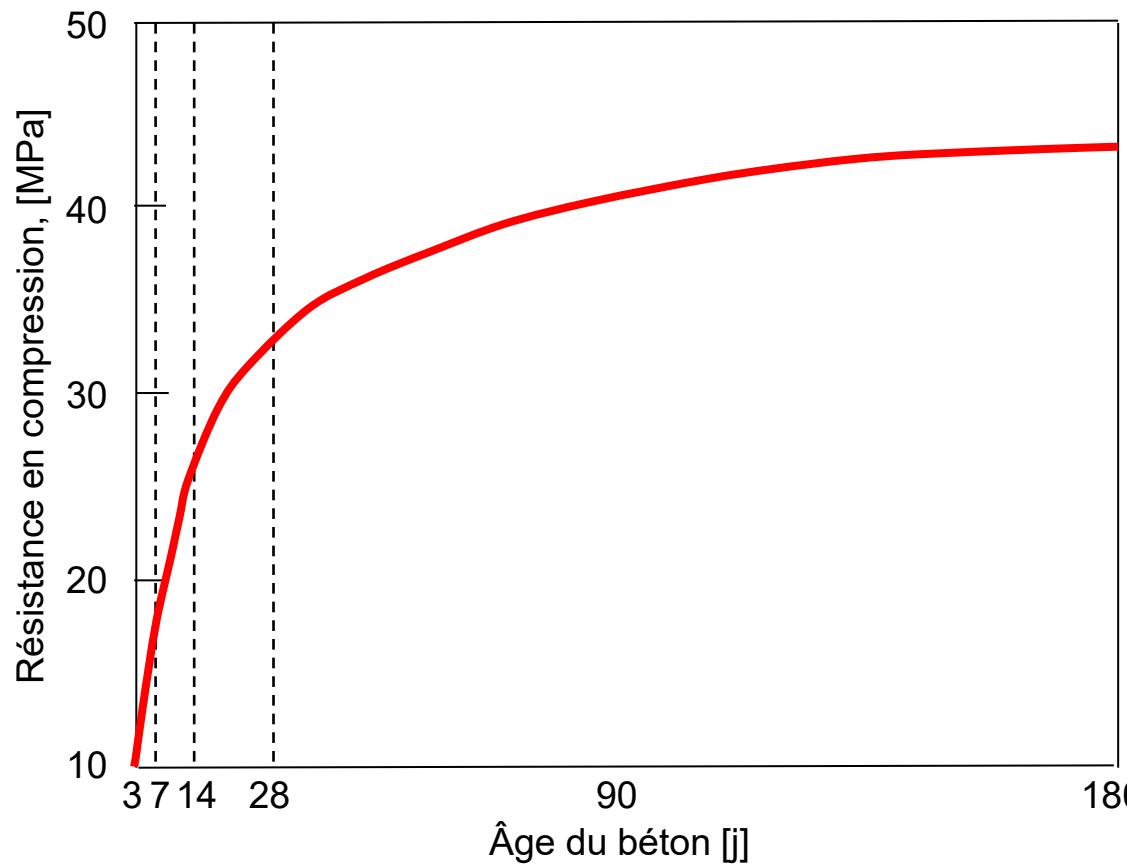
- L'âge du béton



- Le processus d'**hydratation** continue tant qu'il y a de l'eau et des anhydres (ciment et ajouts qui n'ont pas réagi)

# Les paramètres qui influencent la résistance du béton

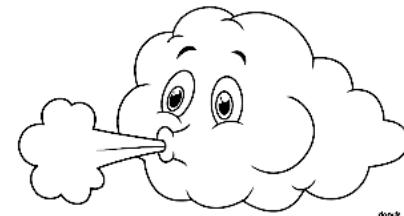
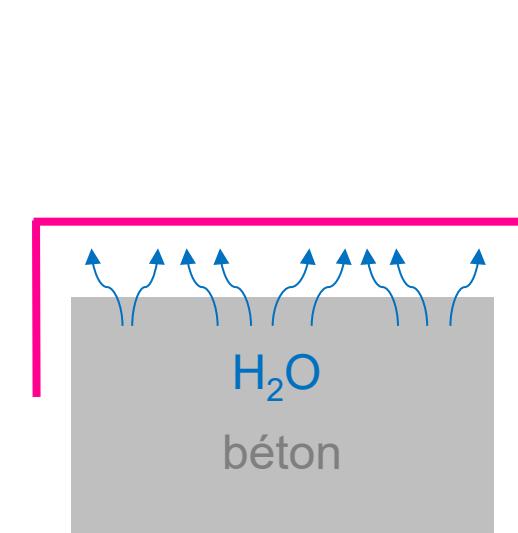
- L'âge du béton



