

Matériaux de Construction

Prof. Karen Scrivener

Laboratoire de Matériaux de Construction

Section des Matériaux

The Future Of Concrete / Facing Challenges

Sustainable development



Fair development e.g. for developing countries :

- cost
- technology
- resources...

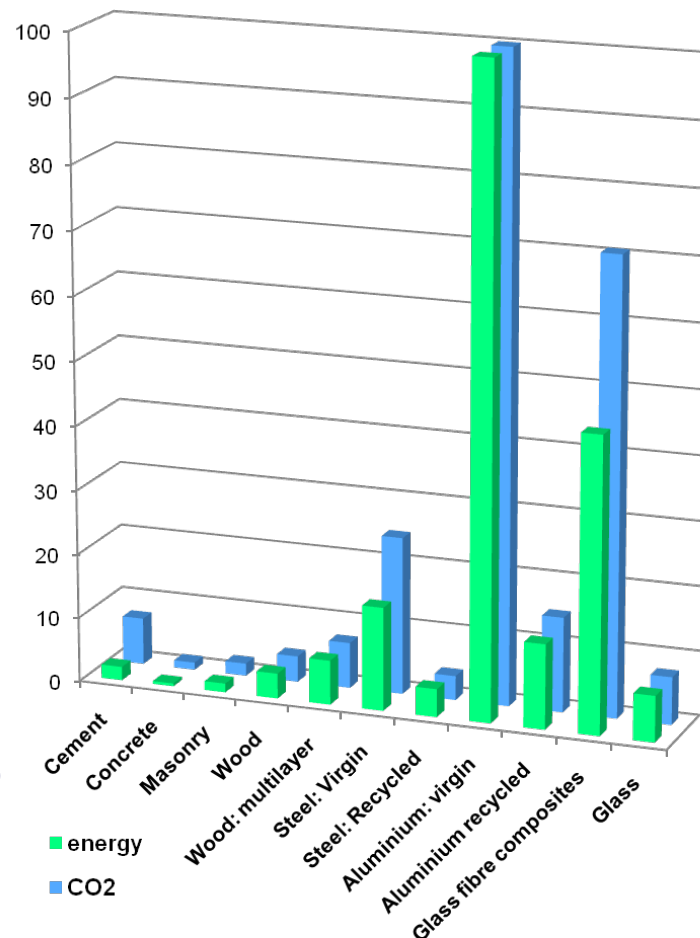
Average living space per person – 3 m² China - ~30 m² Switzerland!

Global Warming is the BIG Challenge of the 21st Century

Despite being intrinsically low energy materials,

The enormous volumes of concrete used mean that

Cement production accounts for 5-8% of global CO₂ emissions



Material	MJ/kg	kgCO ₂ /kg
Cement	4.6	0.83
Concrete	0.95	0.13
Masonry	3.0	0.22
Wood	8.5	0.46
Wood: multilayer	15	0.81
Steel: Virgin	35	2.8
Steel: Recycled	9.5	0.43
Aluminium: virgin	218	11.46
Aluminium recycled	28.8	1.69
Glass fibre composites	100	8.1
Glass	15.7	0.85

ICE version 1.6a

Hammond G.P. and Jones C.I

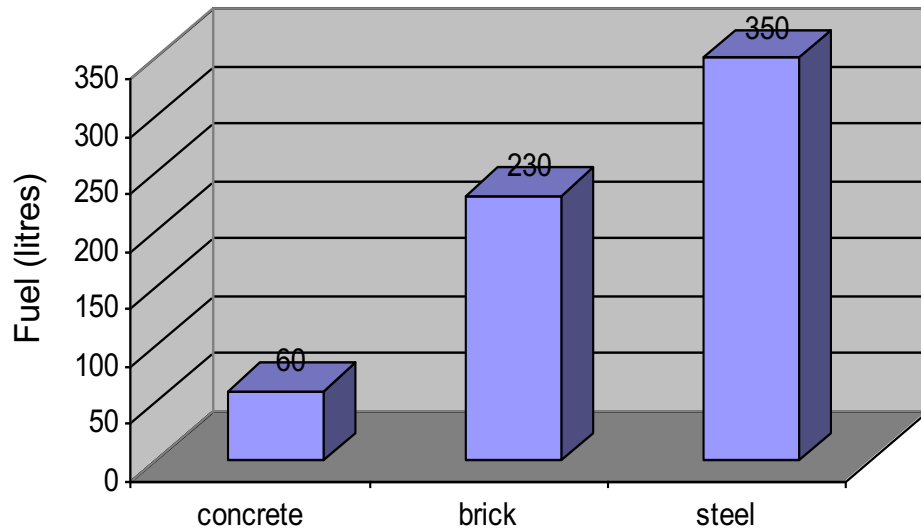
2008 Proc Instn Civil Engineers

www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodyed/

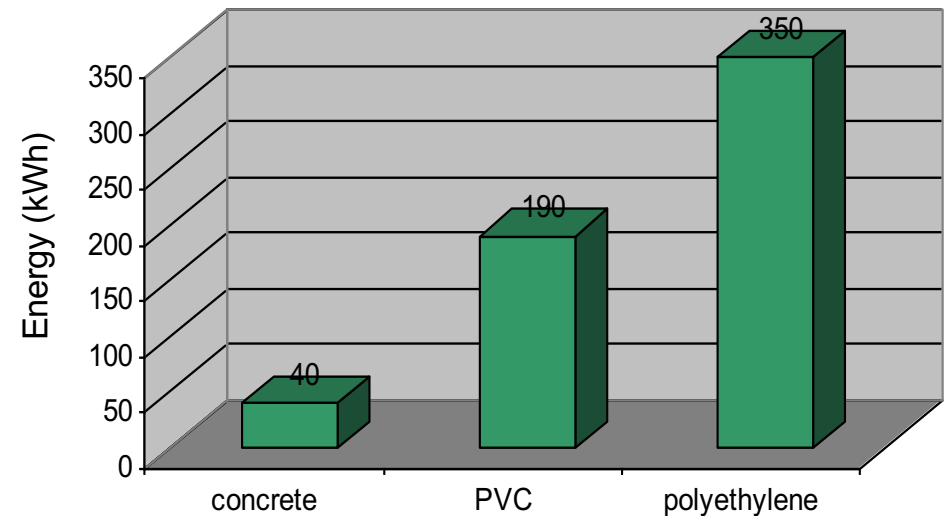
Comparative energies in use



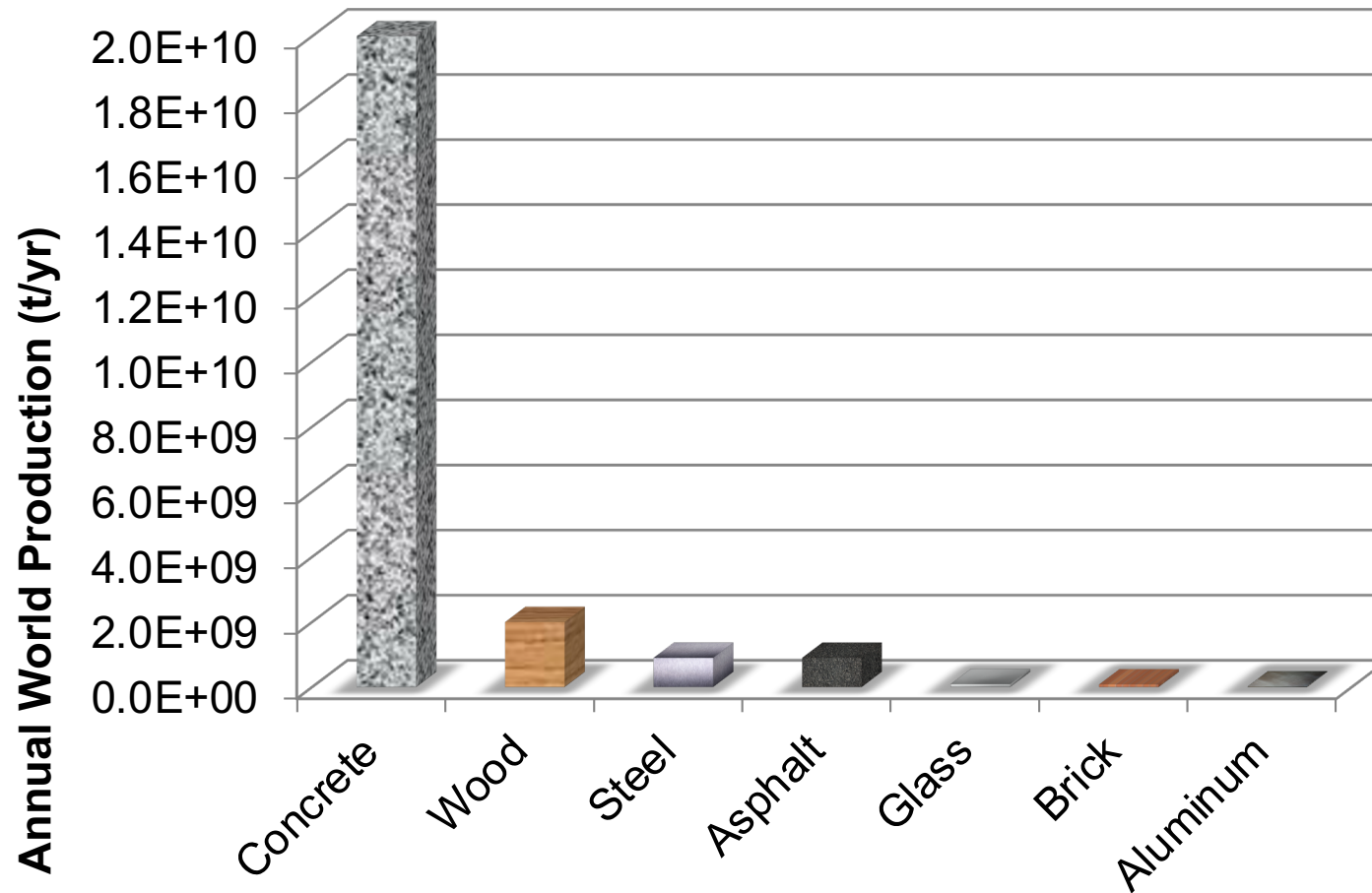
Energy of
producing 1m of
column to support
1000 tonnes



Energy of
producing 1m
of pipe



Concrete: the most used material in the world

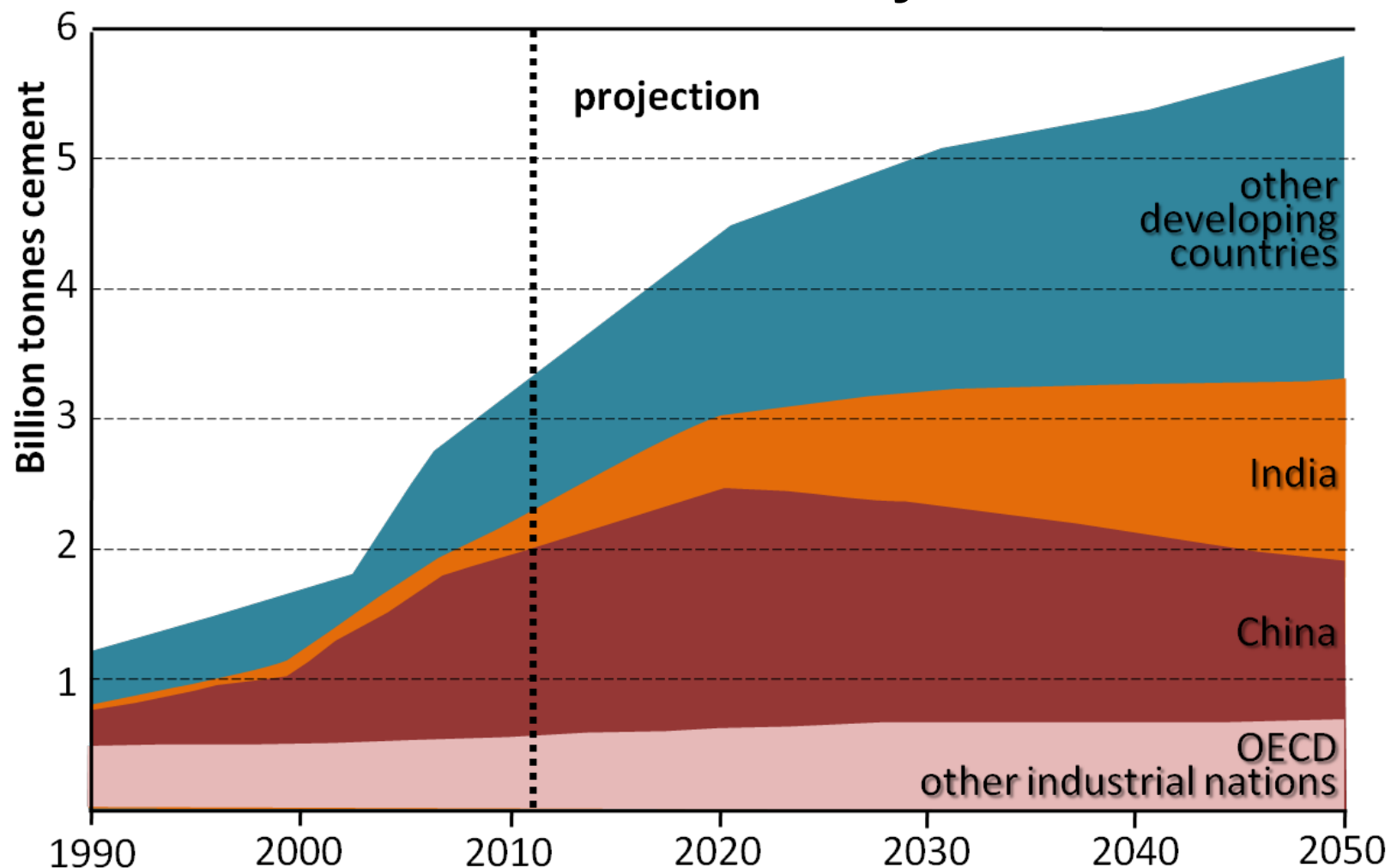


Because of these huge volumes globally 5-8% of man-made CO₂

- Current consumption 1.5 m³ per person per year of concrete
- About 450 kg cement
- About 360 kg CO₂
- Compare this to target for sustainable world of 1 tonne CO₂ per person for EVERYTHING



