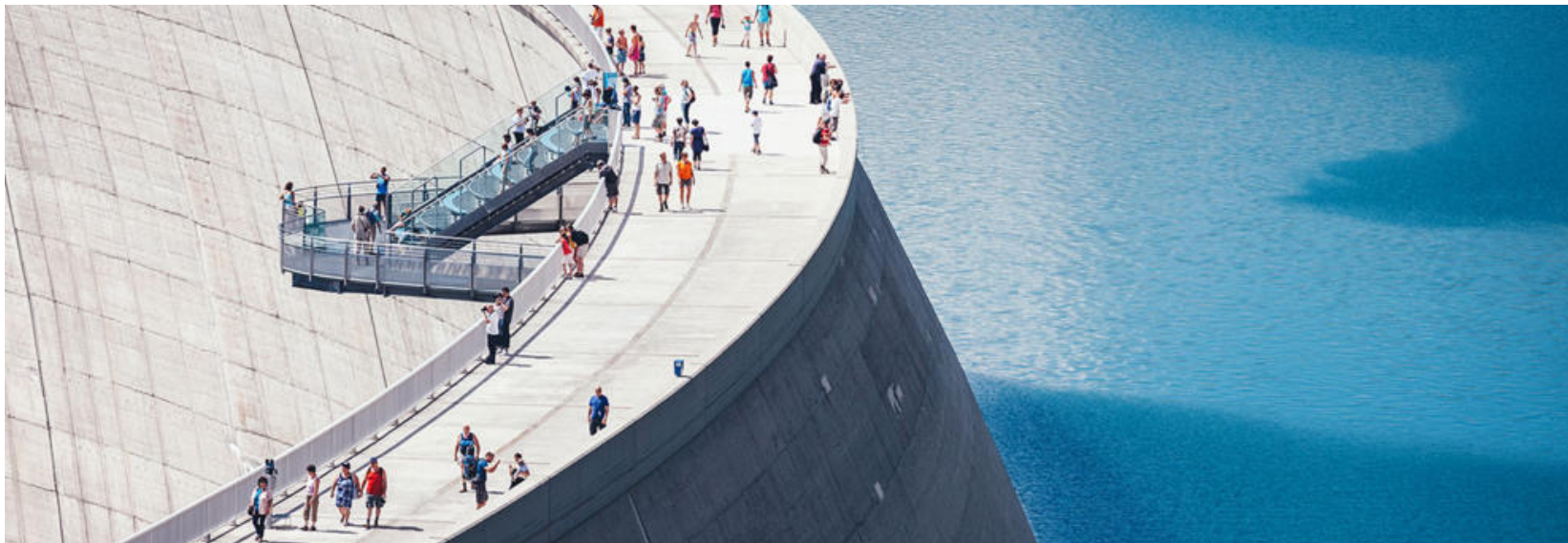

Concevoir un béton durable

Prof. Karen Scrivener
Laboratoire des Matériaux de Construction

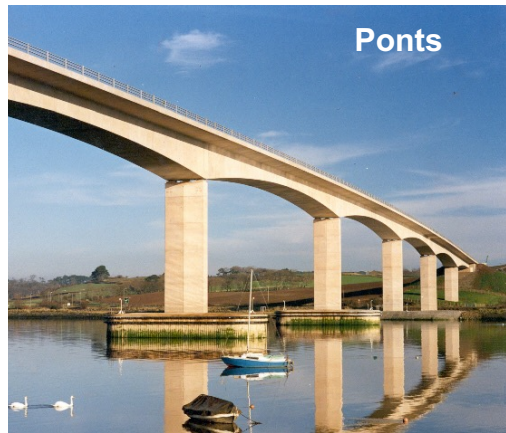
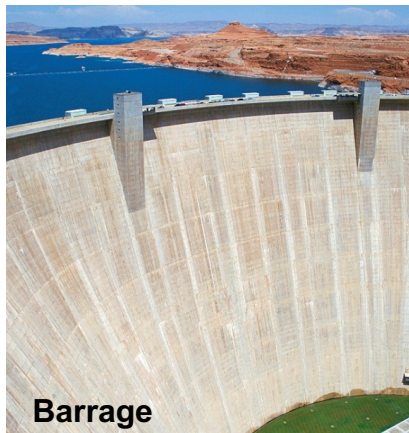
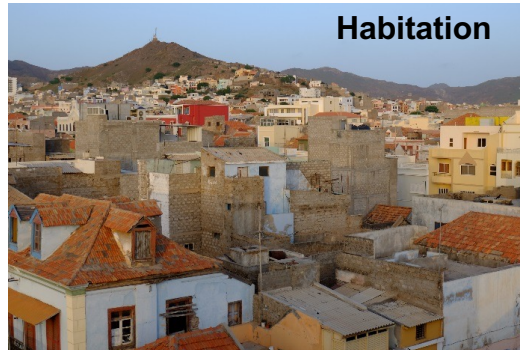


Sommaire

1. Introduction, Applications
2. Les composants du béton
 1. Granulats/Sable
 2. Eau
3. Dosage eau/ciment
4. Tests de contrôle
5. Malaxage du béton
6. Compactage
7. Cure
8. L'essentiel du cours

1. Introduction

Où trouve-t-on du béton?



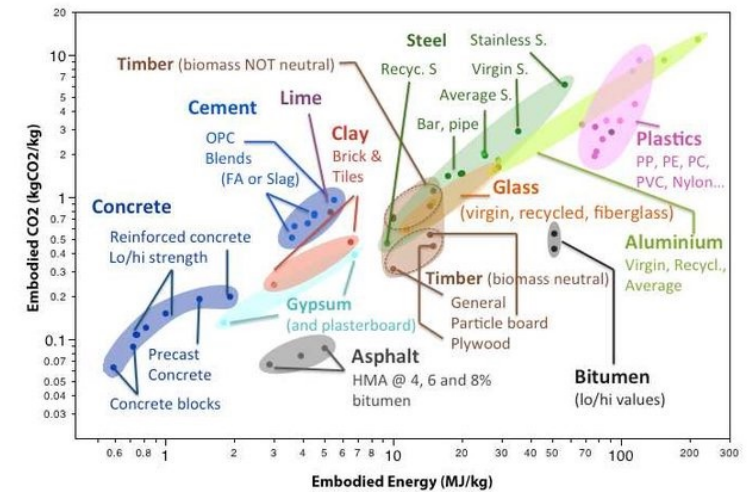
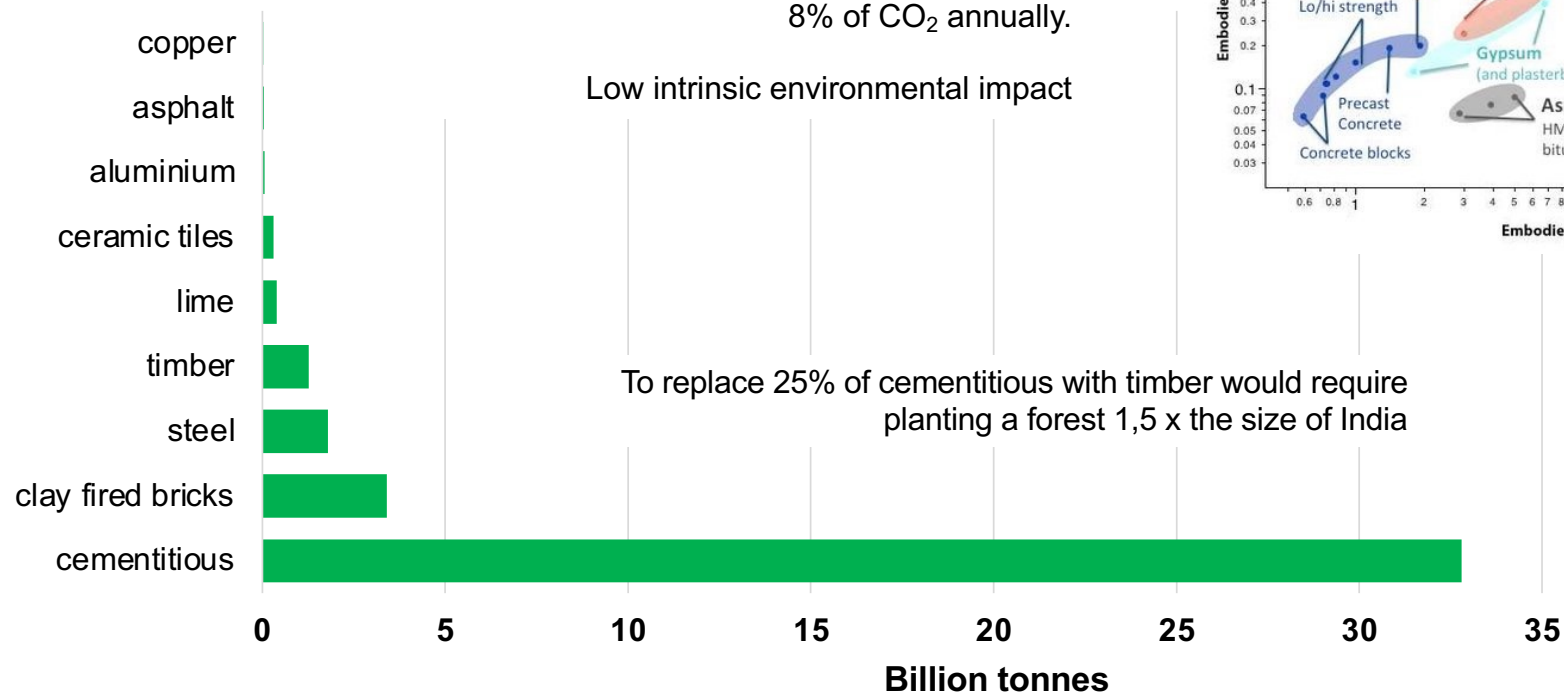
1. Introduction

Cementitious materials make up >50% of everything we produce.