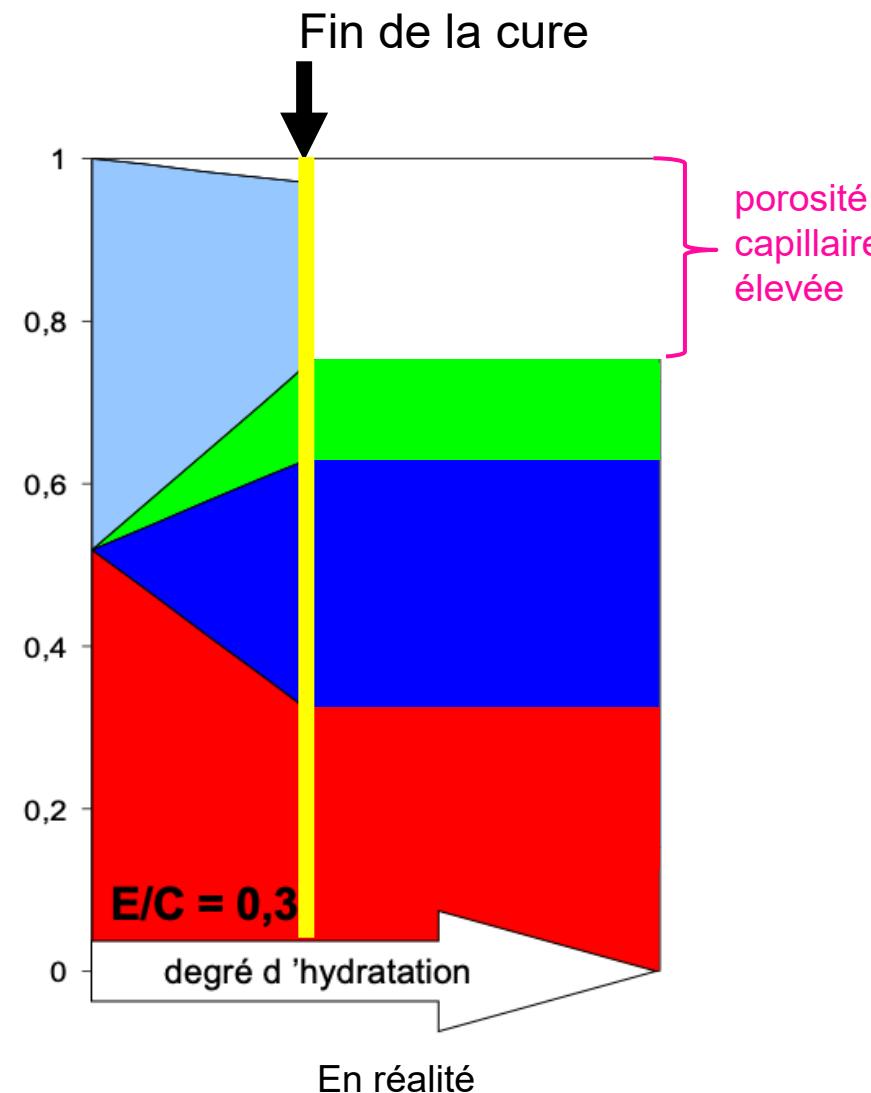
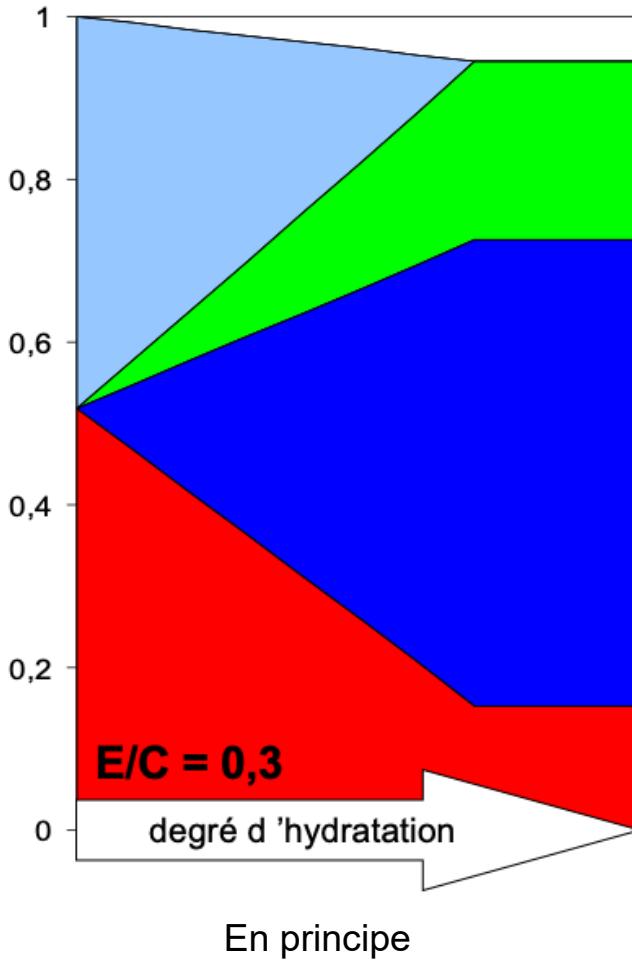
- Le processus d'**hydratation** continue tant qu'il y a de l'eau et des anhydres (ciment et ajouts qui n'ont pas réagi)
- La formation d'**hydrates** **densifie la matrice et diminue la porosité capillaire**
- Comment s'assurer que ces réactions se passent dans les meilleures conditions ?
  - La cure du béton