**Demand is forecast to rise:
to meet the demands of a growing world population
more than half of demand is currently in China**

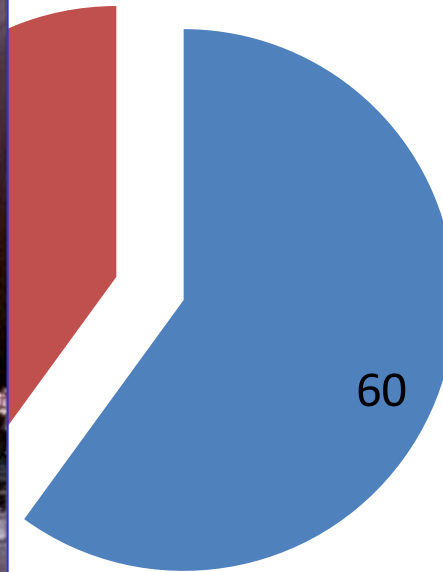


1 tonne of cement leads to the emission of 650 – 900 kg CO₂

Origins of CO₂ emissions in cement production

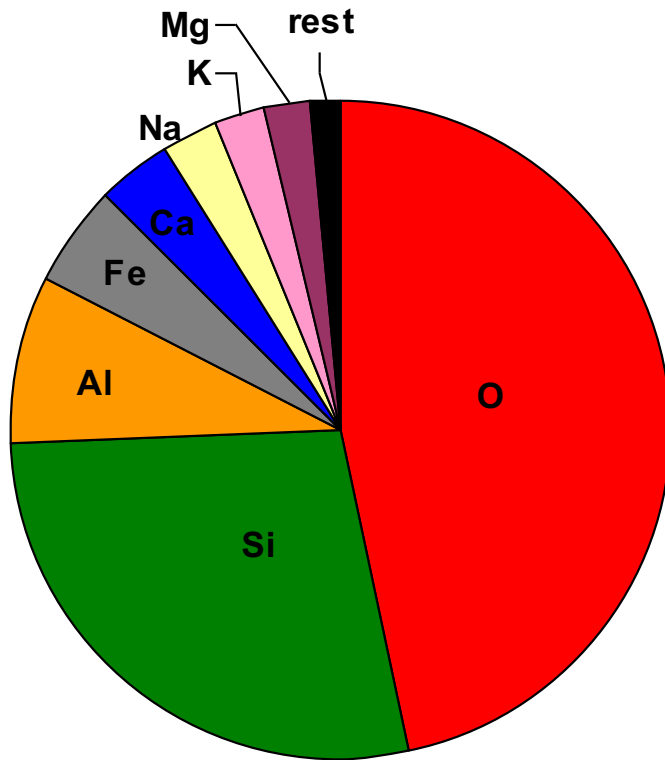


for fossil fuels

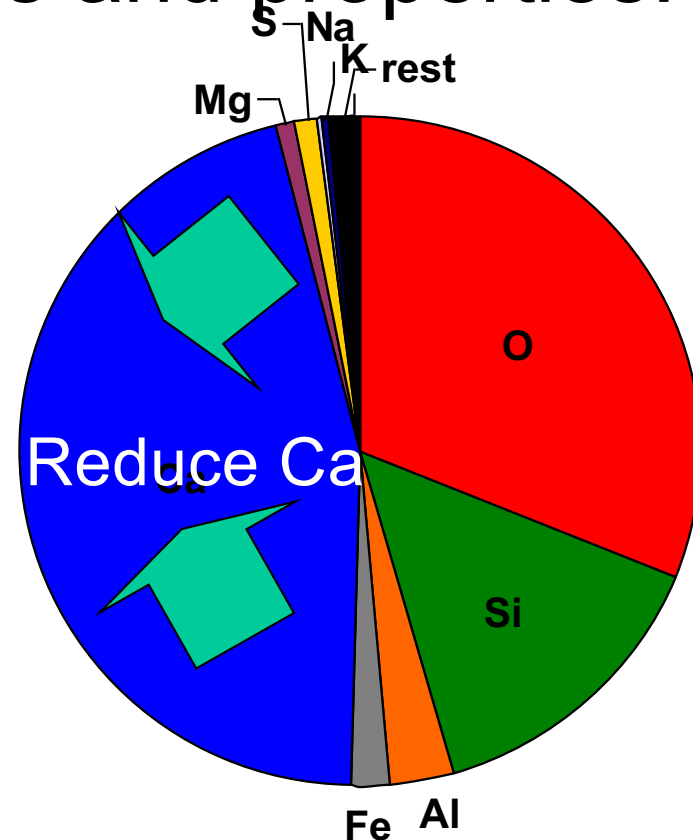


Decreasing
“chemical” CO₂
will mean changes
in
the *chemistry* of
the cement:
therefore its
reactions and
potential
performance

Reducing “Chemical” CO₂ will change the composition of cement therefore all its reactions and properties!



earth's crust



But the composition of the Earth's Crust limits the possible chemistries
Therefore it is possible to build a systematic framework to understand
all possible solutions

In the future sustainability can be increased by

1. Extending the use of current clinker substitutes;
2. The development of novel, cost-effective supplementary cementitious materials and alternative clinkers;
3. Optimizing the use of waste materials as substitutes for clinker and fuel;

•Such developments can only be successful if we can provide the basis in understanding and performance tests for users to have confidence in the many potential solutions

- There is no magic bullet solution: sustainability can only come from mastering an increasingly diverse range of cementitious materials
- Adapting concrete composition to locally available materials

Introduction aux Technologies du Béton (Concrete Technology)

Quelques définitions

Un béton

Granulats + colle =

béton si $\varnothing > 4$ mm

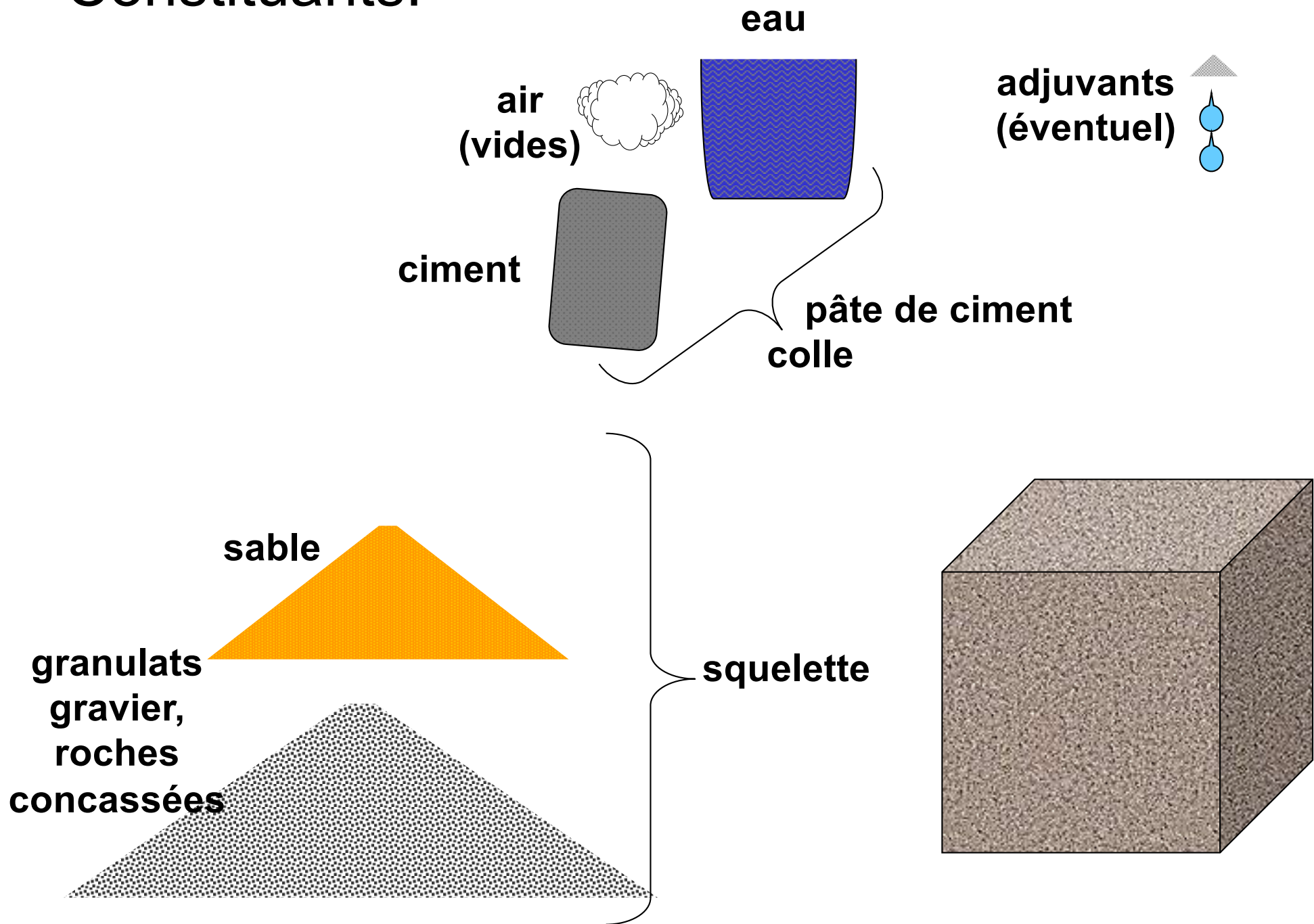
mortier si $\varnothing < 4$ mm

Pâte de ciment = eau + ciment

Mortier = eau + ciment + sable

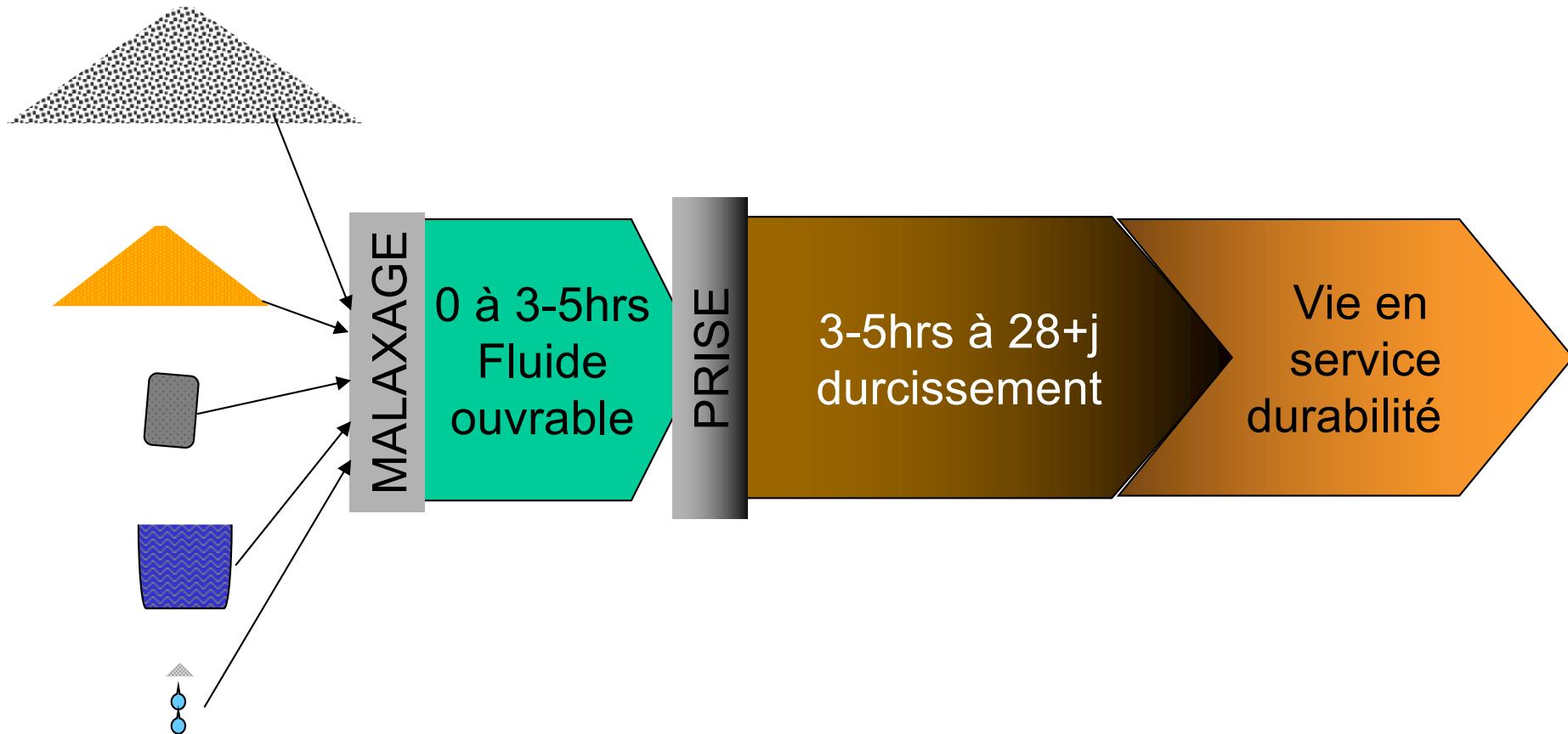
Béton = eau + ciment + sable + granulats