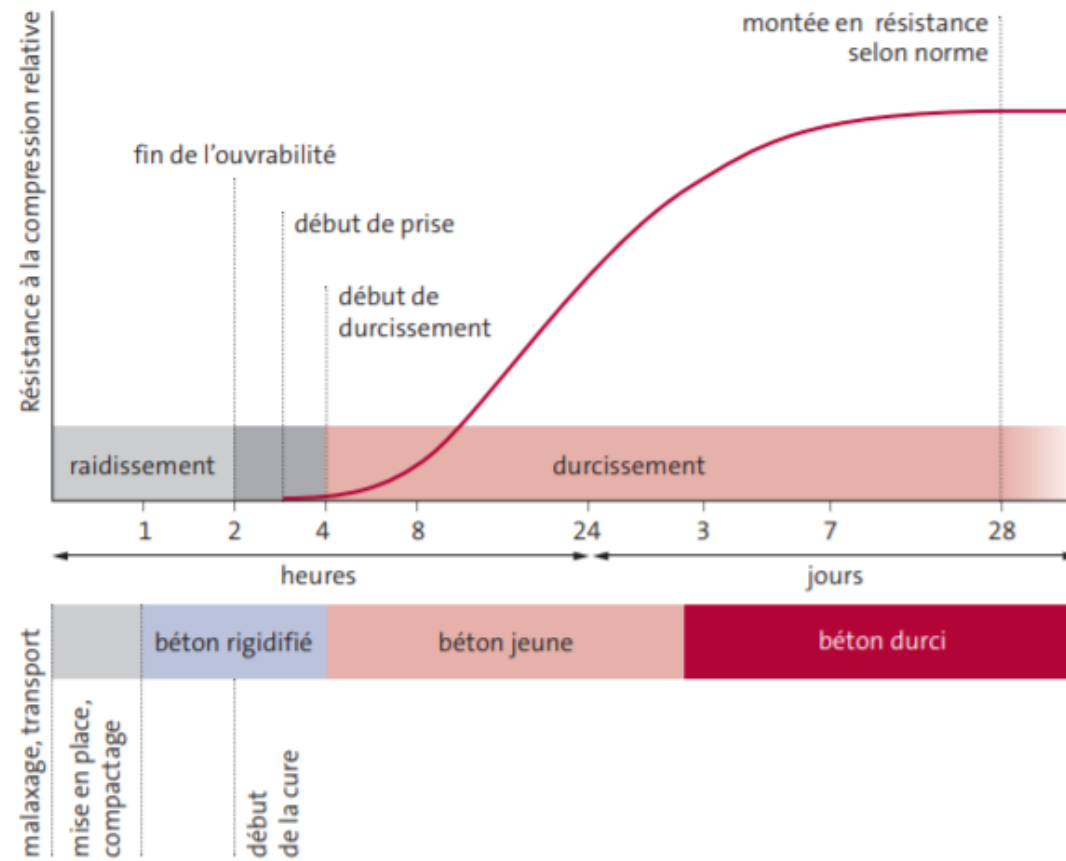
It is only for this reason they account for 8% of CO₂ annually.

Low intrinsic environmental impact

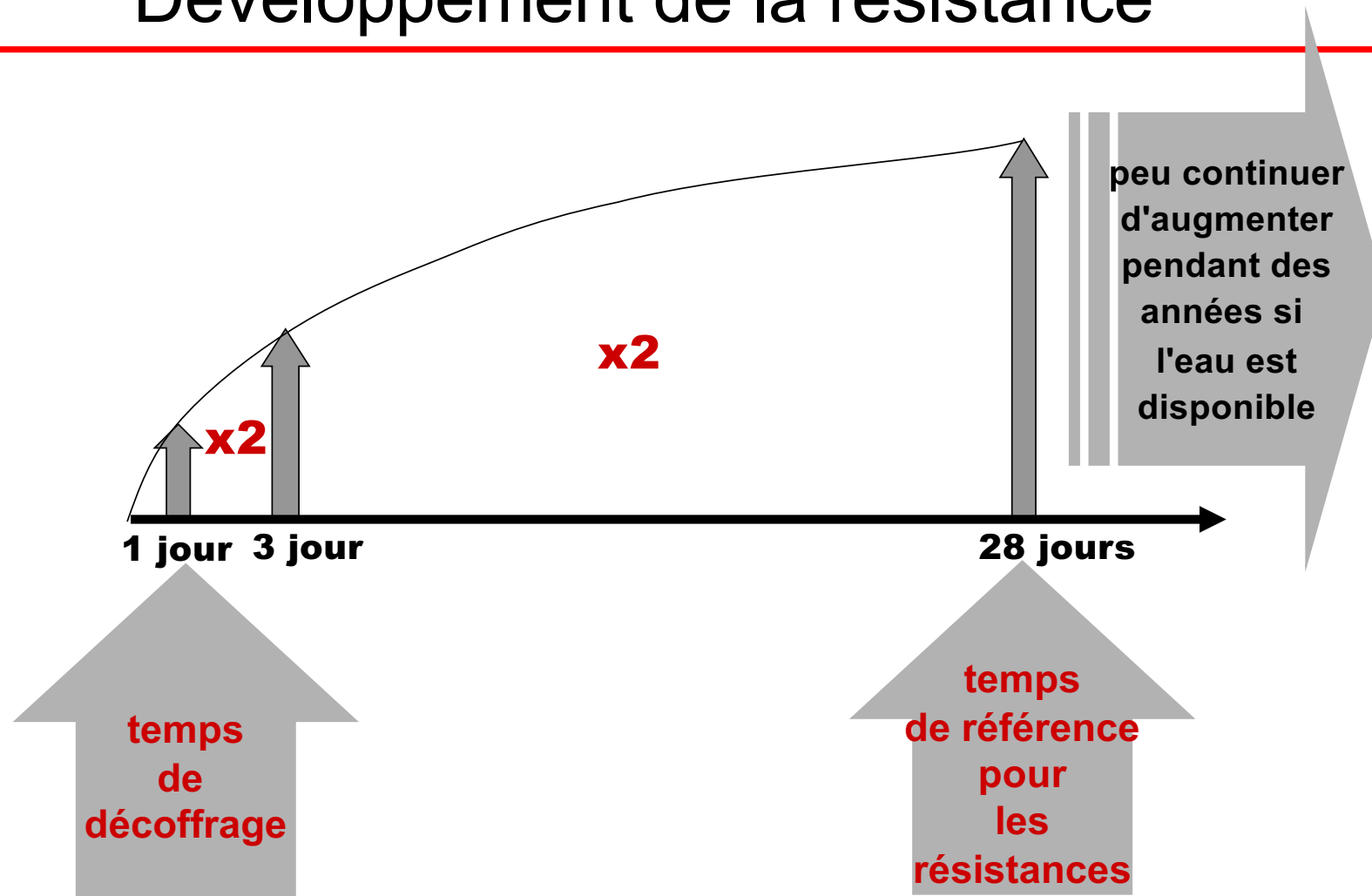
To replace 25% of cementitious with timber would require planting a forest 1,5 x the size of India



1. Introduction



Développement de la résistance



2. Les composants du béton



Ciment

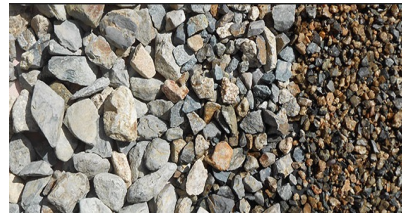
Granulats

Eau

Adjuvants



+



+



+



2. Les composants du béton



Ciment

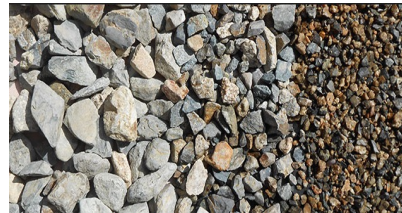
Granulats

Eau

Adjuvants



+



+



+



Et de l'air!

2. Les composants du béton

Un béton est donc composé de:

- **un squelette = les granulats**
- **une colle = la pâte de ciment**
- **la liaison (l'interface) entre les deux**

**Sa qualité dépend de la qualité de tous les trois =
minimum de vides**

2.1. Les granulats: production

~75% du volume
de béton est
composé de
granulats



2.1. Les granulats: production

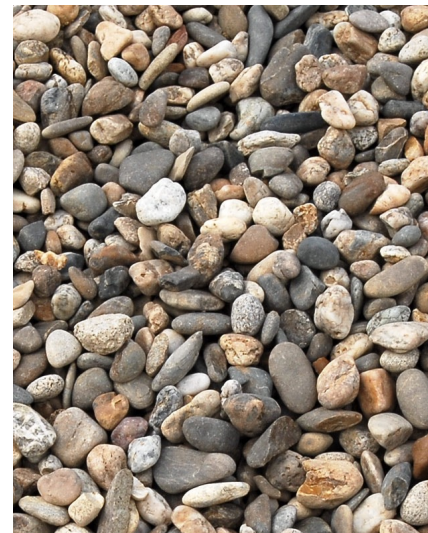
Les granulats utilisés pour la production de béton doivent satisfaire aux exigences de la norme SN EN 12620 «Granulats pour béton»

On distingue :

Granulats concassés



Granulats roulés



2.1. Les granulats roulés

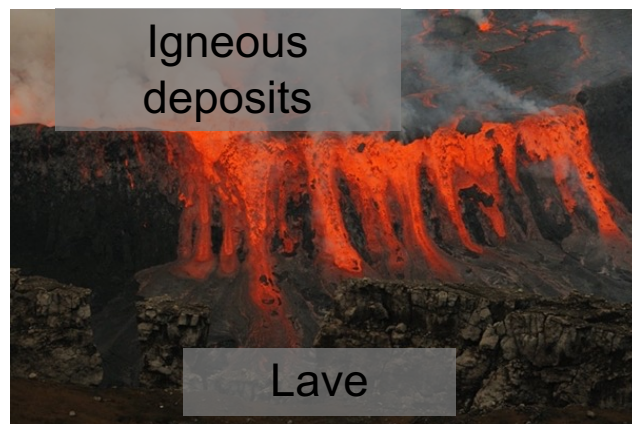
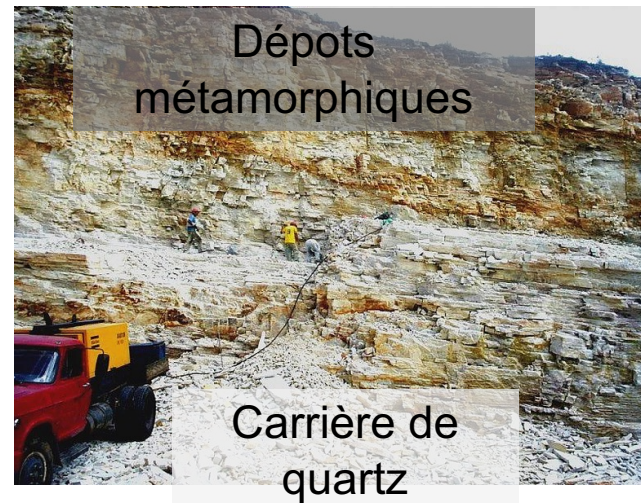


De glaciers



Lacustres

2.1. Les granulats concassés



2.1. Les granulats

Les granulats doivent être propre! Attention au stockage



2.1. Granulats dans le monde



Denis Delestrac, 2014

<https://vimeo.com/ondemand/sandwars/>



2.1. Granulats dans le monde

Alternative au sable de rivière: le sable broyé



Ce sable est produit à partir de roches granitiques broyées.