## La cure du béton

- La cure du béton est la protection mise en œuvre pour éviter une dessiccation de surface du béton (évaporation de l'eau du mélange), pour lui assurer une hydratation optimale et donc favoriser son bon durcissement.
- Protection contre l'évaporation
- Garantie de bonnes propriétés mécaniques et de durabilité



## La cure du béton



- Si la fin de la cure du béton est prématuée, ses **propriétés mécaniques ET de durabilité** risquent d'être réduites, voir insuffisantes, surtout en surface

## La cure du béton

- Estimation de la perte d'eau par séchage

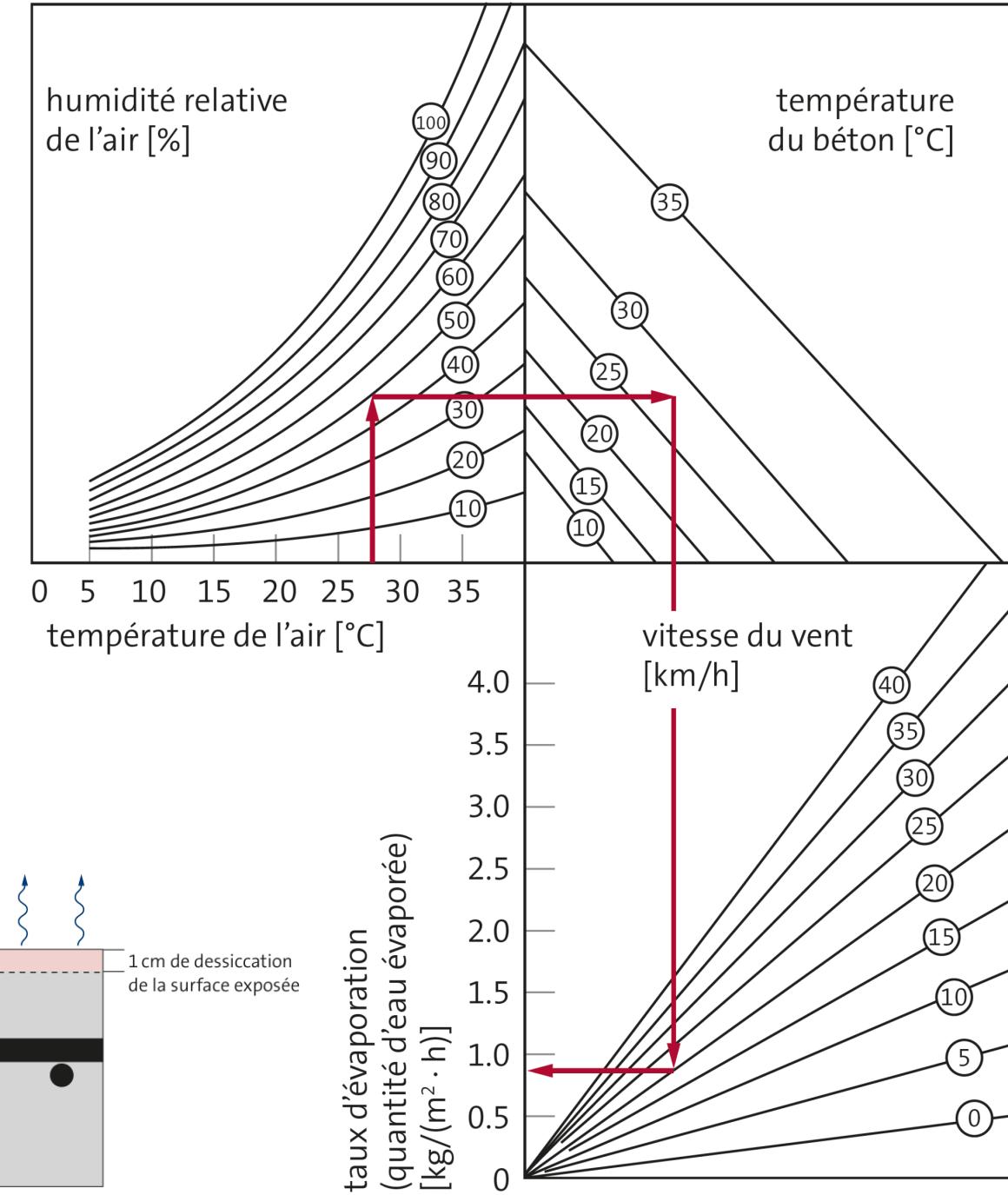
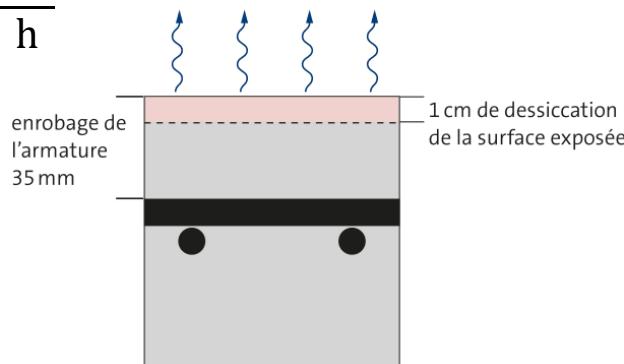
- Température de l'eau = 28°C
- Humidité de l'air = 50%
- Température du béton frais = 28°C
- Vitesse moyenne du vent = 20 km/h
- **Taux d'évaporation = 0.8 kg/(m<sup>2</sup>.h)**