Constituants:

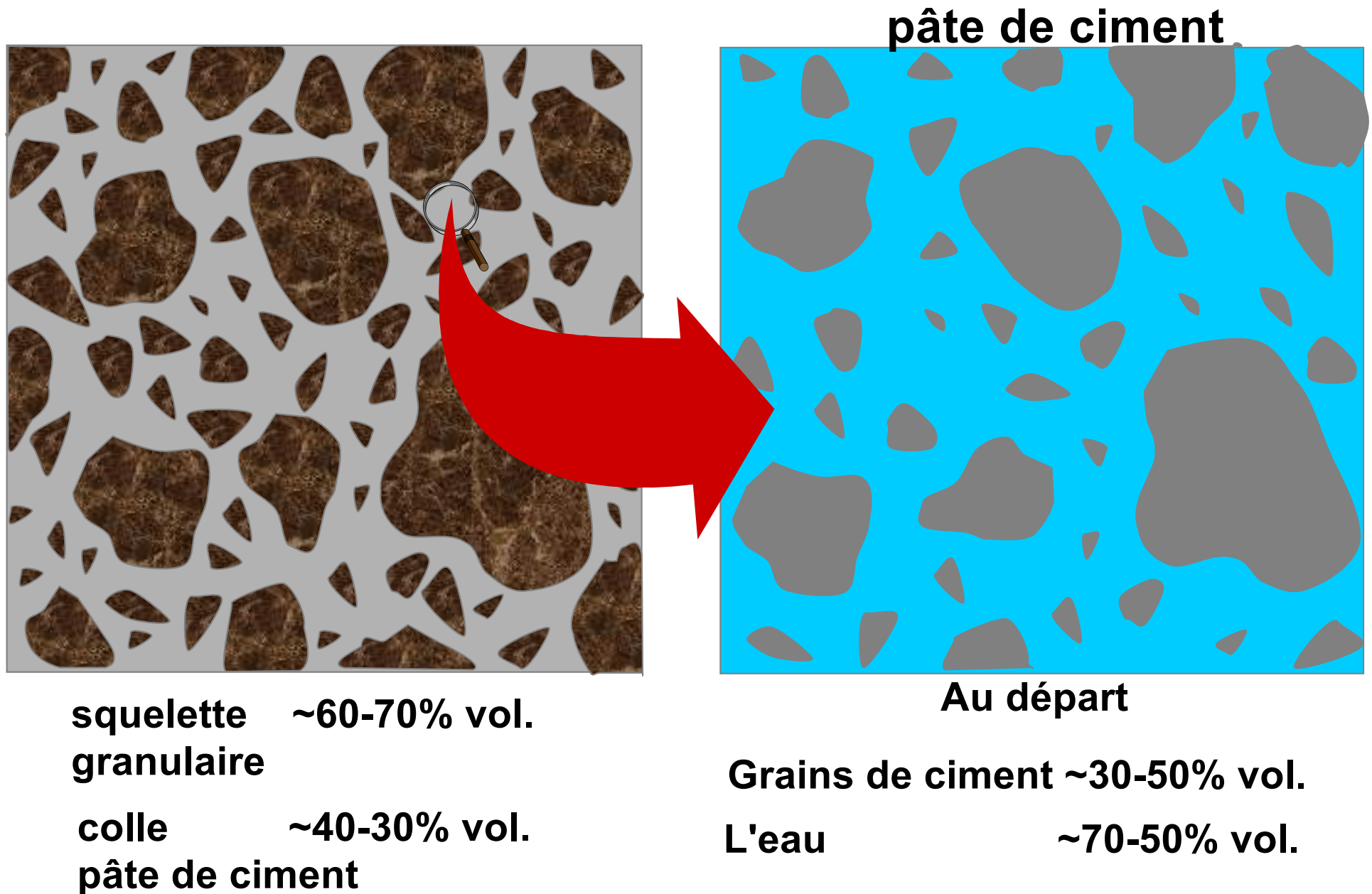




Le vie d'un béton

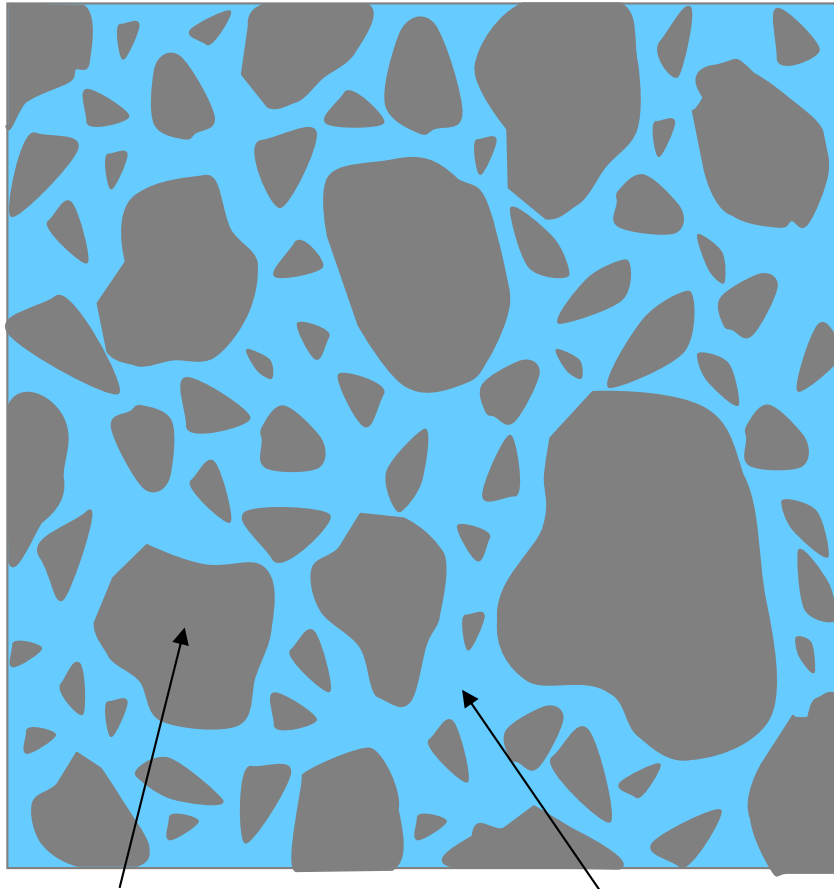


2 niveaux de microstructure



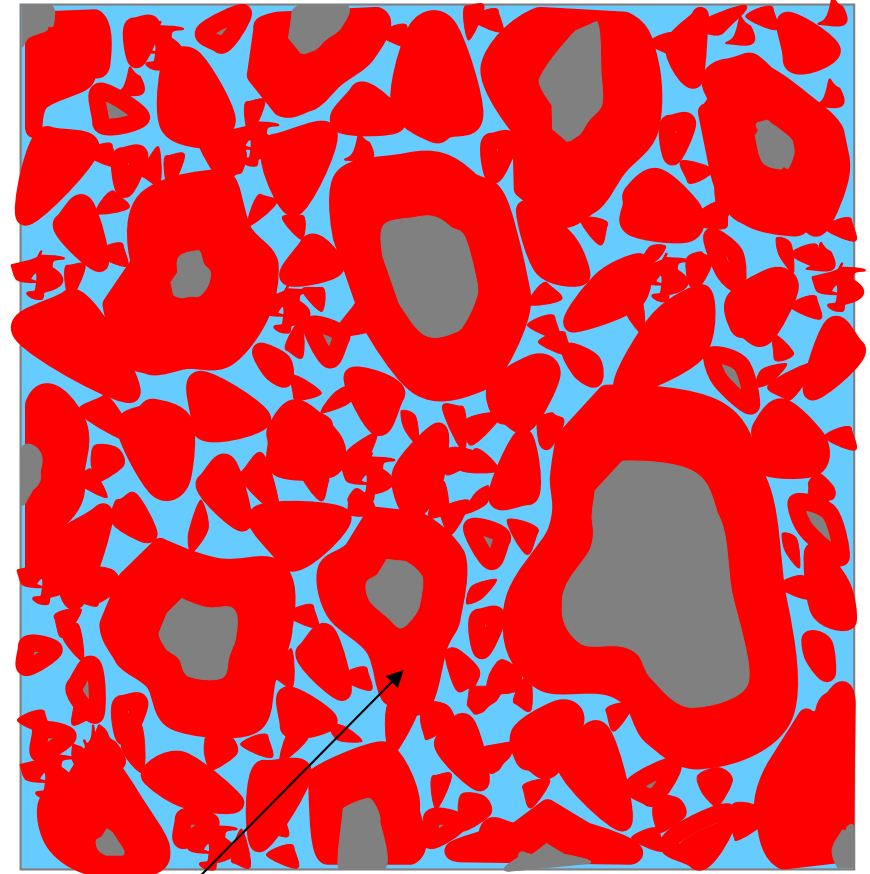
Hydratation

transformation de pâte fluide
en solide rigide



Grain de ciment

eau



hydrates

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.

Hydratation

Augmentation de volume solide

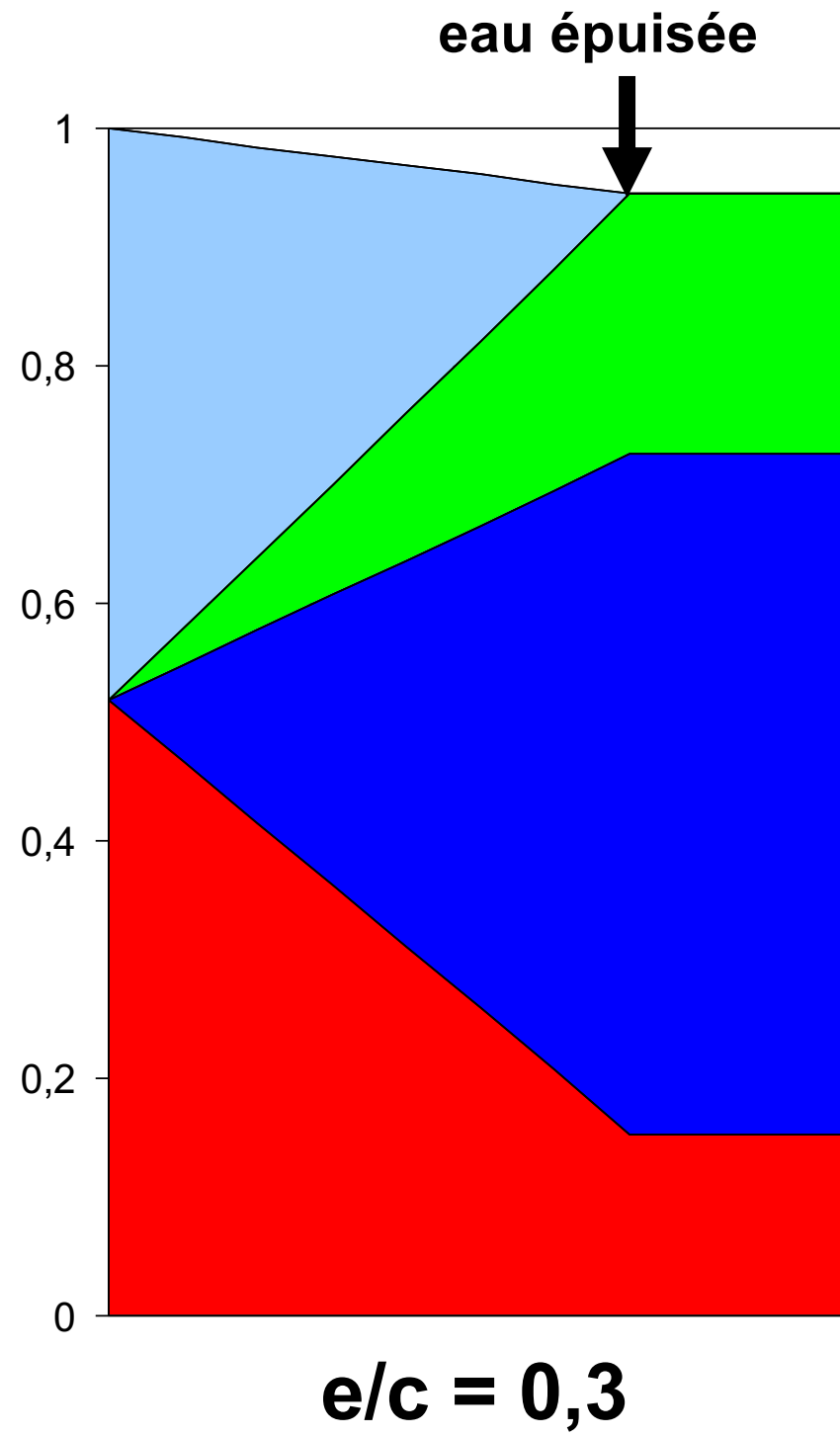
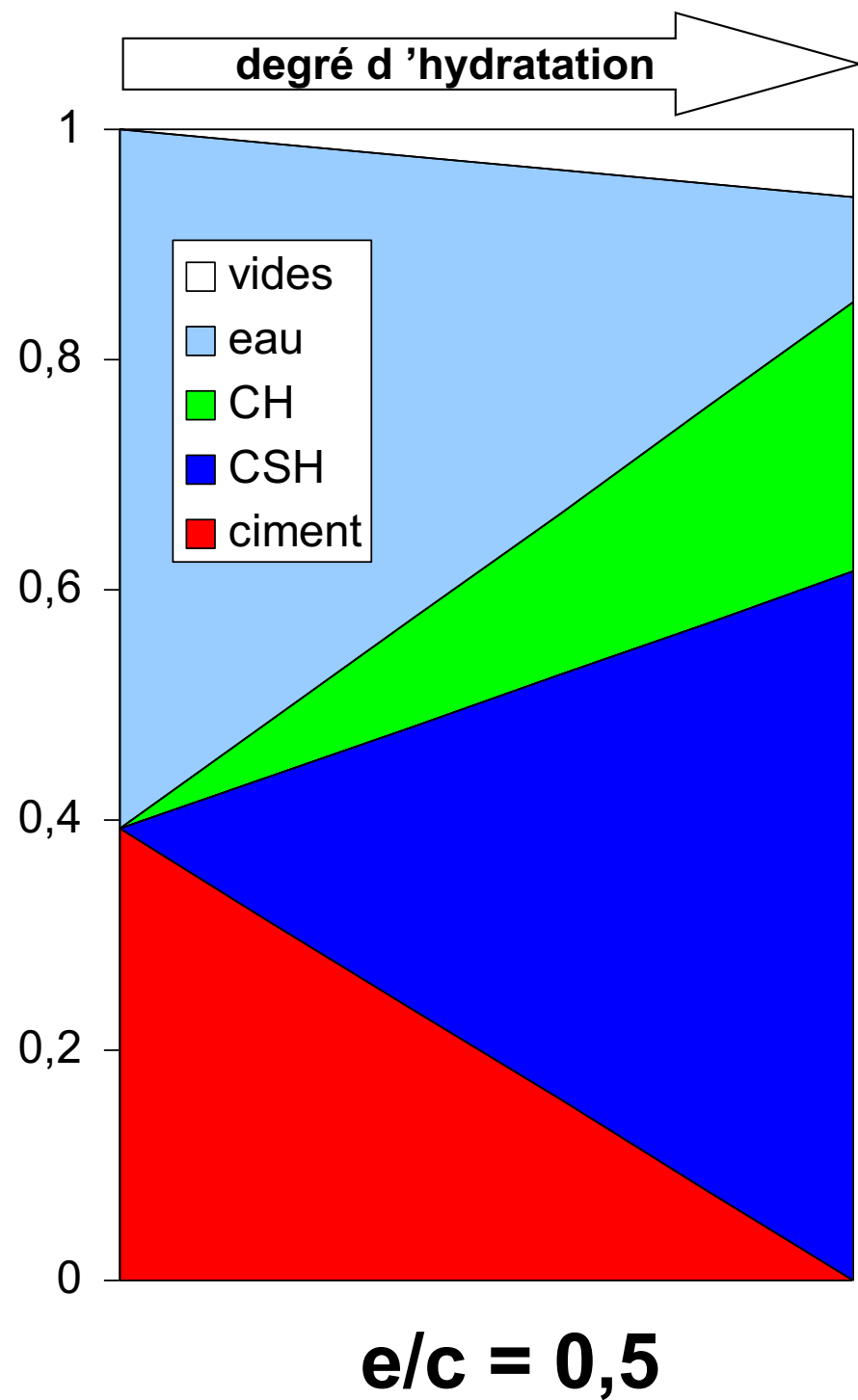
1 vol. ciment $\rightarrow$ $\sim$ 2 vols hydrate