- ✓ Large ressources
- ✓ Réduit les couts de transport
- ✗ Mais il faut ajuster les formulations!

2.1. Les granulats:

3 bonnes raisons de remplir au maximum de bons granulats

- **Aspect économique**
- **Aspect mécanique**
- **Aspect physique**

2.1. Les granulats:

Aspect économique:

Les granulats sont nettement moins chers que le ciment (~5x)

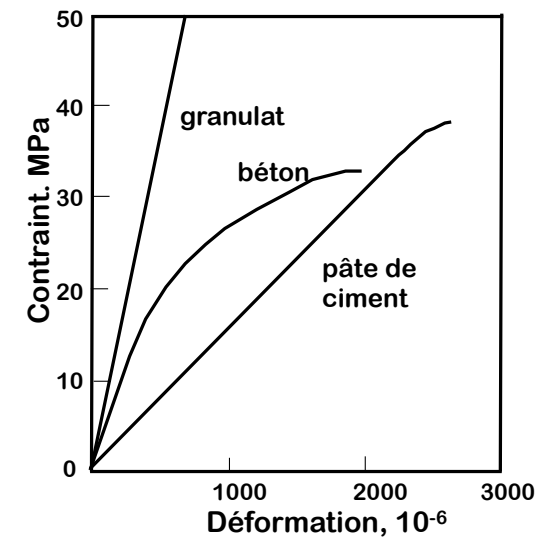
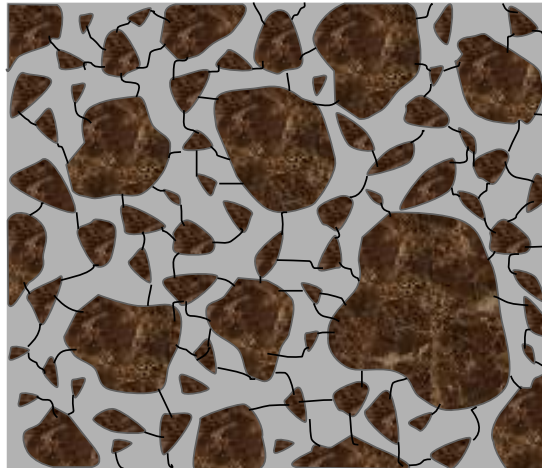
2.1. Les granulats:

Aspect mécanique:

**Les granulats limitent la propagation des fissures
Comportement moins « fragile »**

Et le retrait (changement de volume)

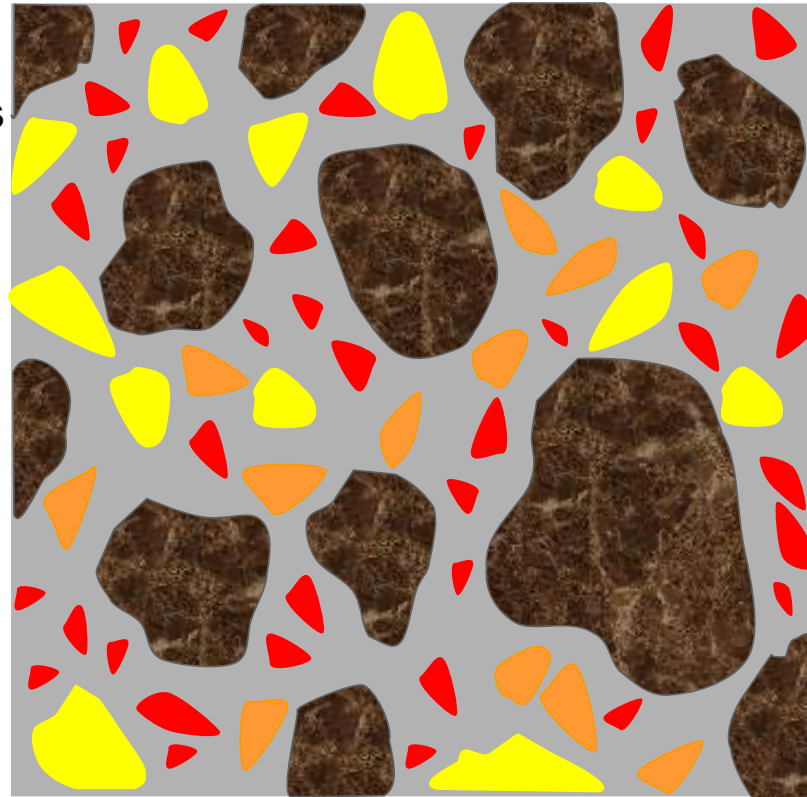
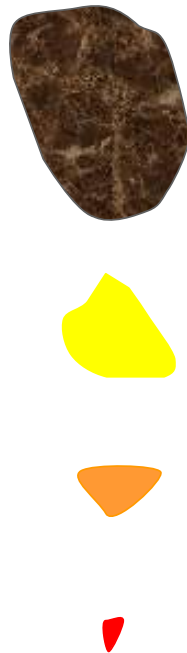
Les granulats limitent la longueur des fissures:
plus de fissures,
mais
plus fines et plus
courtes



2.1. Les granulats:

Aspect physique: remplissage

**Les petits peuvent remplir
les espaces entre les grands**

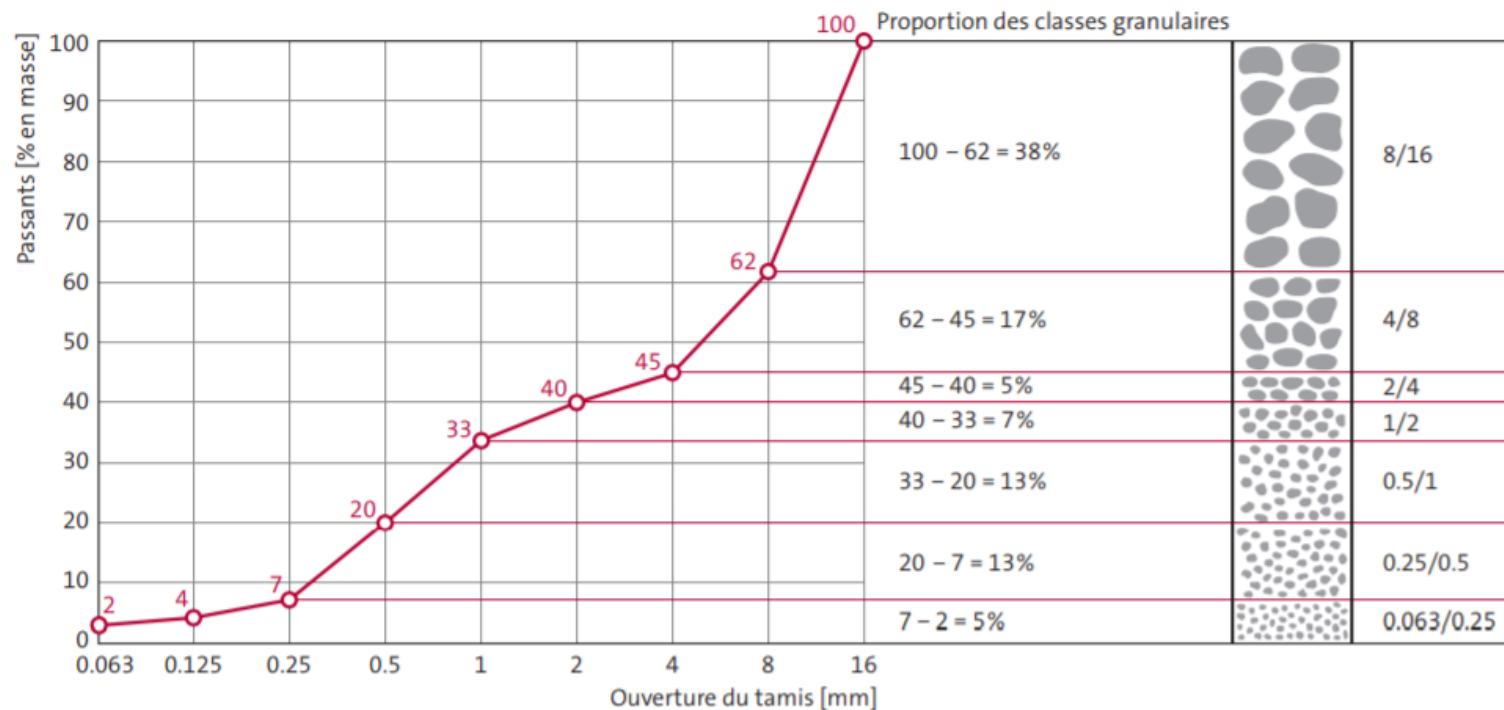


(connu par les romains)