- Conséquences pour le béton

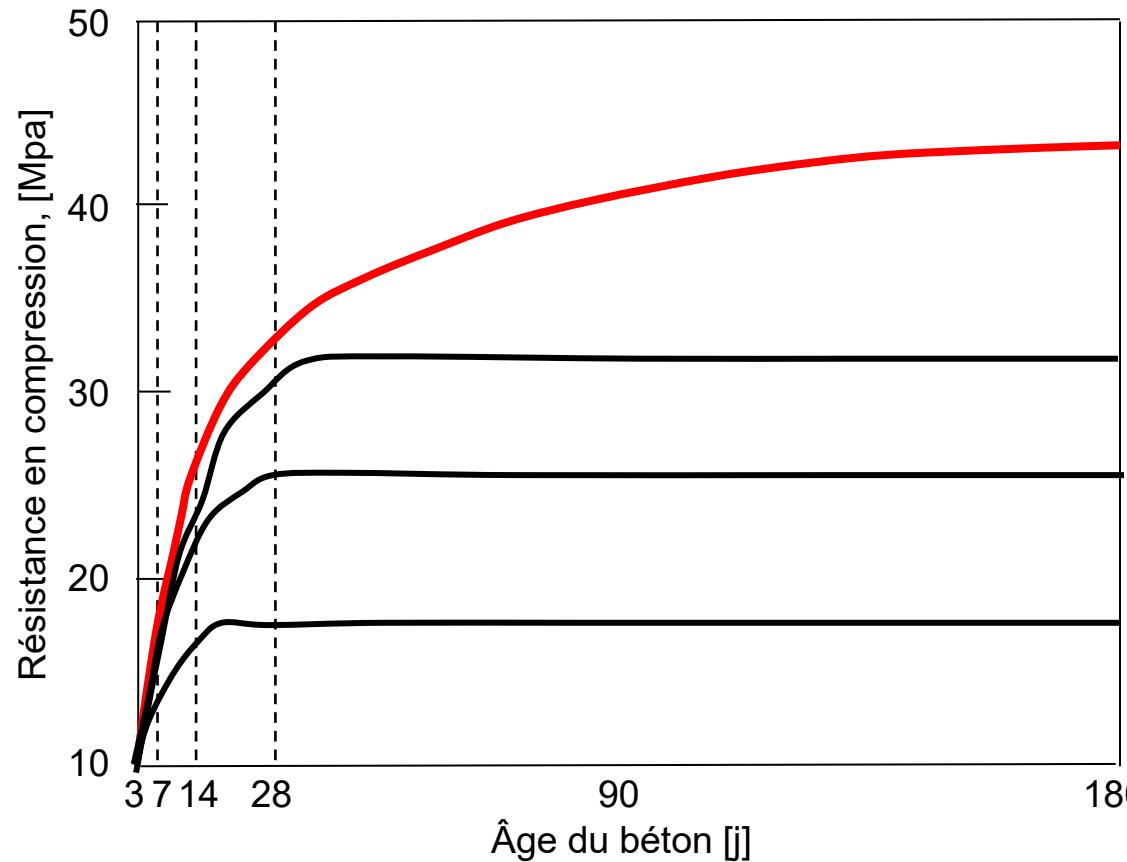
- Teneur en eau = **165 kg/m<sup>3</sup>** (= 1.65 kg/cm sur 1m<sup>2</sup>)

$$\frac{165 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}}{0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^3} = 206 \frac{\text{h}}{\text{m}} = 2.1 \frac{\text{h}}{\text{cm}} \left( = \frac{1.65}{0.8} \right) = 0.5 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

- L'armature est à 35 mm de profondeur
  - Le séchage l'atteint en 7h
  - Temps de prise ~5-6h
- Fonction de protection compromise



## La cure du béton



Durée de la cure sur  
une éprouvette de  
laboratoire (cube)

En permanence

7 jours

3 jours

<1 jour

- Le durcissement cesse dès qu'il n'y a plus d'eau à disposition
- Le durcissement se prolonge bien au-delà de 28 jours

# La cure du béton

- Mauvaise cure
  - Retrait plastique ou de séchage



Retrait plastique  
Réseau de  
fissures irrégulier,  
fissures  
discontinues



Retrait de séchage  
Fissures espacées  
régulièrement



- Perte en durabilité

# Méthodes de cure du béton

## Maintien dans le coffrage

- Méthode très simple et efficace
  - Surtout pour des éléments verticaux ou voiles
- Humidifier les coffrages absorbants (bois)
- Protéger les coffrages métalliques de l'ensoleillement
  - Déformations thermiques
  - Gradients de température
- Prolongation des délais de décoffrage
  - Augmentation des coûts
  - Immobilisation des coffrages



# Méthodes de cure du béton

## Arrosage continu

- Permet d'éviter une montée en température à la surface



- Méthode répandue
  - Pas besoin de matériel spécifique
- L'eau doit être vaporisée
  - Peut être automatisé
- Risque de choc thermique si l'arrosage n'est pas régulier



# Méthodes de cure du béton

## Aspersion d'un produit de cure

- Très efficace si correctement appliquée
  - Couche de protection
- Généralement à base de paraffine
  - Ou polymère dans un solvant
- A appliquer sur du béton humide
- Attention à la compatibilité avec des enduits ultérieurs
  - N'est pas retiré à la fin de la cure