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 ~ 3)

Quel est le volume de solide après hydratation?



Un béton est composé de:

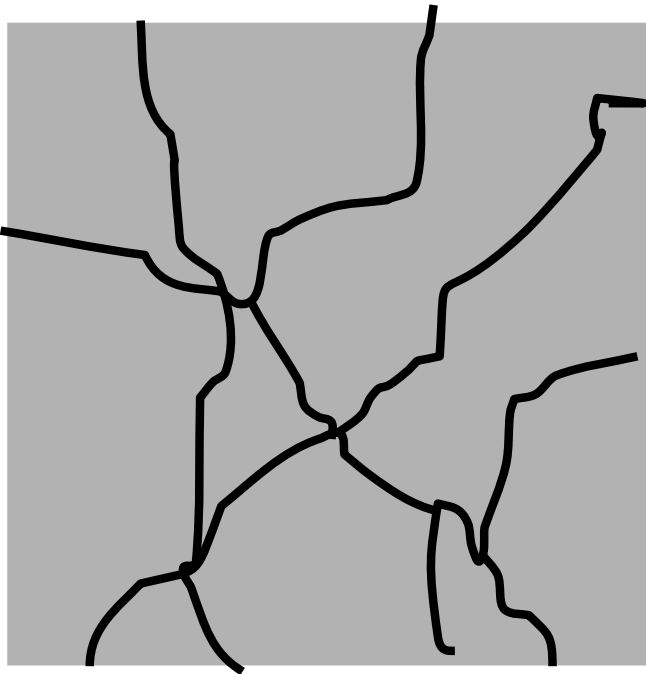
- **un squelette: les granulats**
- **une colle: les pâtes de ciment**
- **la liaison (l'interface) entre les deux**

Sa qualité dépend de la qualité de tous les trois.

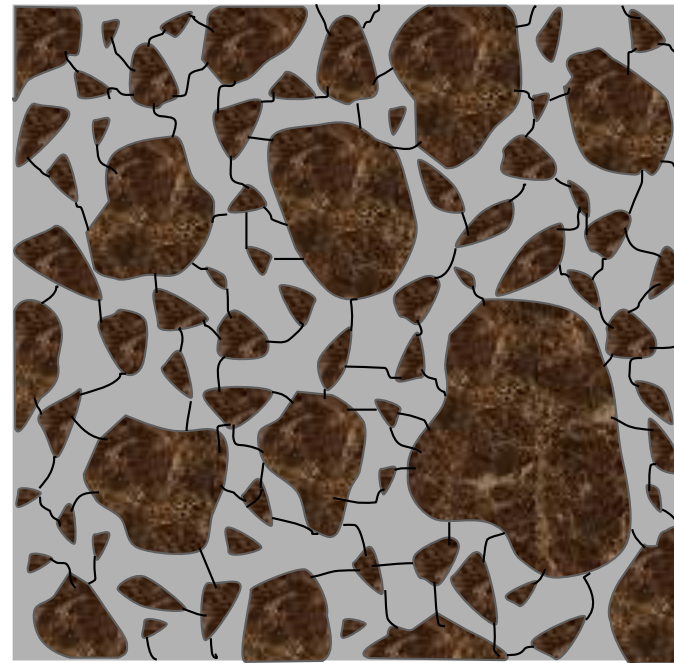
Les granulats:

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

Mais on ne peut pas faire
une pâte de ciment dans
une large section sans
qu'elle se fissure



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



Squelette granulaire

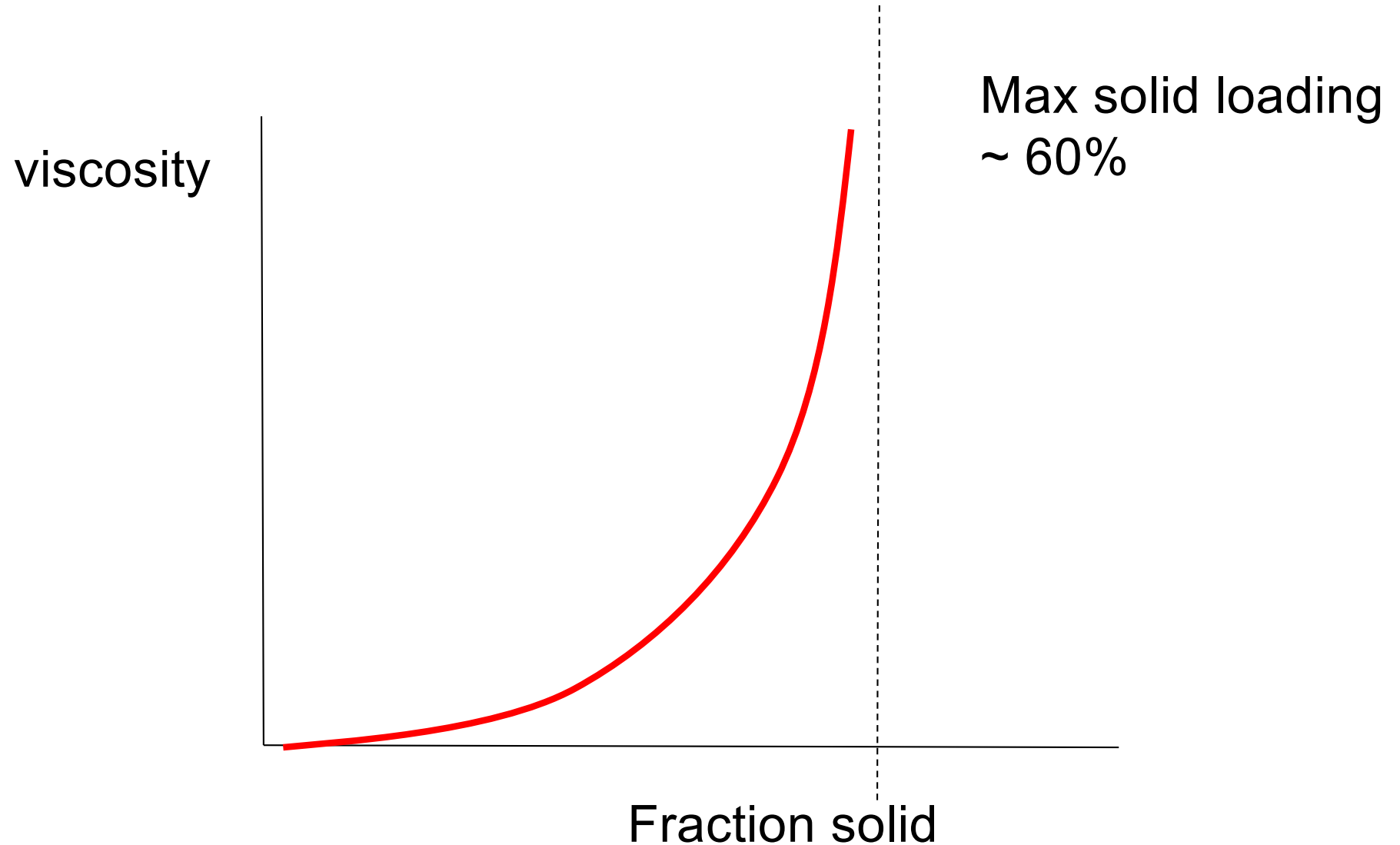
On veut minimiser la quantité de pâte de ciment:

- plus économique
- moins de phase dans laquelle l'eau peut pénétrer (durabilité)
- moins de chaleur dégagée
- moins de retrait

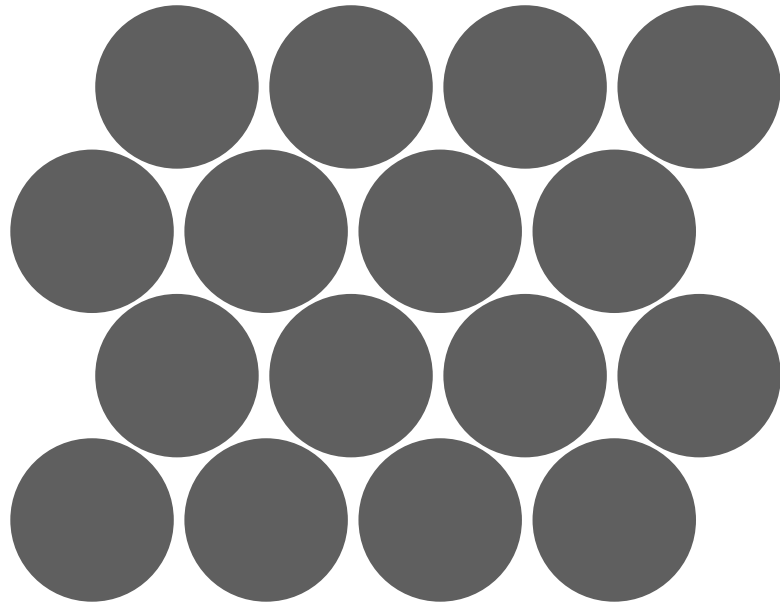
mais

**la pâte de ciment doit remplir les espaces entre les granulats:
et fluidifier le béton pendant le malaxage et la mise en place**

Powder suspensions

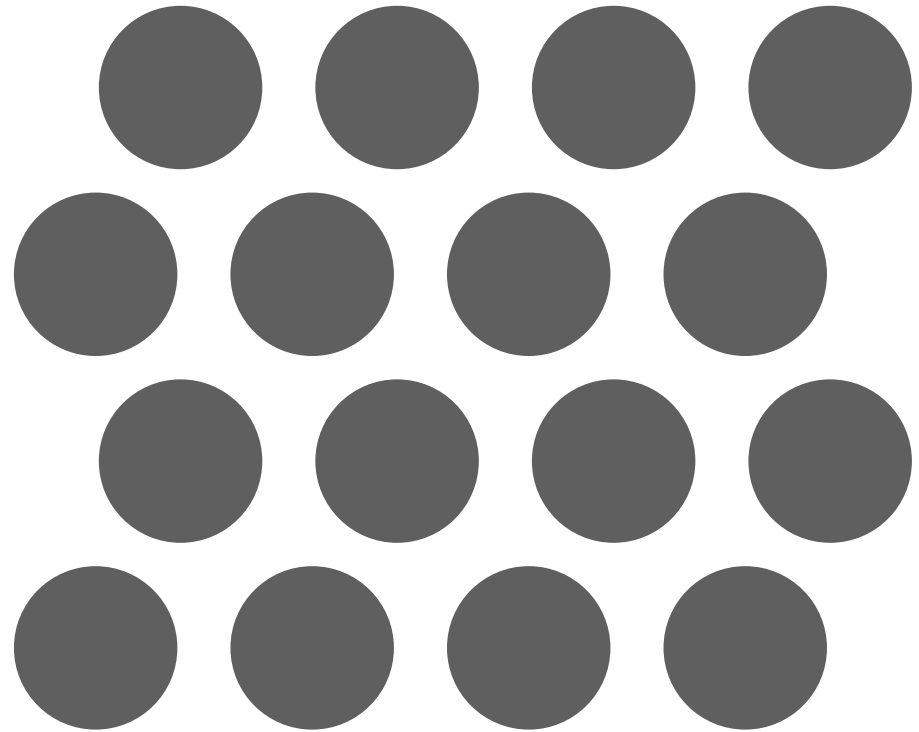


Empilement des grains mono-taille:



Densité maximale ~74%

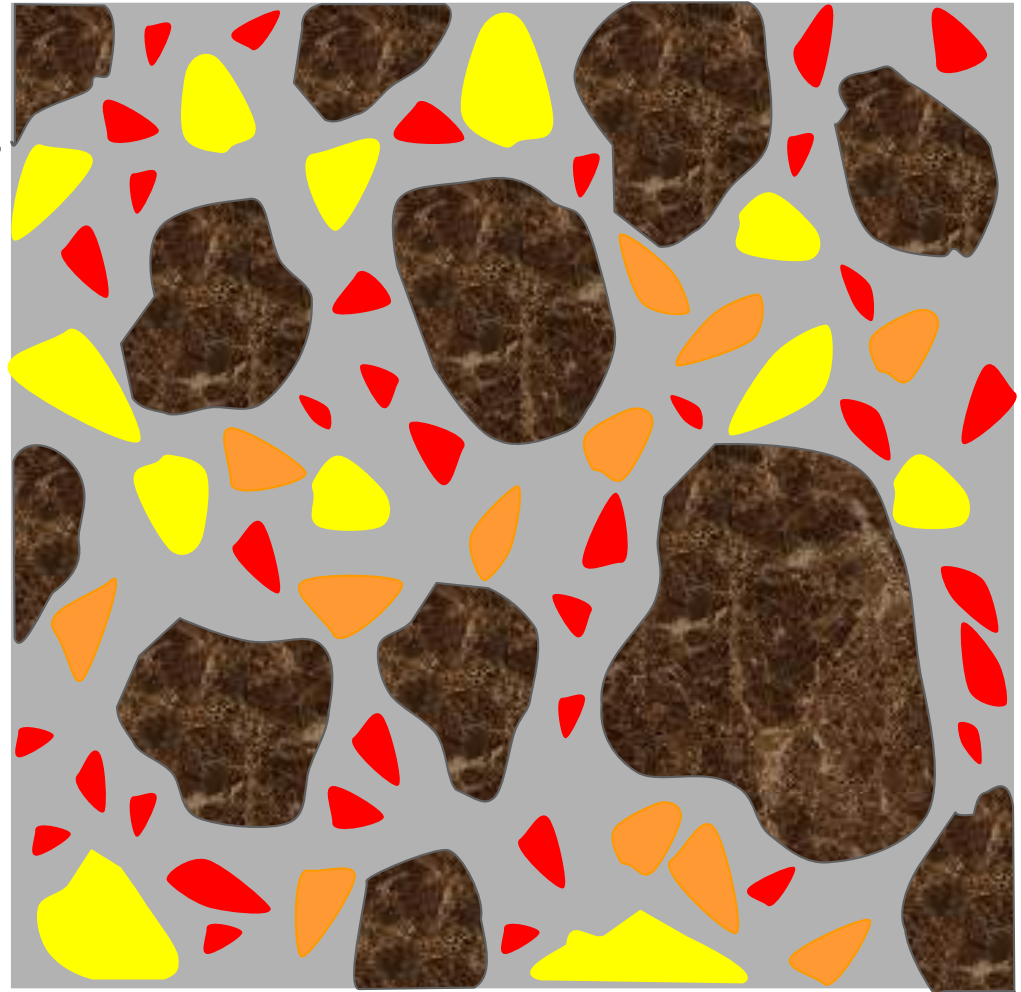
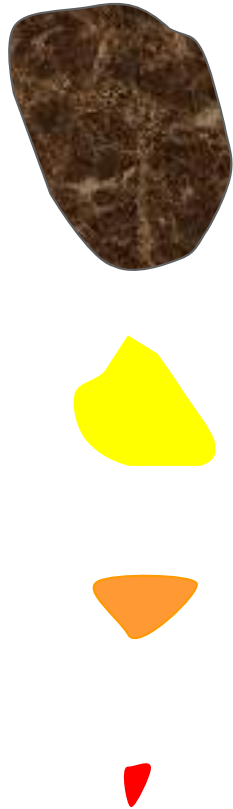
**Mais difficile à déformer:
frottement entre les grains**



**Il faut espacer les grains
densité max. pratique ~60%**

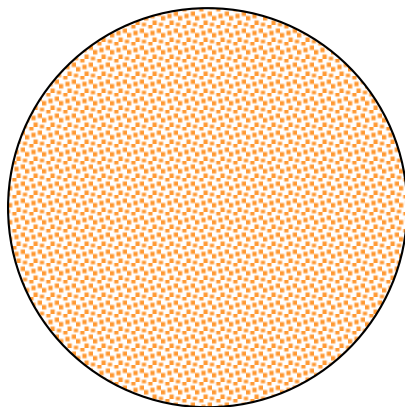
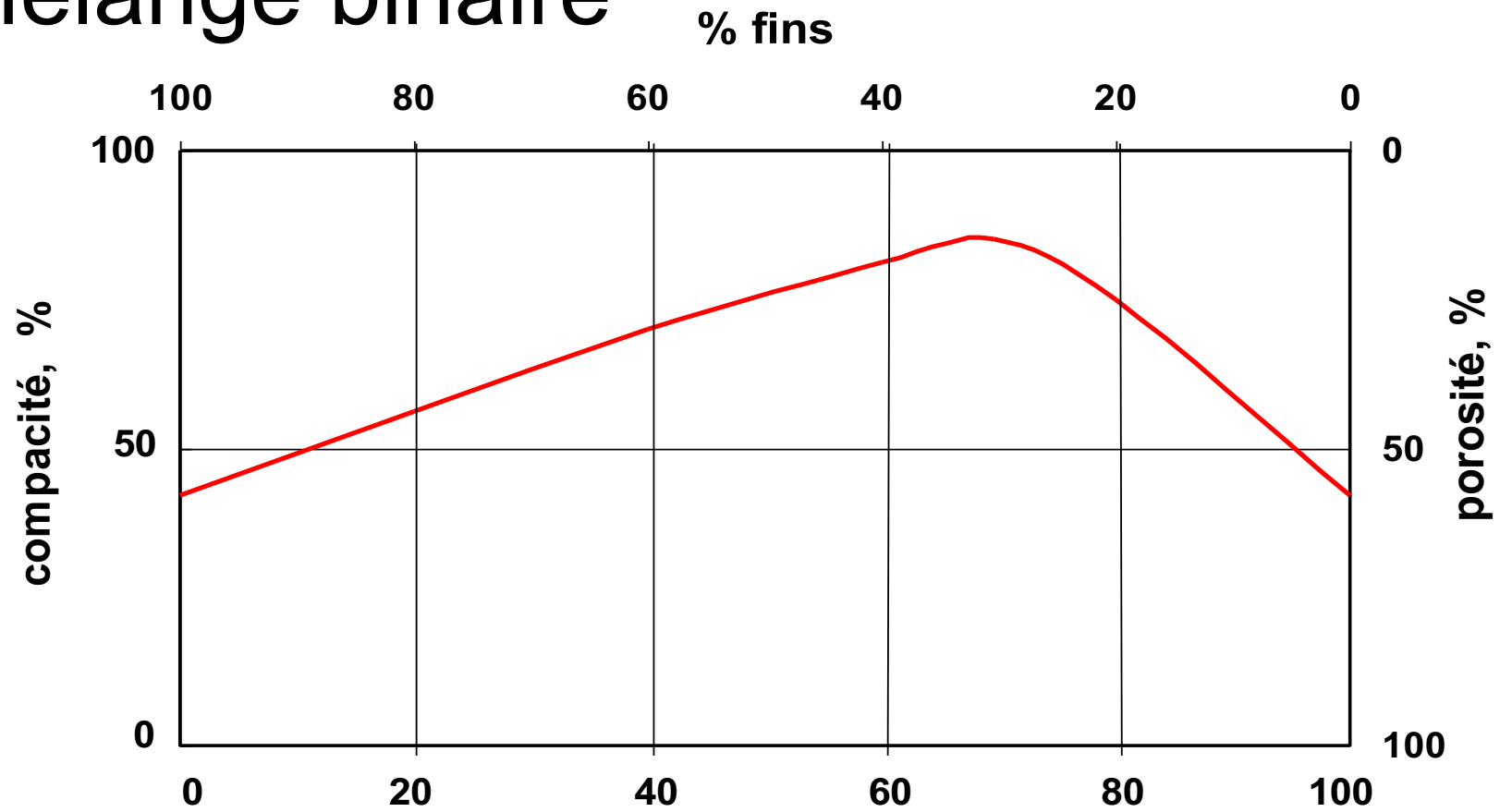
Empilement plus efficace avec une distribution des tailles:

Les petits peuvent remplir les espaces entre les grands

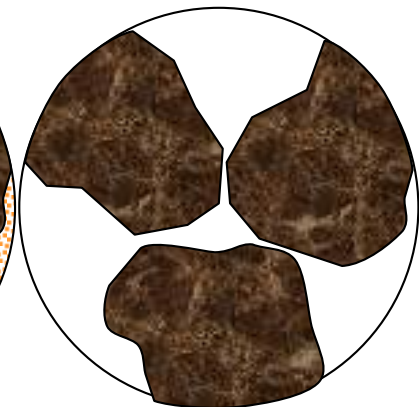
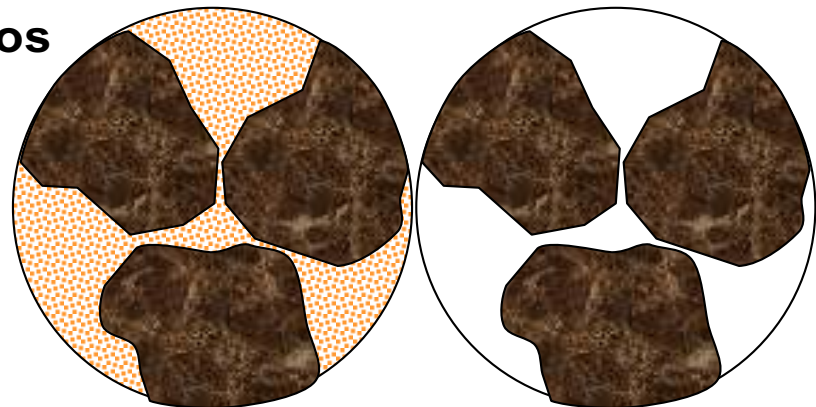


(connu par les romains)

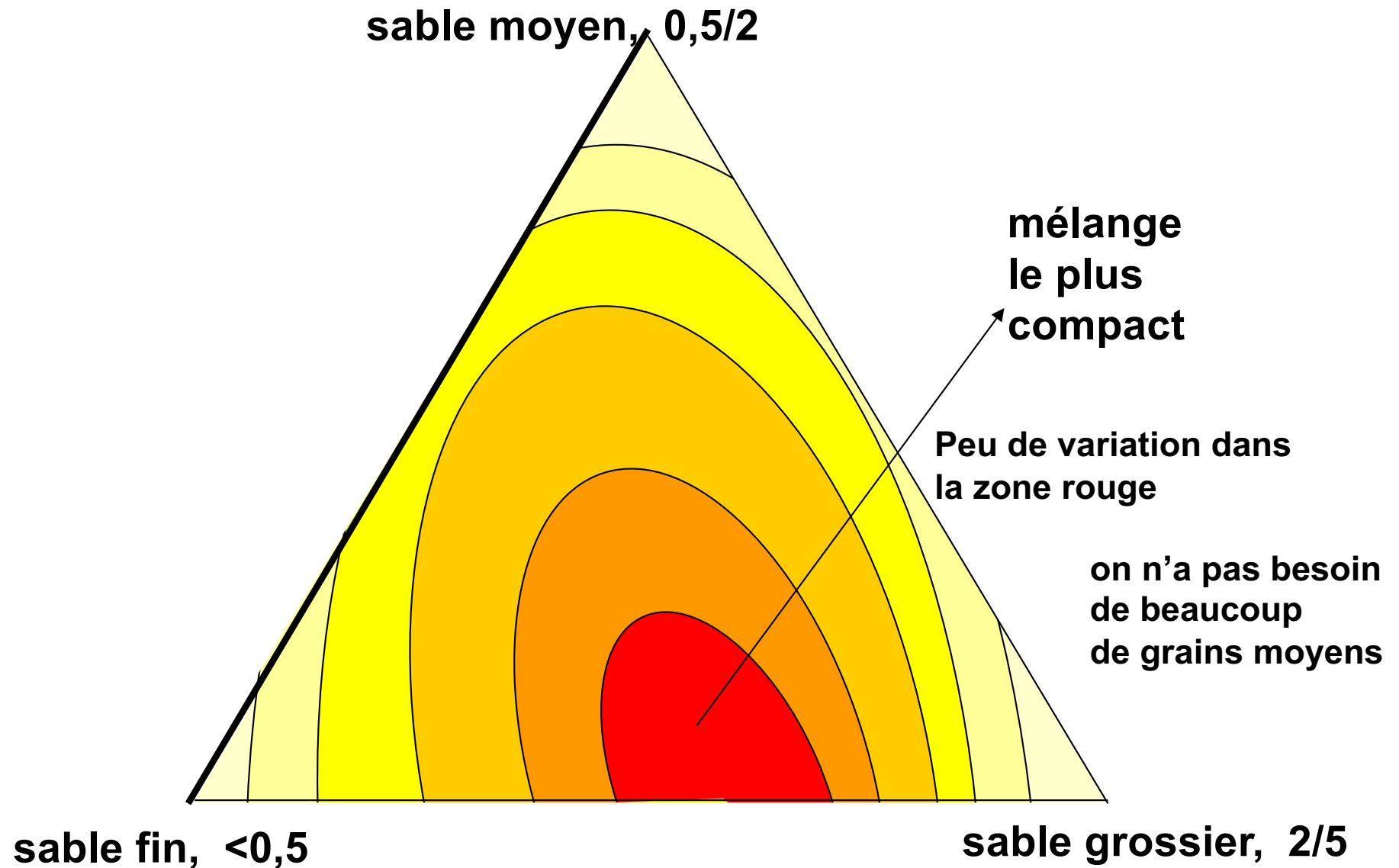
Mélange binaire



% gros



Mélange ternaire (Ferret 1890s)