2.1. Les granulats: remplissage

A savoir
pour le
TP

Exemple de courbe de granulometrie pour avoir les bonnes proportions de taille de granulats et sable



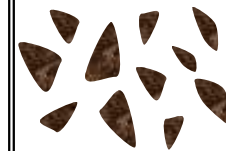
Source: Guide pratique du béton. Holcim

2.1. Les granulats: taille maximale



La taille maximum
des granulats
est déterminée par
la taille de la pièce
de béton

Le diamètre
maximum doit
être moins de
un cinquième de la
taille de la pièce



Ex. mur du 150 mm, taille max ~30 mm





2.1. Granulats: impact sur la fluidité

La forme et taille des granulats changent la teneur en eau

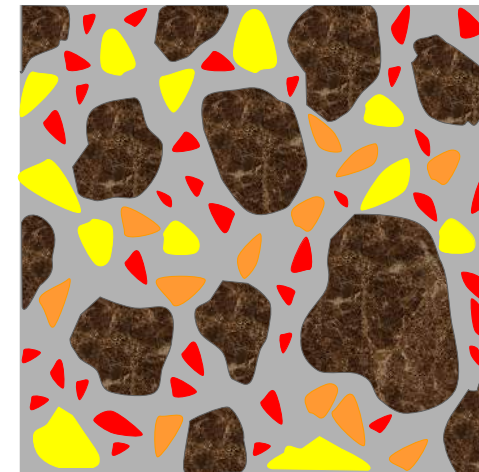
Fig. 1.3.15:
Béton frais avec
une teneur trop
basse (gauche), une
teneur optimale
(centre) et une
teneur trop élevée
(droite) en sables.







Diamètre maximal du granulat	8	16	22.5	32	45	63
Teneur en farine [kg/m ³ béton]	450	400	375	350	325	300

Tab. 1.3.6: Valeurs recommandées de teneur en farine en fonction de la dimension maximale du granulat.

Tous les composants du béton avec des dimensions $\leq 0.125\text{mm}$ sont comptés parmi les farines. Les farines agissent comme un **lubrifiant** dans le béton.



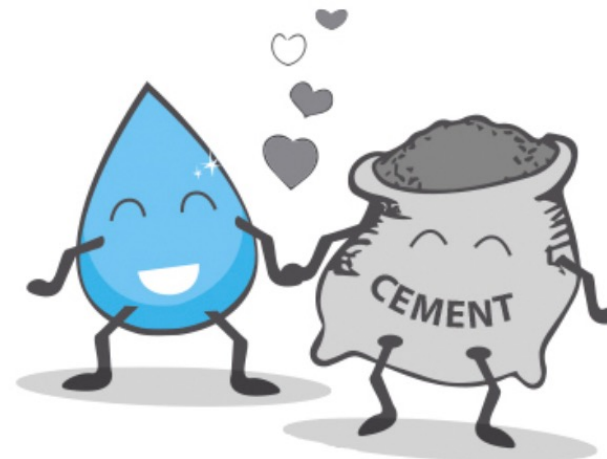
2.1. Granulats: impact sur la fluidité

	granulats roulés			
forme	sphériques	aplatis / allongés	cubiques	aplatis / allongés
				
angularité	arrondis		anguleux	
état de surface	lisses		rugueux	
besoin en eau	<div><div></div><div>croissant</div><div>→</div></div>			
ouvrabilité aptitude au compactage	<div><div></div><div>décroissant</div><div></div></div>			

2.2. Rôle de l'eau

L'eau est un élément essentiel au béton:

- Aspect **chimique**: hydratation (plus de détails dans le prochain cours)
- Aspect **mécanique**: développement de la résistance au cours du temps
- Aspect **rhéologie**: fluidité

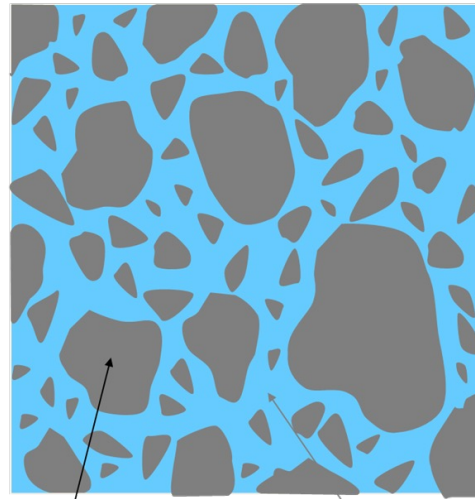


2.2. Rôle de l'eau

Le béton **ne sèche pas** mais **s'hydrate** → c'est une réaction chimique du ciment avec l'eau qui forme des hydrates

Ciment + eau → hydrates (pâte de ciment)

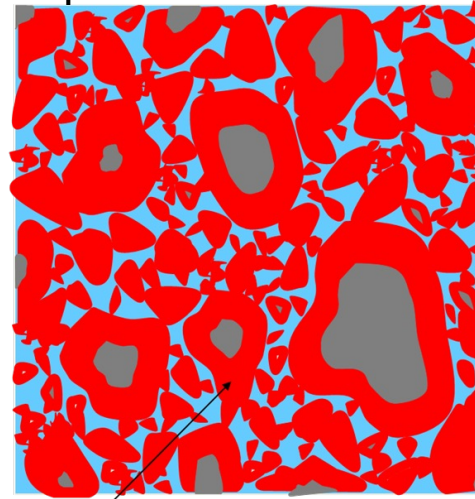
Avant



Grain de ciment

eau

Après



hydrates

2.2. Rôle de l'eau

Anhydres + eau \Rightarrow hydrates

L'eau est combinée dans les hydrates

L'hydratation continue seulement s'il y a de l'eau disponible.

2.2. Rôle de l'eau

Augmentation de volume solide

1 vol. ciment \rightarrow \sim 2 vols hydrate

La quantité d'eau ajoutée, relative au ciment
est exprimée en rapport e/c en poids

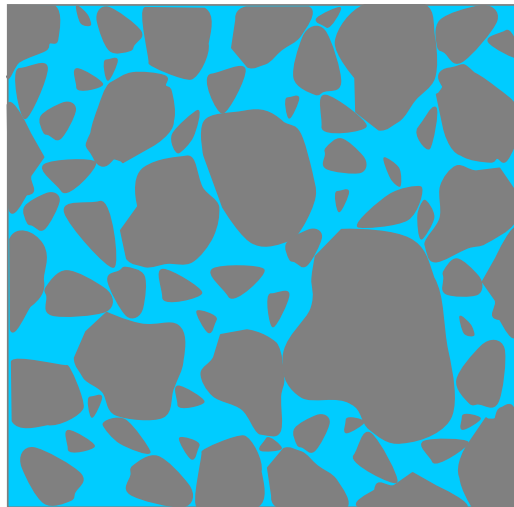
Si $e/c = 0.5$,
quel est le volume de ciment dans le mélange de départ?
(la densité de ciment $\sim 3 \text{ g/cm}^3$)

Quel est le volume de solide après hydratation?