# Méthodes de cure du béton

## Recouvrement par des toiles

- Matériel facilement disponible
  - Natte textile ou plastique
- Bon rendu pour les éléments apparents
  - En particulier avec le géotextile
  - Adapté aux surfaces non planes
- Les toiles doivent être maintenues en place
- La mise en place et le retrait des toiles demandent du temps (impact sur le coût)
- Risque de marques par la feuille plastique



Feuille plastique

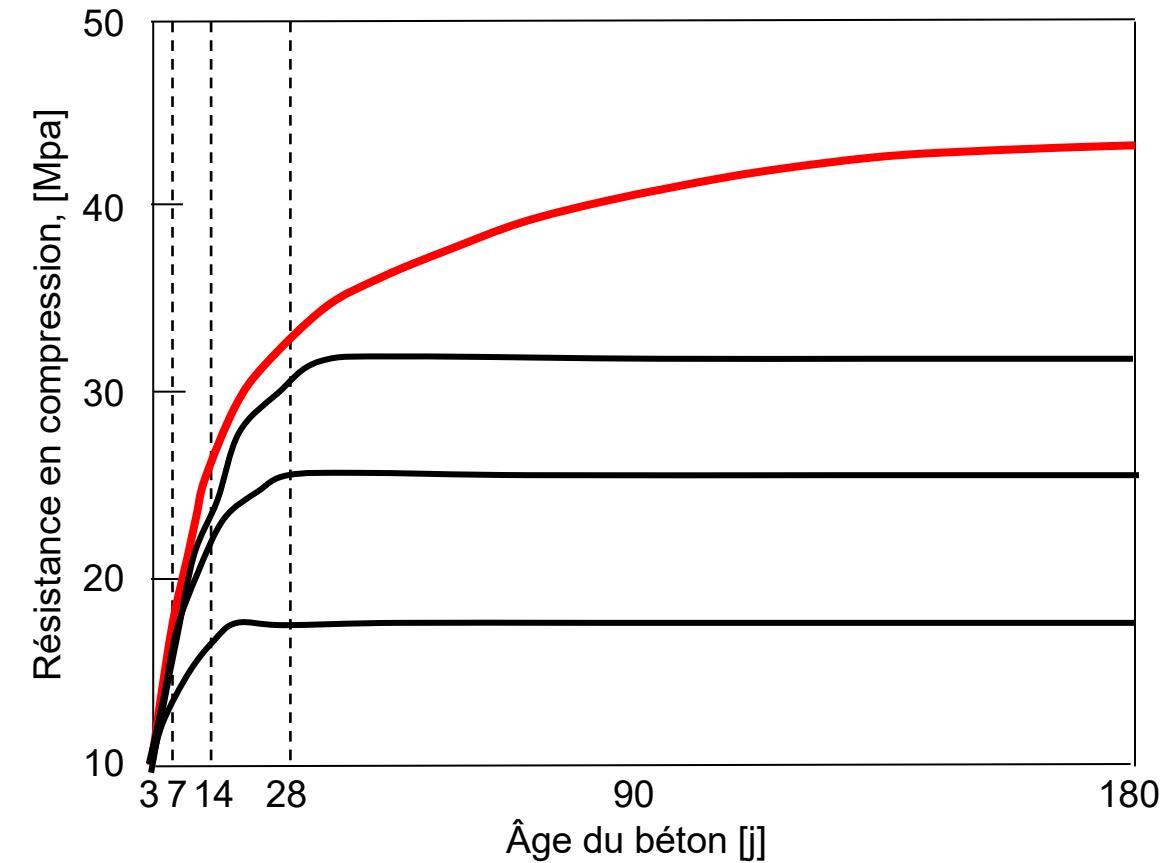


Natte humide

## Bénéfices de la cure du béton

- **Effets d'une cure adaptée sur le béton durci**

- Réduction / élimination de la **fissuration au jeune âge**
- Accélération / augmentation des **propriétés mécaniques**
- Amélioration de la résistance à l'**usure**
- Amélioration de la **durabilité**
- Amélioration de l'**étanchéité** à l'eau