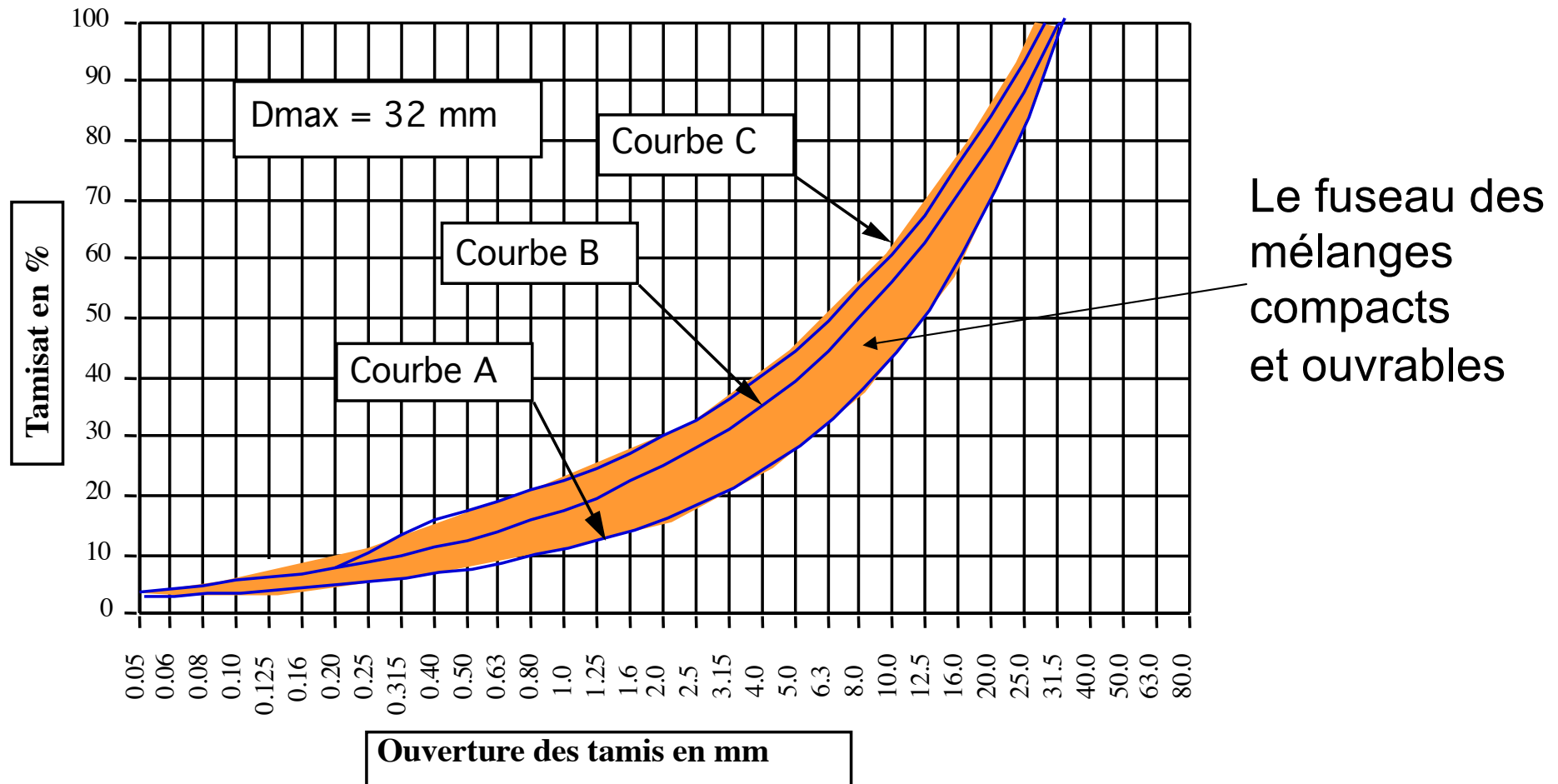


On a vu que les mélanges les plus compacts sont constitués de grands et petits grains

Pourquoi utilise-t-on les mélanges avec granulometrie continue



Mélanges continus



A.
$$p = 50 \left(\frac{d}{D_{max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \right)$$

B.
$$p = 100 \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}$$

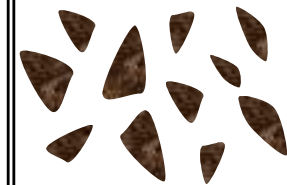
C. 5% au-dessus de **B.** au-delà de $d=0.4 \text{ mm}$

p : % des tamisats cumulés
 d : diamètre granulat considéré
 D_{max} : diamètre maximum des granulats

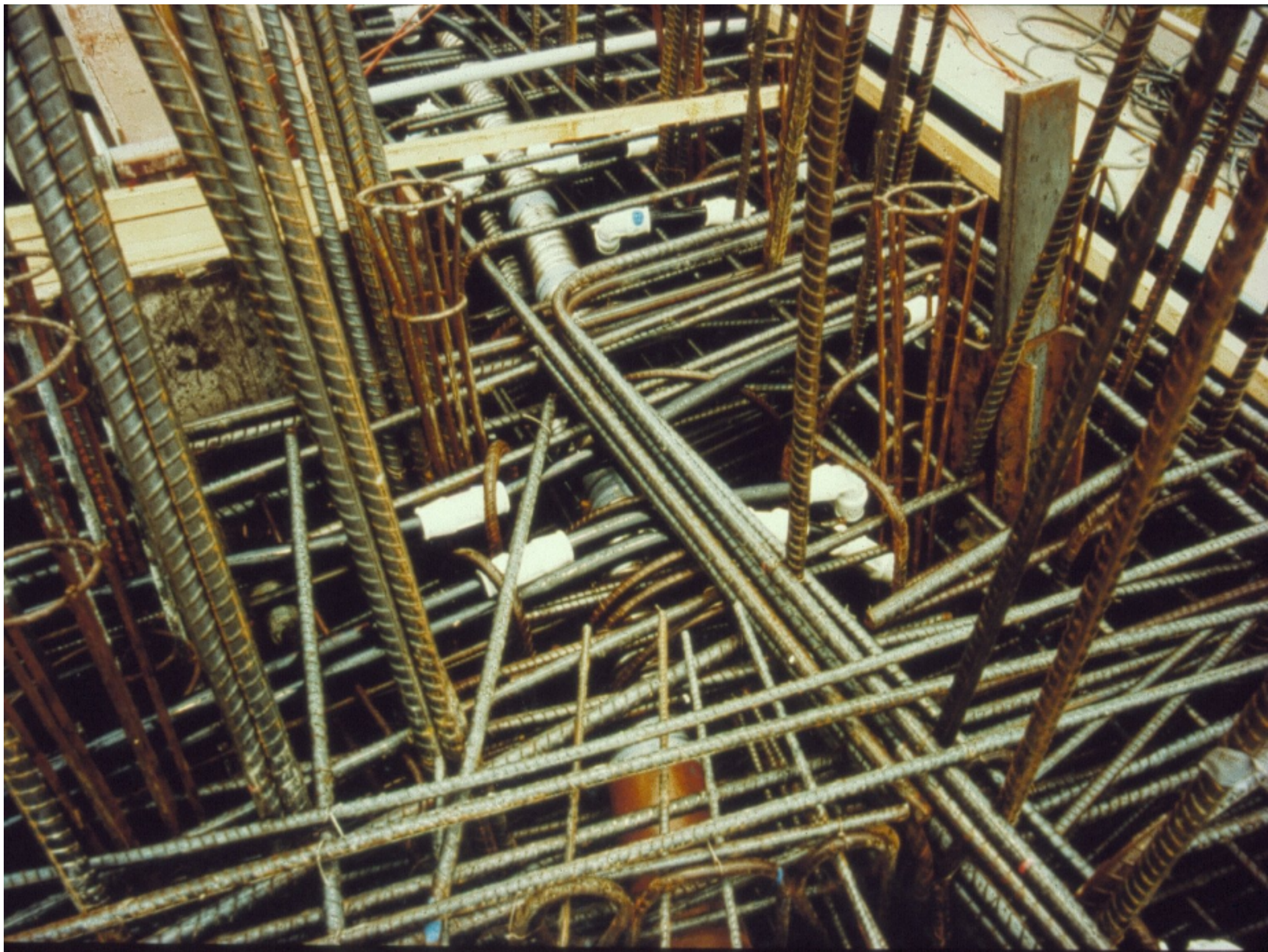


La taille maximum
des granulats
est déterminée par
la taille de
l'élément en béton

Le diamètre
maximum doit
être inférieur
un cinquième de la
taille de l'élément

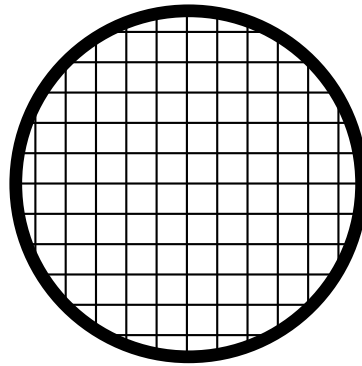
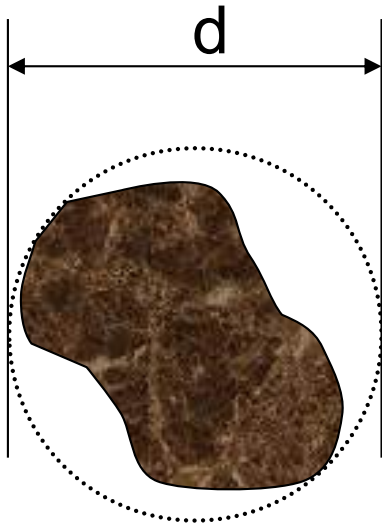


Ex. mur du 150 mm, taille max ~30 mm

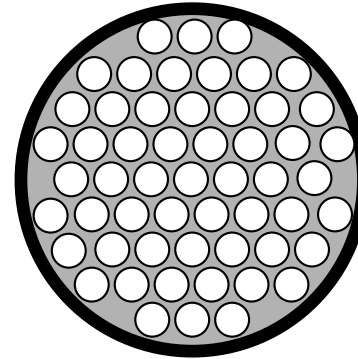




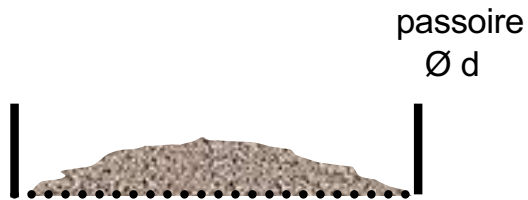
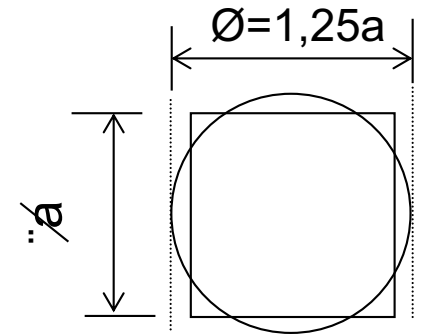
Mélanges continus