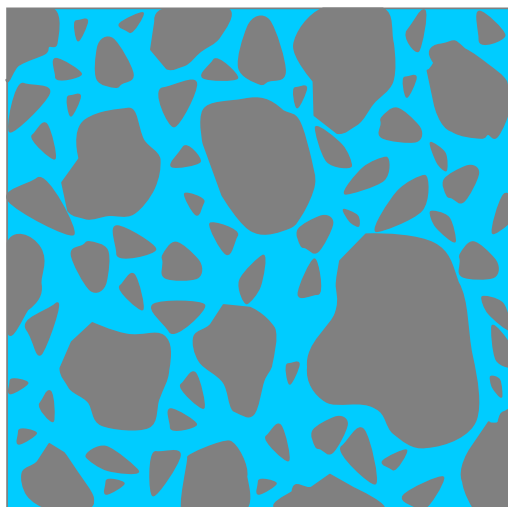
2.2. Rôle de l'eau: rapport eau/ciment

La quantité d'eau ajoutée contrôle l'espacement des grains de ciment

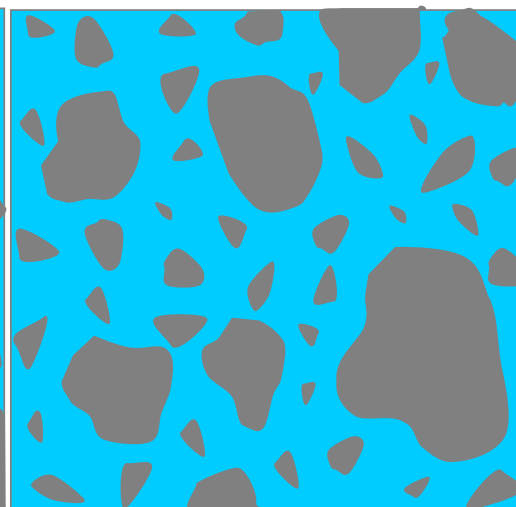
A savoir
pour le
TP



e/c bas
ex. 0.3
Vol. ciment ~ 50%

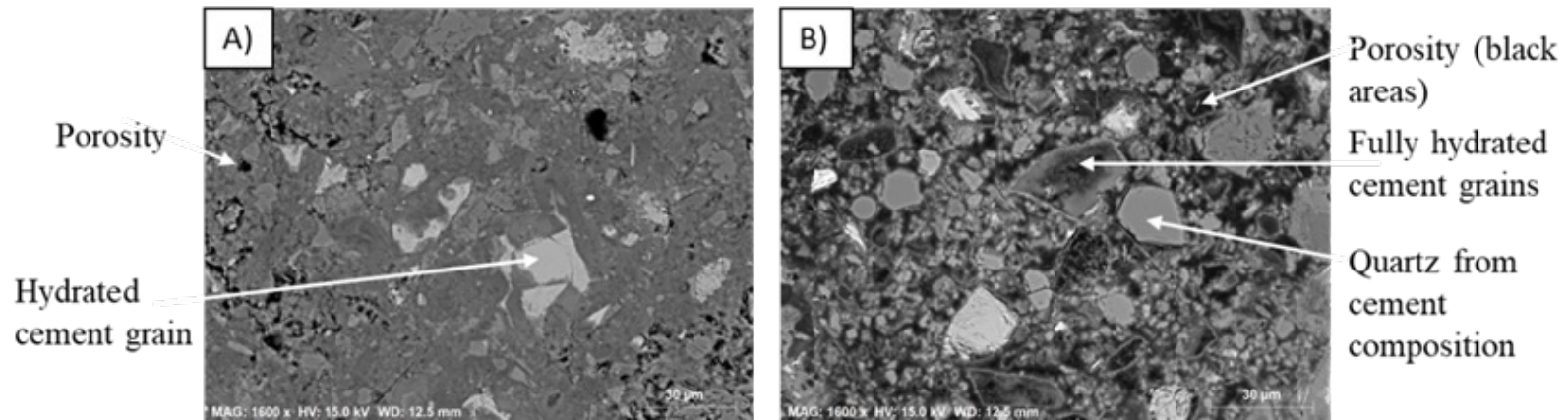


e/c moyen
ex. 0.45
Vol. ciment ~ 40%



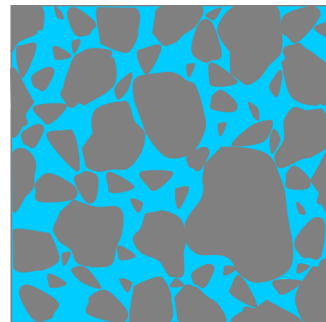
e/c élevé
ex. 0.6
Vol. ciment ~ 35%

2.2. Rôle de l'eau: rapport eau/ciment

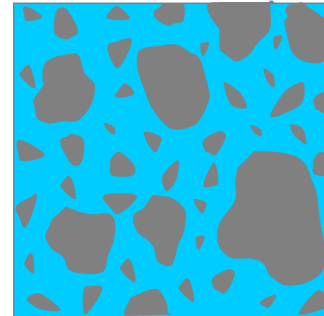


Echantillons réels

Schéma

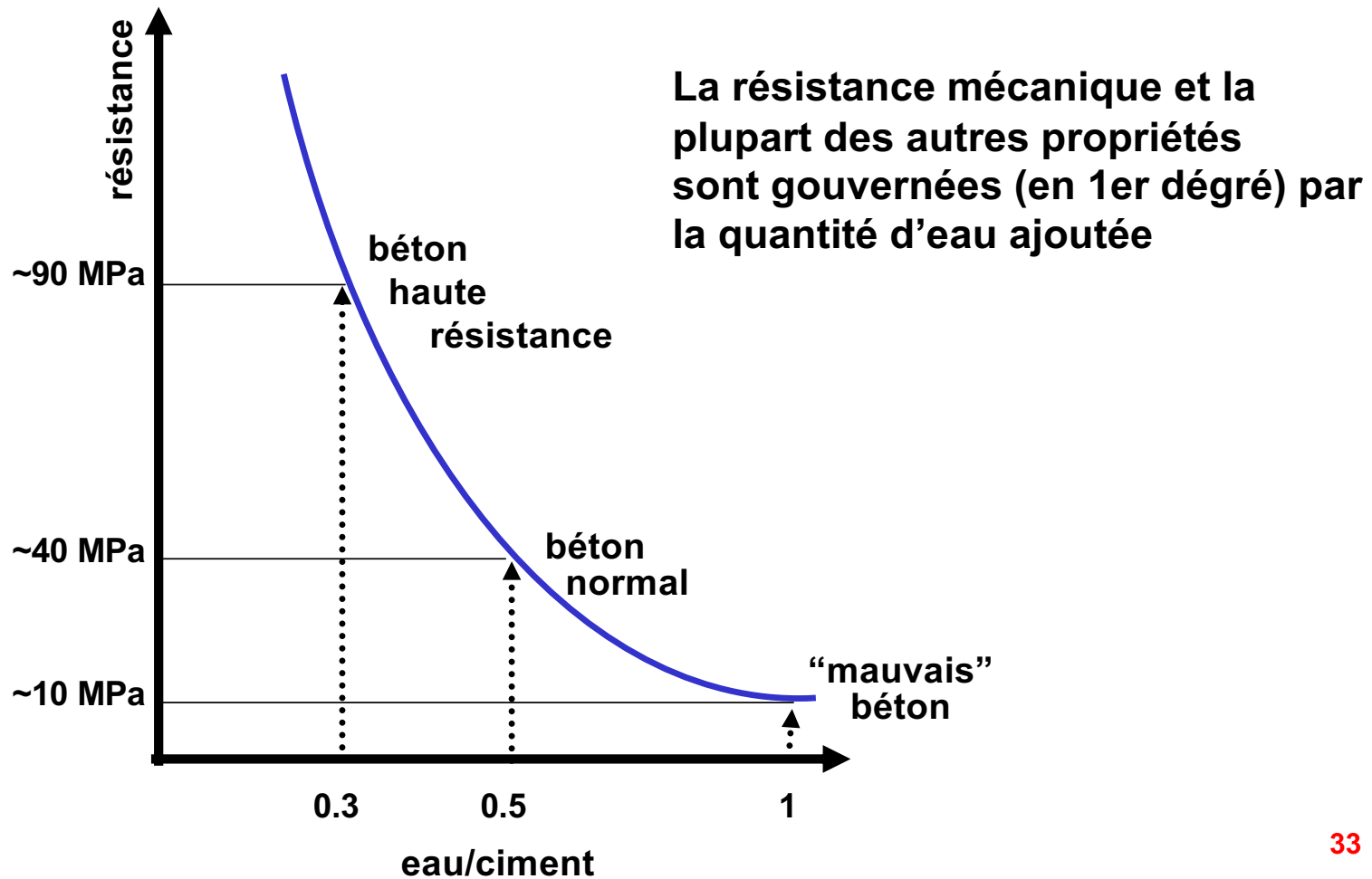


e/c bas
ex. 0.3
Vol. ciment ~ 50%

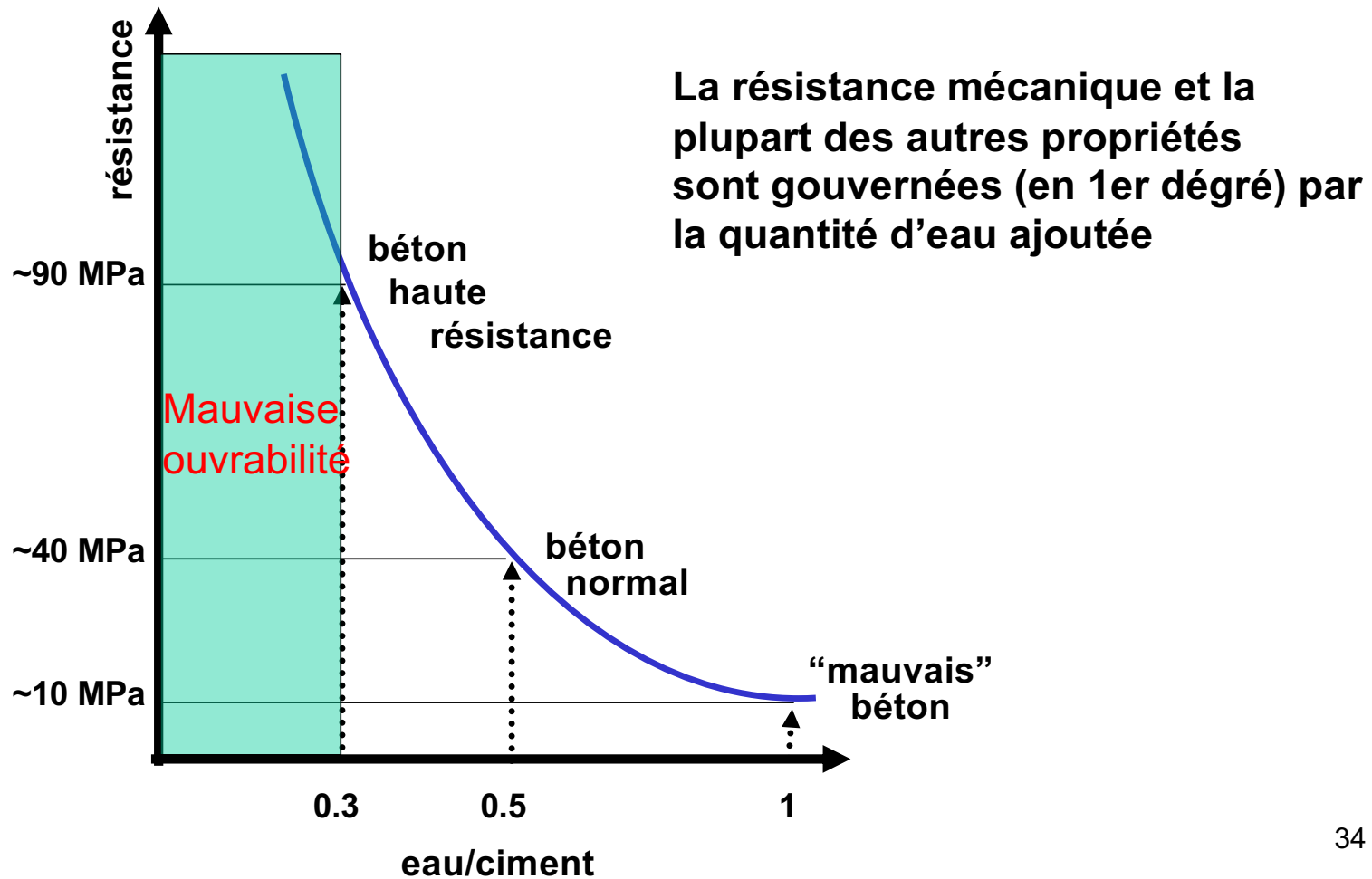


e/c élevé
ex. 0.6
Vol. ciment ~ 35%

2.2. Rôle de l'eau: rapport eau/ciment



2.2. Rôle de l'eau: rapport eau/ciment

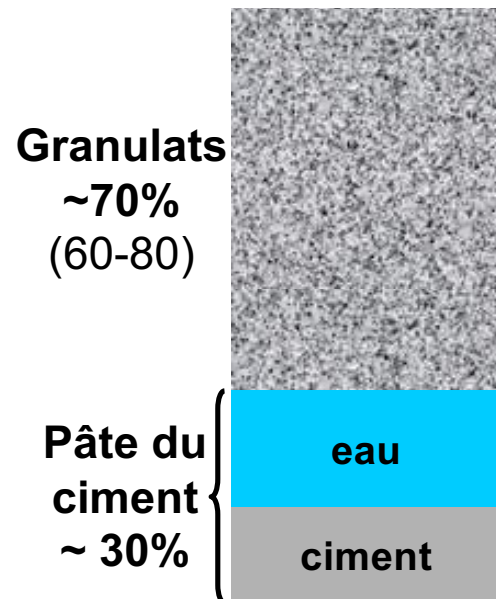


2.2. Rôle de l'eau: ouvrabilité

L'ouvrabilité peut être contrôlée par la quantité d'eau ajoutée



La pâte de ciment doit remplir les espaces entre les granulats



Quand le $e/c \downarrow$, il faut augmenter
« *le dosage en ciment* » pour garder
le même volume de pâte
qui donne la fluidité du béton