# Aspects normatifs de la cure du béton

- SIA 262
- Spécifié dans le cahier des charges par l'ingénieur responsable
  - Spécification complémentaire
- Décoffrage ~ 24 hr
- + ~3-7 jours en conservation humide



# Aspects normatifs de la cure du béton

Classe d'exposition correspondante (chapitre durabilité ultérieur)

	XC2	XC4	XD3, XF4
Classes de cure (NBK)	1	2	3
Durée (en heures)	12 <sup>1)</sup>	–	–
Pourcentage de la résistance caractéristique à 28 jours	–	35%	50%
Exigences	aucune	usuelles	accrues
<sup>1)</sup> Tant que la prise du béton ne dure pas plus que 5 heures et que la température du béton à la surface vaut au moins 5 °C.			

# Aspects normatifs de la cure du béton

$$r = \frac{\text{résistance moyenne en compression à 2 jours}}{\text{résistance moyenne en compression à 28 jours}} = \frac{f_{cm,2}}{f_{cm,28}}$$

		Durée minimale de la cure [jours] <sup>1)</sup>								
Evolution de la résistance du béton à 20 °C selon SN EN 206-1		rapide			moyenne			lente		très lente
		$r \geq 0,50$		$0,50 > r \geq 0,30$			$0,30 > r \geq 0,15$		$r < 0,15$	
Classe de cure (NBK)		2	3	4	2	3	4	2	3	4
Température de la surface du béton <sup>3)</sup> [°C]	$T \geq 25$	1,0	1,5	3	1,5	2,5	5	2,5	3,5	6
	$25 > T \geq 15$	1,0	2,0	5	2,5	4	9	5	7	12
	$15 > T \geq 10$	1,5	2,5	7	4	7	13	8	12	21
	$10 > T \geq 5$ <sup>2)</sup>	2,0	3,5	9	5	9	18	11	18	30
<p><sup>1)</sup> Pour une durée d'ouvrabilité (période de temps durant lequel le béton est compacté avec les appareils prévus sur le chantier) de plus de 5 h, la durée de cure doit être prolongée de façon adéquate</p> <p><sup>2)</sup> Pour des températures &lt; 5 °C, la durée de la cure doit être prolongée du temps durant lequel la température est restée &lt; 5 °C</p> <p><sup>3)</sup> La température de l'air mesurée le matin à 07.00 heures à l'ombre peut être utilisée en alternative.</p>										

# Aspects normatifs de la cure du béton

- Indications du cahier technique

Tableau 3 : types de cure selon le cahier technique du ciment B 8 „Cure du béton”

Type	Mesures à prendre	Température de surface-, de l'air [°C]					
		< -3	-3 - +5	5 - 10	10 - 15	15 - 25	> 25
Feuille plastique ou produit de cure	Eau +	en outre : <ul style="list-style-type: none"> <li>- arroser le coffrage en bois</li> <li>- protéger du soleil le coffrage métallique</li> </ul>				(X) <sup>2</sup>	X
		le cas échéant, mesures supplémentaires (voir plus haut)		X	X	X	
	+ Isolation thermique	utilisation des coffrages avec capacité d'isolation thermique (par ex. en bois), couvrir les coffrages métalliques avec des nattes thermiques		X <sup>1</sup>			
		recouvrir le lieu de travail, évt. chauffage (par ex. radiateur) en outre : $T_{béton}$ au moins 3 jours $\geq +10 °C$	X				
Maintenir un film d'eau visible en permanence à la surface du béton				(X)	X	X	
1) ne pas humecter ; protéger de la rosée / de l'eau de pluie							
2) convient en cas de conditions défavorables (par ex. vent fort) et pour les classes d'exposition XD, XF							

## L'essentiel – quelques questions

- En Suisse, comment les propriétés de résistance à la compression sont elles testées pour certifier une recette de béton?
- Dans quelle norme les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons sont elles définies?
- Comment se propagent les fissures lors de la mise en compression d'un béton standard? Pourquoi?
- Quel est le paramètre ayant le plus d'impact sur la résistance à la compression d'un béton? Comment l'améliorer?
- A quoi faut-il surtout faire attention lors de la mise en place d'un béton pour conserver ses propriétés de durabilité et mécaniques? Comment?