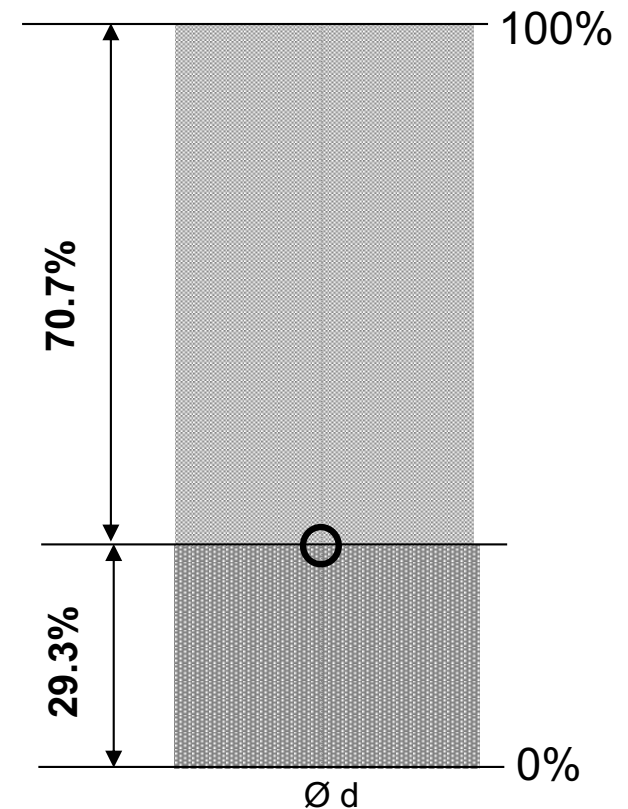
tamis



passoire

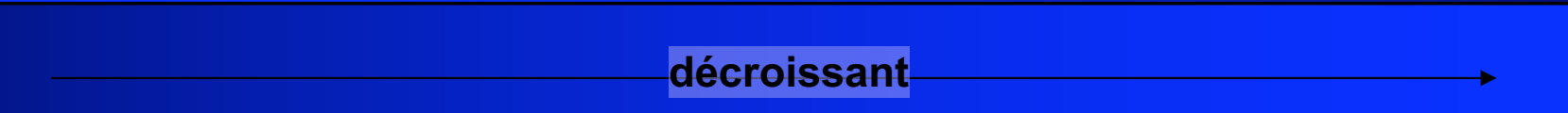


	<u>Poids</u> en gr.	<u>Poids</u> en %
<i>refus</i>	1414	70.7
<i>tamisat</i>	586	29.3
<i>total</i>	2000	100

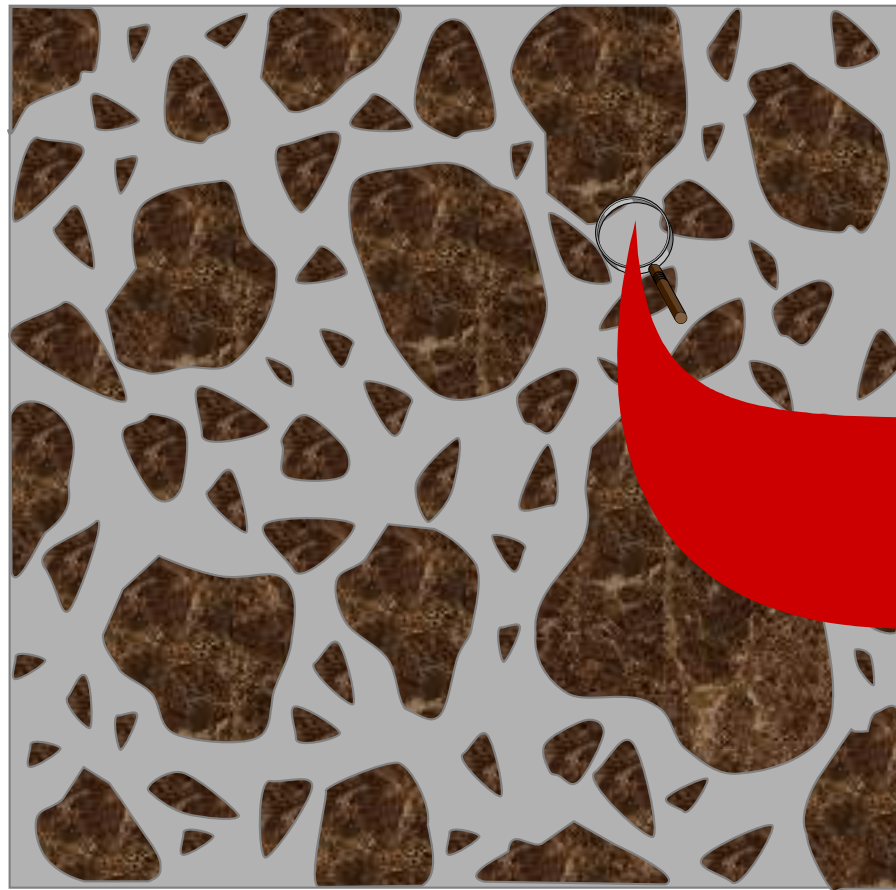




La forme des granulats

	granulats roulés			
forme	sphériques	aplatis / allongés	cubiques	aplatis / allongés
				
angularité	arrondis		anguleux	
état de surface	lisses		rugueux	
besoin en eau				
ouvrabilité aptitude au compactage				

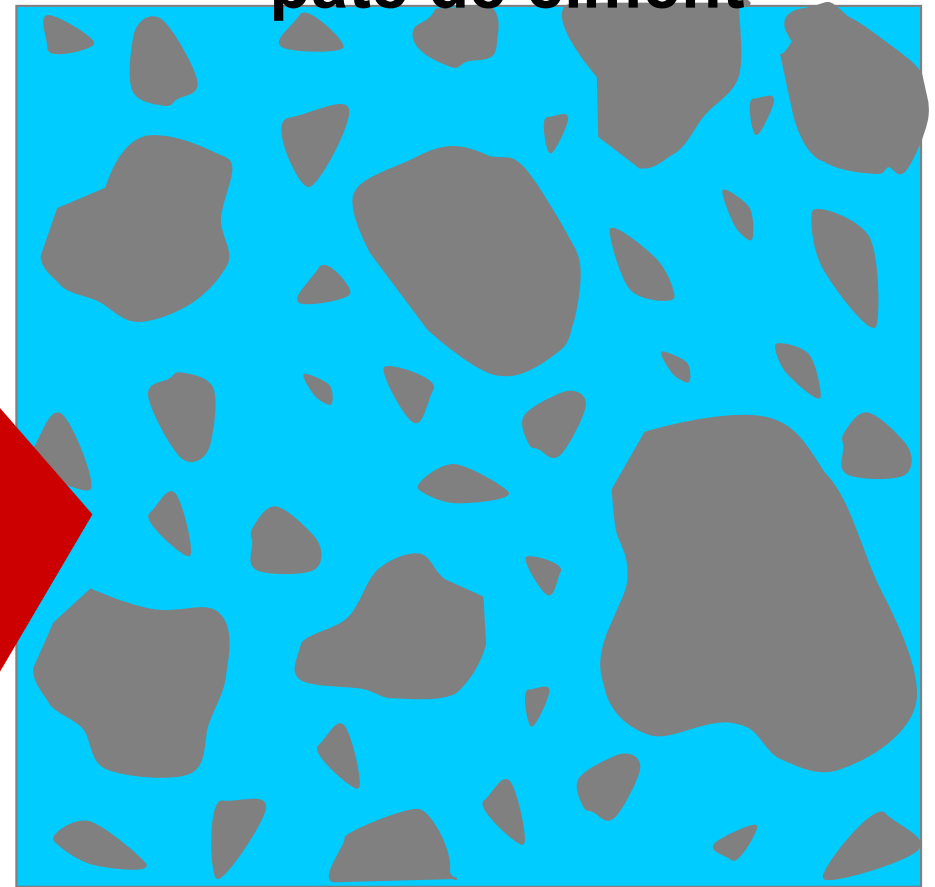
2 niveaux de microstructure



squelette ~60-70% vol.
granulaire

colle ~40-30% vol.
pâte de ciment

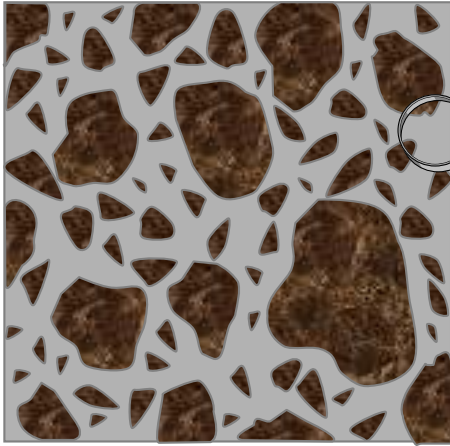
pâte de ciment



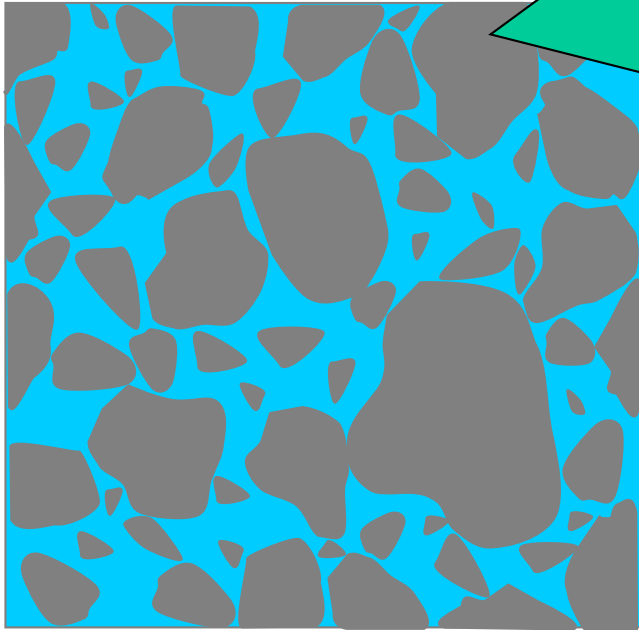
Au départ

Grains de ciment ~30-50% vol.

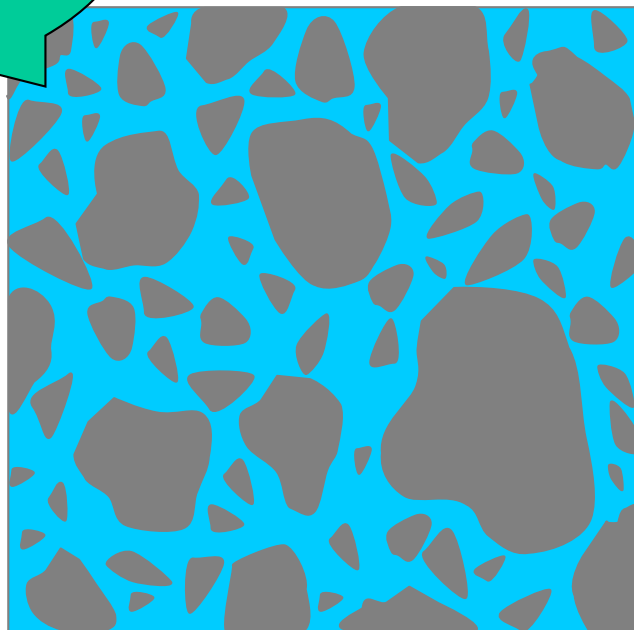
L'eau ~70-50% vol.