Normalement les formulations de béton
sont exprimées en poids pour faire **1m³**

Sortes de béton utilisées en Suisse

principaux

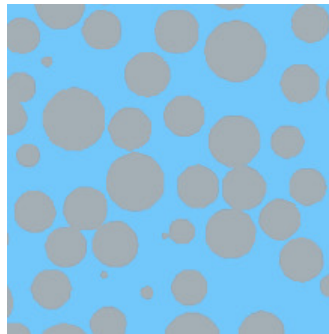
A savoir
pour le
TP

Désignation	Sorte 0 (zero)	Sorte A ¹⁾	Sorte B	Sorte C	Sorte D (T1) ^{2,3)}	Sorte E (T2) ³⁾	Sorte F (T3) ⁴⁾	Sorte G (T4) ⁴⁾
Exigences de base								
Classe de résistance à la compression	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
Classe 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 nominale maximale du granulat	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32
Classe de teneur en chlorures ⁵⁾	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10
Classe de consistance	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Exigences supplémentaires pour les classes d'exposition XF2 à XF4								
Résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage	néant	néant	néant	néant	moyenne	élevée	moyenne	élevée
Exigences supplémentaires (à spécifier selon l'objet)								
Résistance à la RAG	selon NA, chiffre 5.3.4							
Résistance aux sulfates	néant	néant	néant	selon NA, chiffre 5.3.4				
Exigences à la composition et aux essais								
Rapport E/C resp rapport E/C eq maximal (-)	-	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Dosage min. en ciment (kg/m ³) ^{a)}	-	280	280	300	300	300	320	320
Essais de durabilité	néant	néant	^{b)} , Rcarb	Rcarb	RCarb, GDS	RCarb, GDS	RCI-, GDS	RCI-, GDS
Autres exigences	SN EN 12620 :2002 contient les exigences aux granulats							

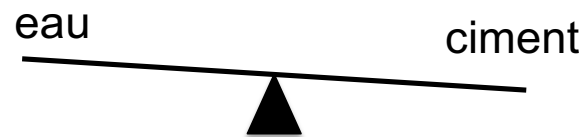
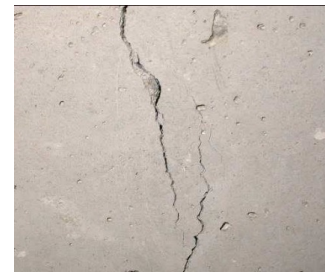
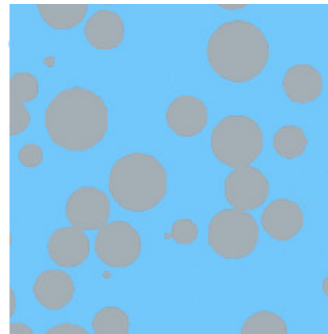
3. Dosage eau/ciment

Comment calculer le rapport eau/ciment optimal?

Pas assez d'eau:
Pas ouvrable, air coincé



Trop d'eau:
Fissures, réduction de la
résistance, ségrégation

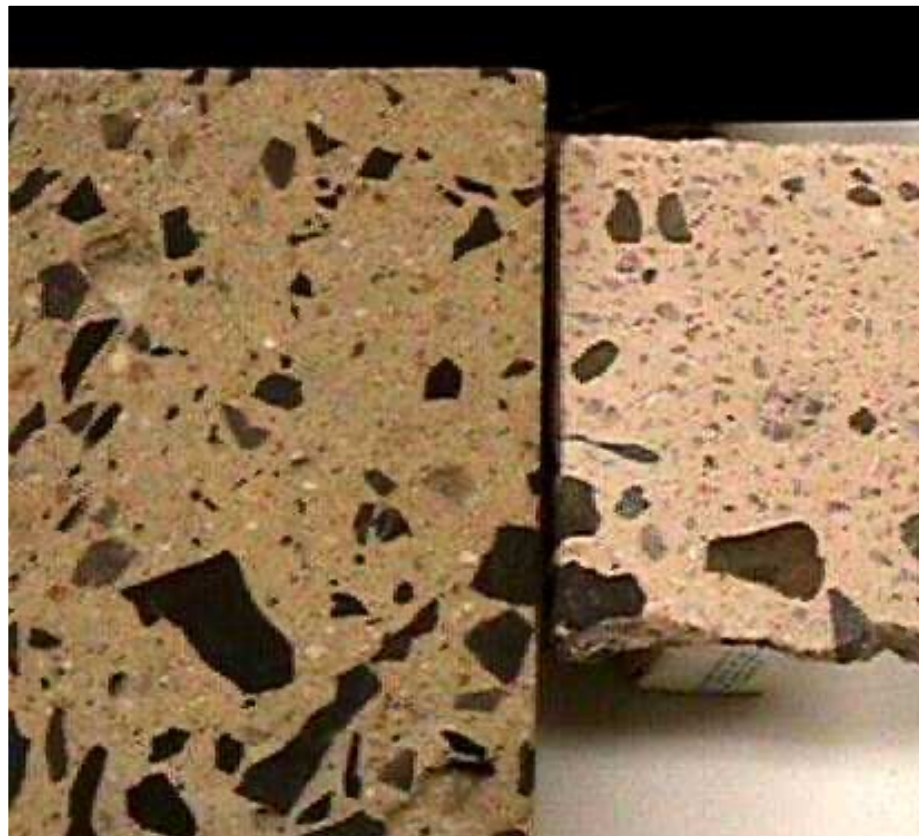


3. Dosage eau/ciment

Problèmes rencontrés si trop d'eau

Ségrégation:

Mauvaise
distribution des
granulats

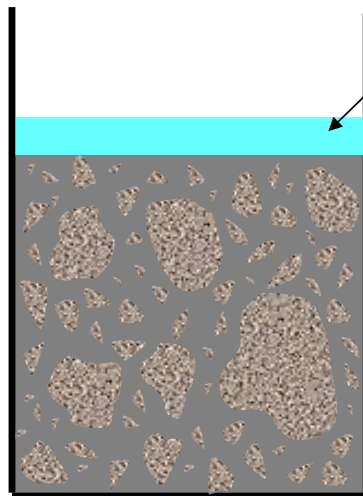


Pas de
granulats

3. Dosage eau/ciment

Problèmes rencontrés si trop d'eau

Ressuage - (bleeding)



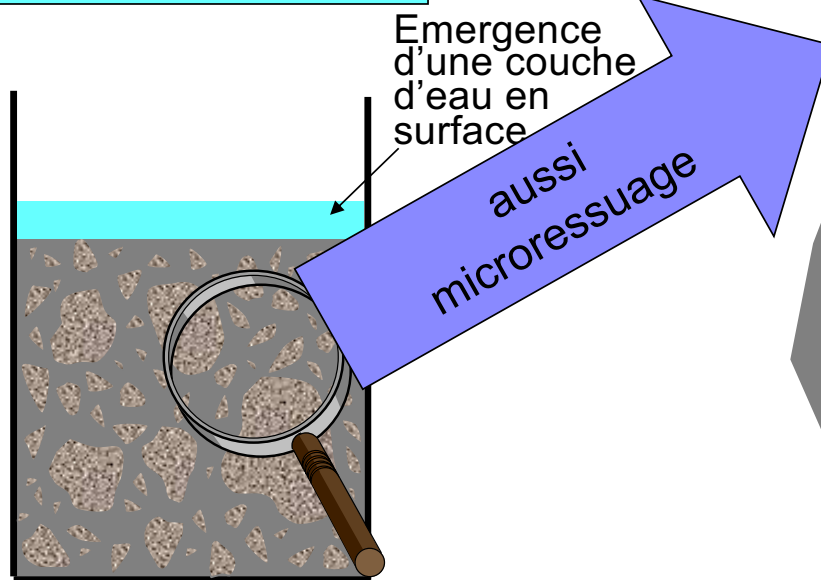
Emergence
d'une couche
d'eau en
surface

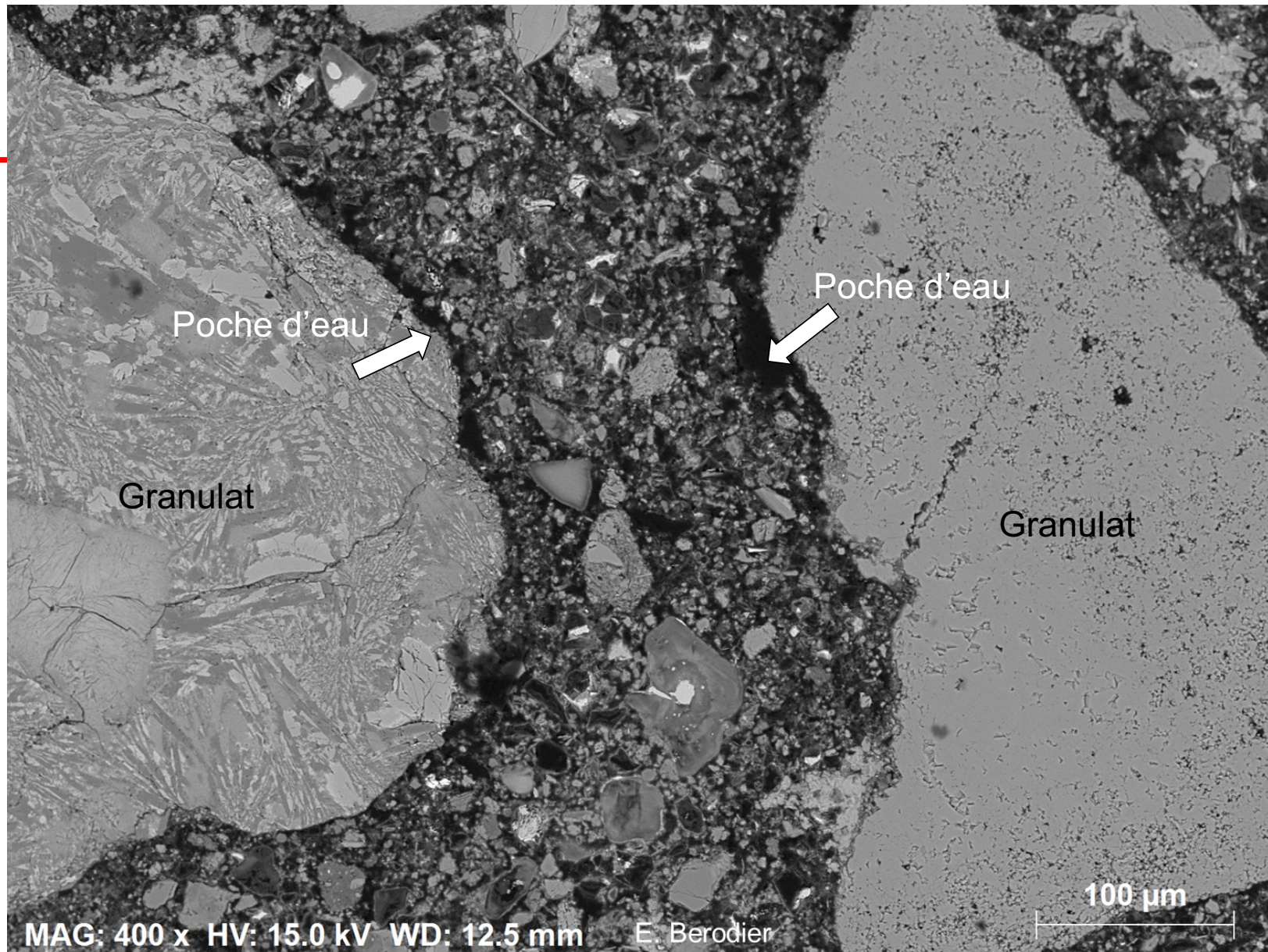


3. Dosage eau/ciment

Problèmes rencontrés si trop d'eau

Ressuage - (bleeding)





3. Dosage eau/ciment



Image: Prof. Richard Pleau

4. Test de contrôle

Capacité à remplir les formes
à se compacter

fluidité

- La présence des granulats empêche l'utilisation de la plupart des équipements conçus pour caractériser la rhéologie des autres fluides
- Besoin de tests robustes qui peuvent être utilisés sur les chantiers

4.1. Test de l'ouvrabilité: Slump test

L'affaissement (Slump en anglais)

L'affaissement décrit **quantitativement** l'affaissement libre du béton frais.

L'affaissement est une méthode de mesure adaptée aux classes de consistance du béton frais S1 à S4, c.-à-d. pour des bétons raides à très plastiques.

Elle n'est pas recommandée pour une mesure d'affaissement > 220 mm

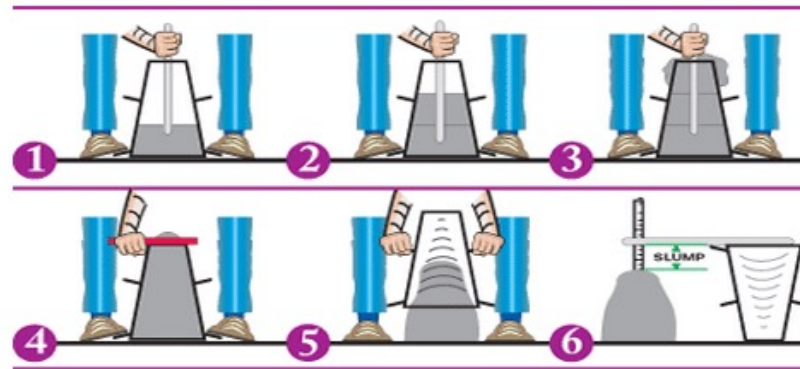


Slump test (essai d'affaissement)

A savoir
pour le
TP

Procédure

La détermination de l'affaissement (h) est définie dans la norme **SN EN 12350-2**.



Mesure de l'affaissement:

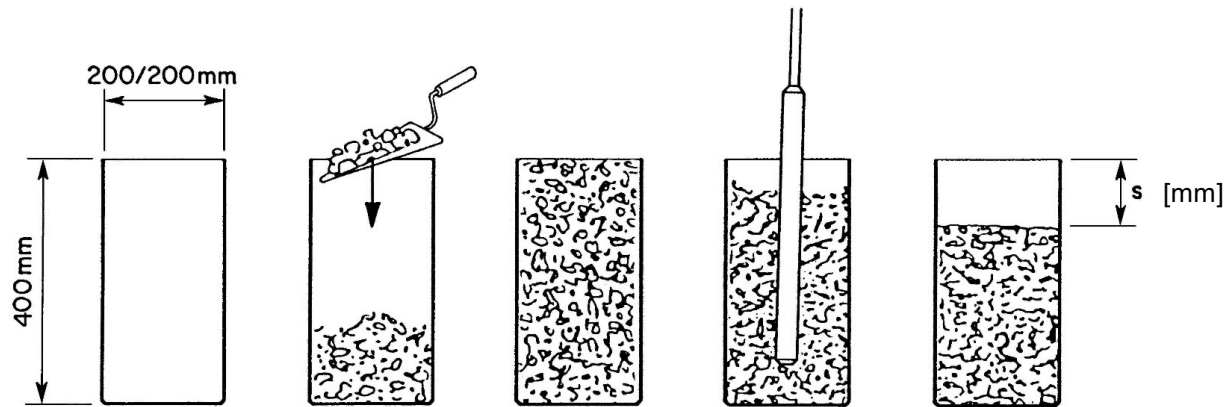
- contrôler que les ustensiles et équipements respectent les exigences de la norme
- humidifier la face interne du moule conique et le plateau de base
- introduire le béton frais en trois couches d'une hauteur égale, sans déplacer le moule
- compacter chaque couche 25 fois avec la tige de piquage, en observant les prescriptions normatives pour le compactage
- pour le remplissage et le piquage de la couche supérieure, remplir en excès le moule avant de commencer le piquage
- araser le béton au niveau du bord supérieur du moule en effectuant un mouvement de sciage et de roulage à l'aide de la tige de piquage et nettoyer le plateau de base
- soulever verticalement le moule avec précaution (sans rotation) en 2 à 5 secondes. L'ensemble des opérations, depuis le début du remplissage jusqu'à l'enlèvement du moule, doit être réalisé sans interruption et terminé en moins de 150 secondes
- mesurer l'affaissement (h) à 10 mm près

4.1. Test de l'ouvrabilité: Slump test

s [mm]	Classe selon SN EN 206-1	consistance
10 à 40	S1	ferme
50 à 90	S2	plastique
100 à 150	S3	molle
160 à 210	S4	très molle

Essai pas recommandé pour $s \geq 220$ mm (fluide)

Essai de compactabilité (Walz)

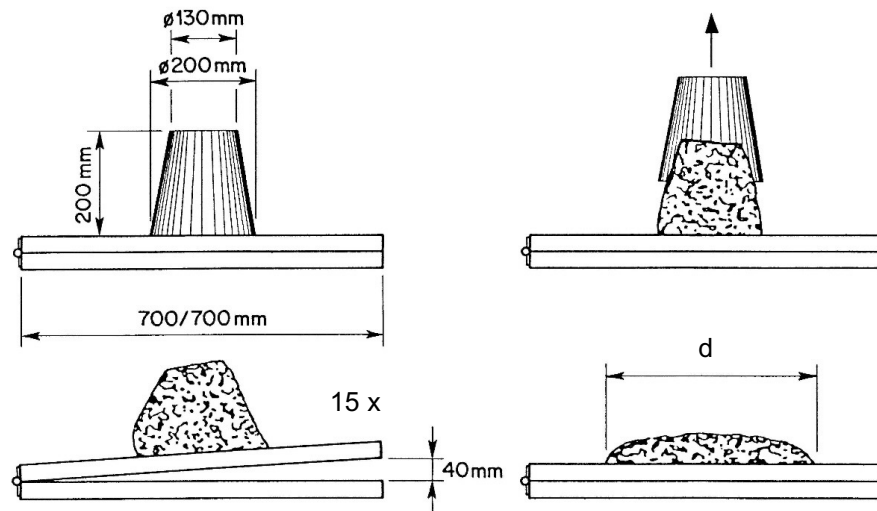


Indice de serrage :
$$c = \frac{(400 \pm 2) \text{ mm}}{(400 \pm 2) \text{ mm} - s}$$

c [-]	Classe selon SN EN 206-1	consistance
1.45 à 1.26	C1	ferme
1.25 à 1.11	C2	plastique
1.10 à 1.04	C3	molle

Essai pas recommandé pour $c \geq 1.46$ (raide) et ≤ 1.03 (très molle/fluide)

Essai d'étalement (à la table à chocs)



Etalement :

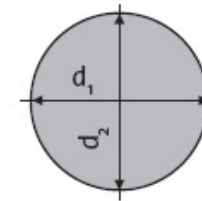
$$f = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [\text{mm}]$$

f [mm]	Classe selon SN EN 206-1	consistance
350 à 410	F2	plastique
420 à 480	F3	molle
490 à 550	F4	très molle
560 à 620	F5	fluide

Essai pas recommandé pour $f \leq 340$ mm (raide/ferme) et ≥ 630 mm (très fluide -> SCC)

Essai Slump-Flow (pour bétons autoplaçants / SCC)




$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

[mm]

Source: Guide pratique Holcim

SF [mm]	Classe selon SN EN 206-9	Remarque
550 à 650	SF1	Risque de désaération insuffisante
660 à 750	SF2	
760 à 850	SF3	Risque de ségrégation

Quelle consistance pour quel moyen de mise en place

Moyen de mise en place	Consistance du béton			
	C1	C2/F2	C3/F3	F4
Tapis roulant				
Benne				
Pompe				
Benne avec tube vertical				
Canal incliné ou goulotte				

Utilisation conseillée: bleu foncé / utilisation possible: bleu moyen (source: Guide pratique Holcim)

Sortes de béton utilisées en Suisse

principaux

A savoir
pour le
TP

Désignation	Sorte 0 (zero)	Sorte A ¹⁾	Sorte B	Sorte C	Sorte D (T1) ^{2,3)}	Sorte E (T2) ³⁾	Sorte F (T3) ⁴⁾	Sorte G (T4) ⁴⁾
Exigences de base								
Classe de résistance à la compression	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
Classe d'exposition (combinaison des classes indiquées)								
Dimension nominale maximale du granulat	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32	D _{max} 32
Classe de teneur en chlorures ⁵⁾	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10	Cl 0,10
Classe de consistance	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3
Exigences supplémentaires pour les classes d'exposition XF2 à XF4								
Résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage								
Exigences supplémentaires (à spécifier selon l'ouvrage)								
Résistance à la RAG								
Résistance aux sulfates								
Exigences à la composition et aux essais								
Rapport E/C resp rapport E/C eq maximal (-)	-	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Dosage min. en ciment (kg/m ³) ^{a)}	-	280	280	300	300	300	320	320
Essais de durabilité	néant	néant	^{b)} , Rcarb	Rcarb	RCarb, GDS	RCarb, GDS	RCI-, GDS	RCI-, GDS
Autres exigences	SN EN 12620 :2002 contient les exigences aux granulats							

5. Malaxage du béton

Le **type** de malaxeur et la **durée** de malaxage **influencent sur la qualité** des bétons produits.

Cette qualité dépend de:

- l'homogénéité du mélange
- l'effet des adjuvants
- la performance du malaxeur
- l'usure du malaxeur

Mixeur mécanique



Centrale sur site



Livraison d'une centrale



5. Malaxage du béton

Au moment du malaxage, les composants sont normalement dosés selon l'ordre suivant:

1. les granulats
2. le ciment
3. les additions
4. l'eau de gâchage et les adjuvants

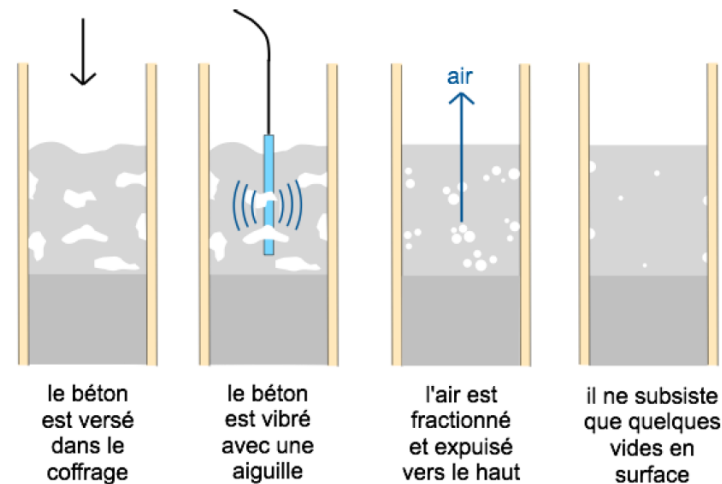
Les fluidifiants/adjuvants sont en règle générale ajoutés à l'eau de gâchage.

6. Compactage

Le compactage joue avec la cure et la composition du béton un rôle essentiel pour produire un béton durable.

Un compactage convenable permet d'obtenir:

- une étanchéité accrue
- une durabilité améliorée
- la résistance à la compression exigée
- une bonne adhérence entre les barres d'armature et le béton



7. Cure

La cure **protège** le béton immédiatement et suffisamment de:

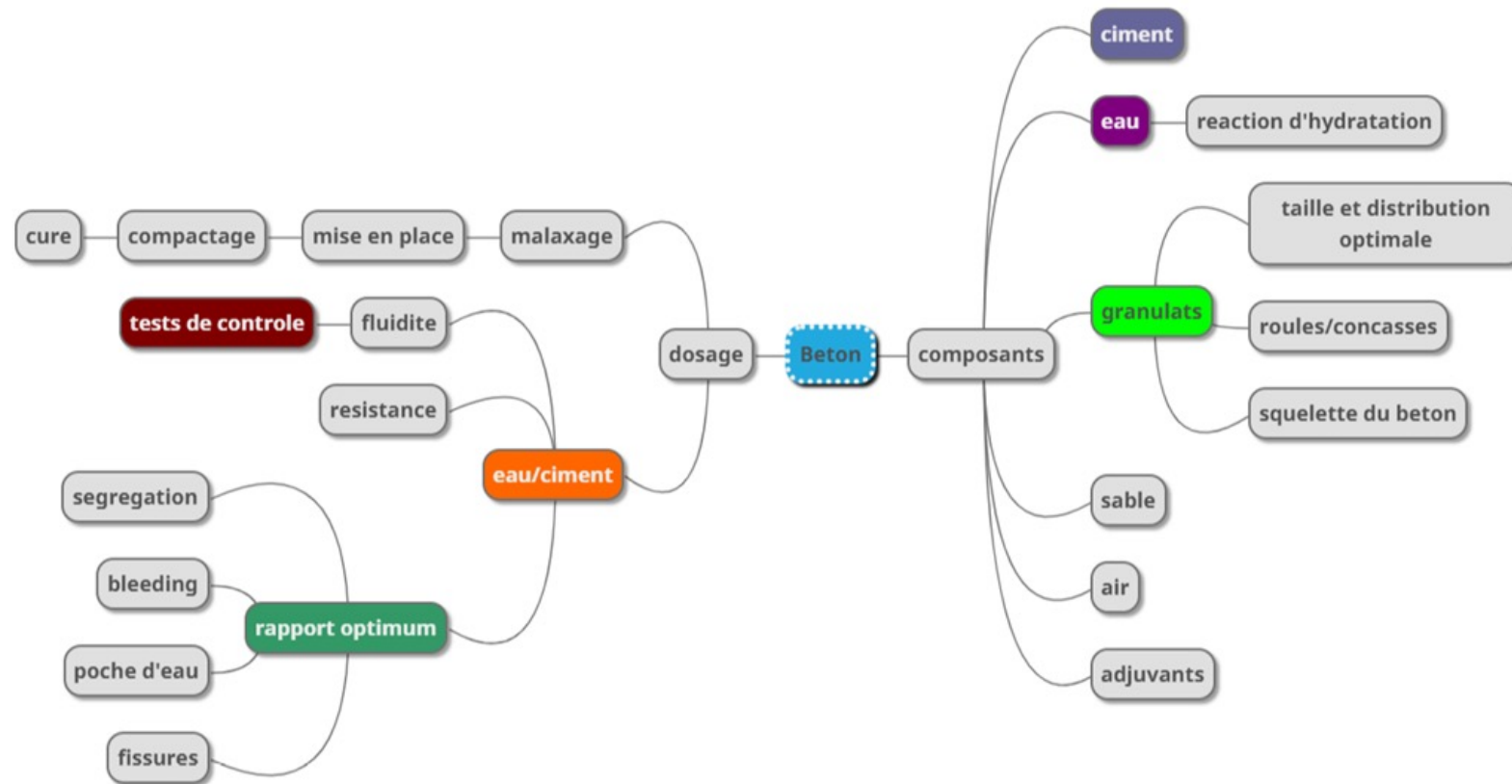
- la dessiccation précoce sous l'effet du soleil, du vent, d'une faible humidité de l'air
- garantir un degré d'hydratation suffisant (pas de perte d'eau pour former les hydrates)
- prévenir le délavage de la surface du béton jeune par la pluie ou des écoulements d'eau
- éviter des changements rapides de température (choc thermique) par un décoffrage prématuré et en cas d'éléments massifs
- réduire les efflorescences à la surface du béton

7. Cure



Figure 6.4 : exemple de cure à l'eau du tablier d'un pont (photo Eiffage).

8. L'essentiel du cours



Résumé / questions

1. **Quelle est la différence entre le béton et le mortier?**
2. **Pourquoi met-on des granulats dans le béton?**
3. **Pourquoi utilise-t-on des granulats de tailles différentes?**
4. **Quelle est l'importance du rapport eau / ciment?**
5. **Quel processus amène le durcissement du béton?**
6. **Si le rapport e/c diminue, comment faut-il changer le dosage en ciment?**
7. **Quels paramètres de formulation influence le «slump» du béton?**
8. **Quel est le moyen le plus utilisé pour compacter le béton?**

9. Pour aller plus loin

Béton en Suisse

<http://www.betonsuisse.ch>

Guide pratique du béton de Holcim

https://www.mtextur.com/system/product_lines/pdfs/000/000/292/original/mtextur_surfaces-exposees_holc_fr.pdf?1453848668

Slump test – ASTM standard

<https://www.youtube.com/watch?v=EqKmtcF46lg>

La cure des bétons:

<https://slideplayer.fr/slide/1156251/>