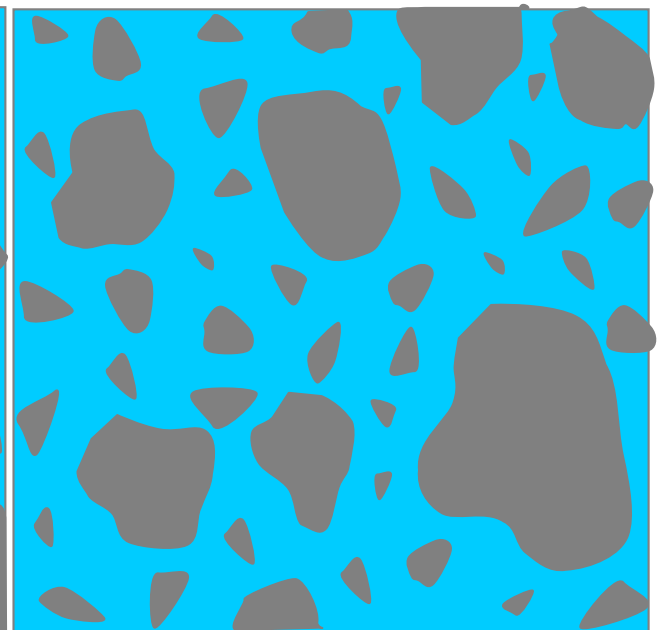
La pâte de ciment Rapport e/c



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

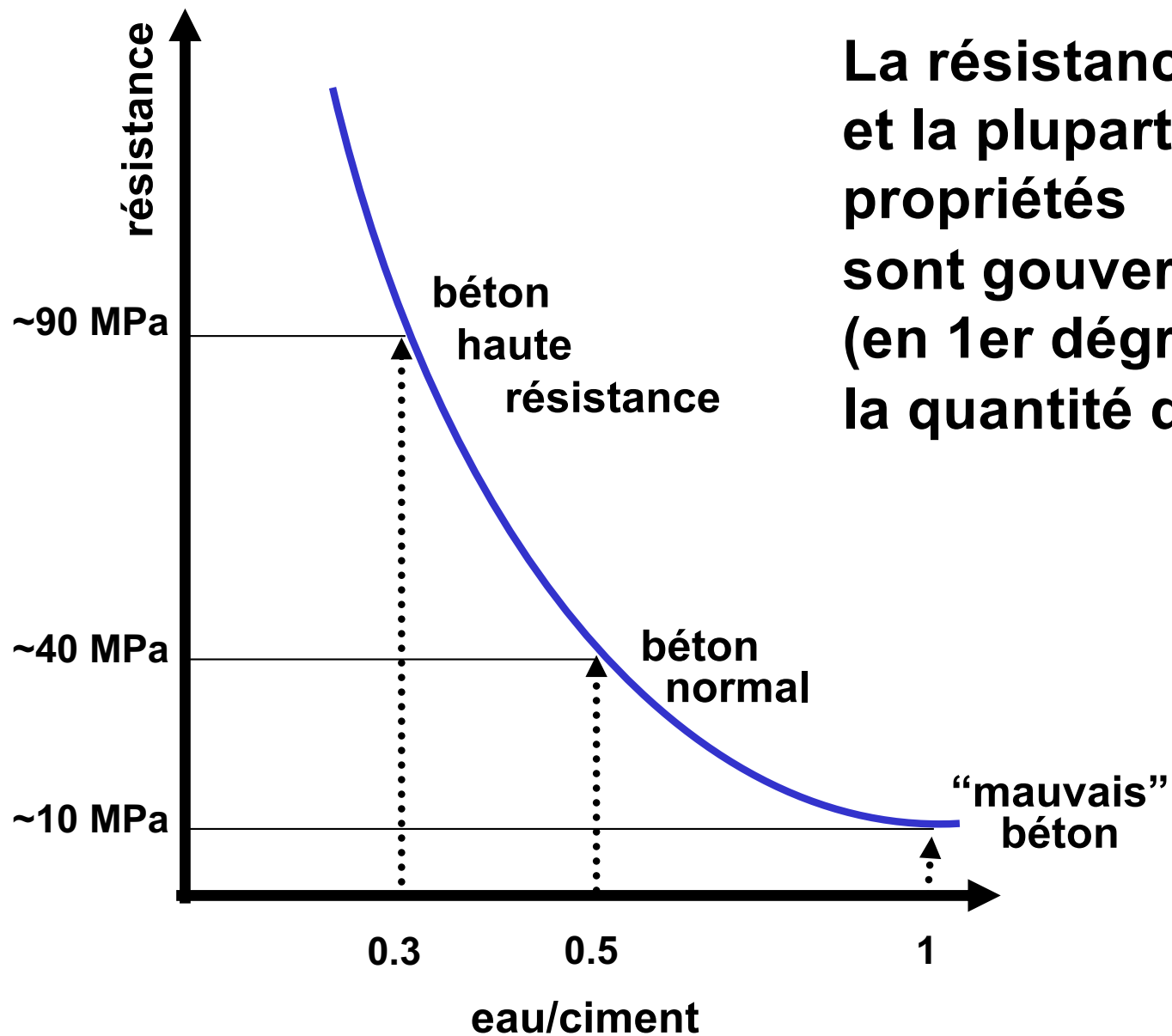


e/c moyen
ex. 0.45
Vol. ciment ~ 40%



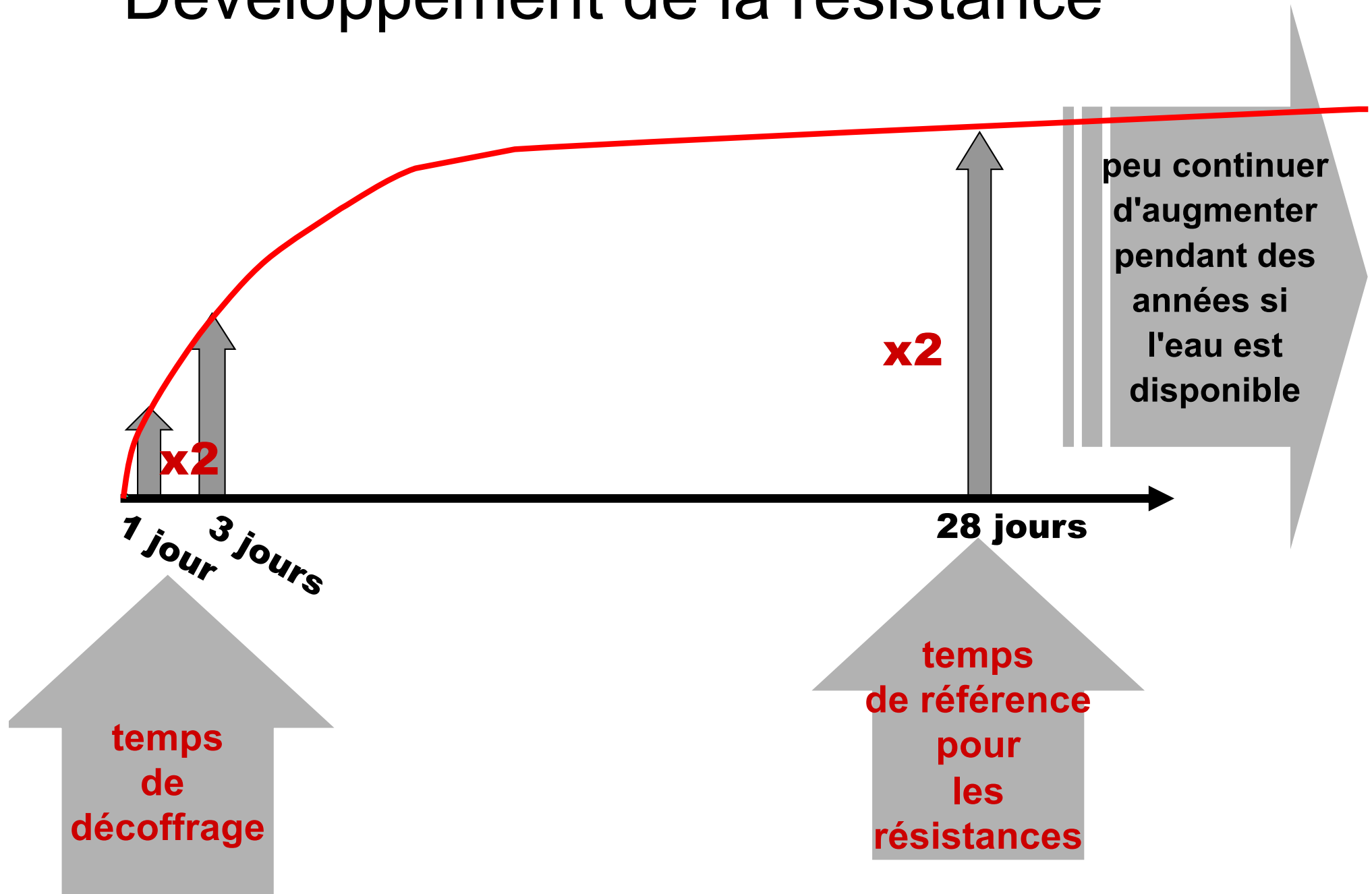
e/c élevé
ex. 0.6
Vol. ciment ~ 35%

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

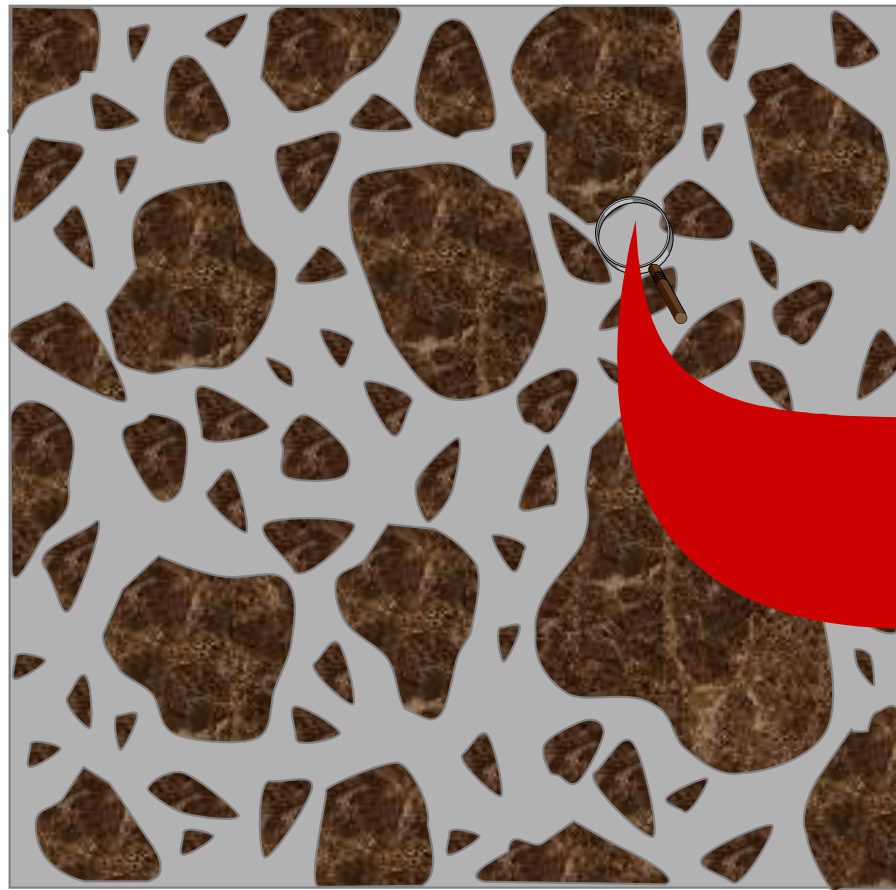


**La résistance mécanique
et la plupart des autres
propriétés
sont gouvernées
(en 1er degré) par
la quantité d'eau ajoutée**

Développement de la résistance



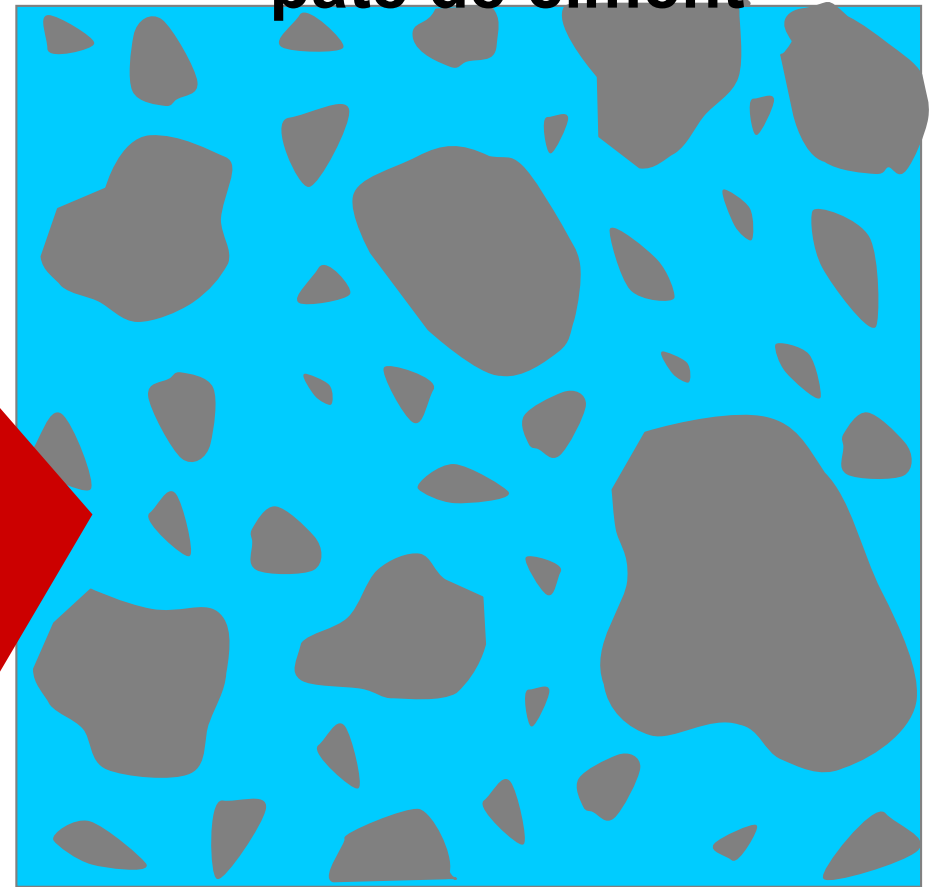
2 niveaux de microstructure



squelette ~60-70% vol.
granulaire

colle ~40-30% vol.
pâte de ciment

pâte de ciment

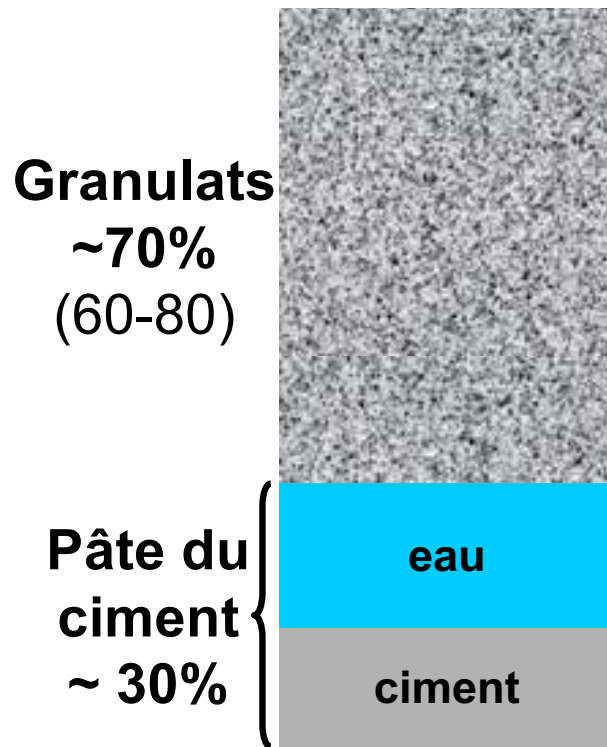


Au départ

Grains de ciment ~30-50% vol.

L'eau ~70-50% vol.

La pâte de ciment doit remplir les espaces entre les granulats

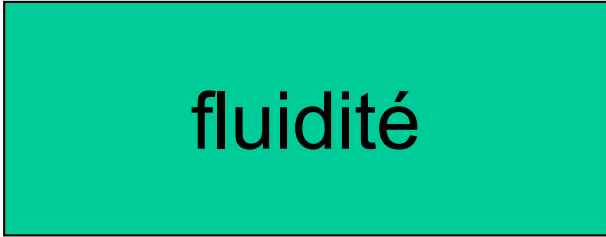


Quand le $e/c \downarrow$, il faut augmenter
« *le dosage en ciment* » pour garder
le même volume de pâte
qui donne la fluidité du béton

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

Ouvrabilité

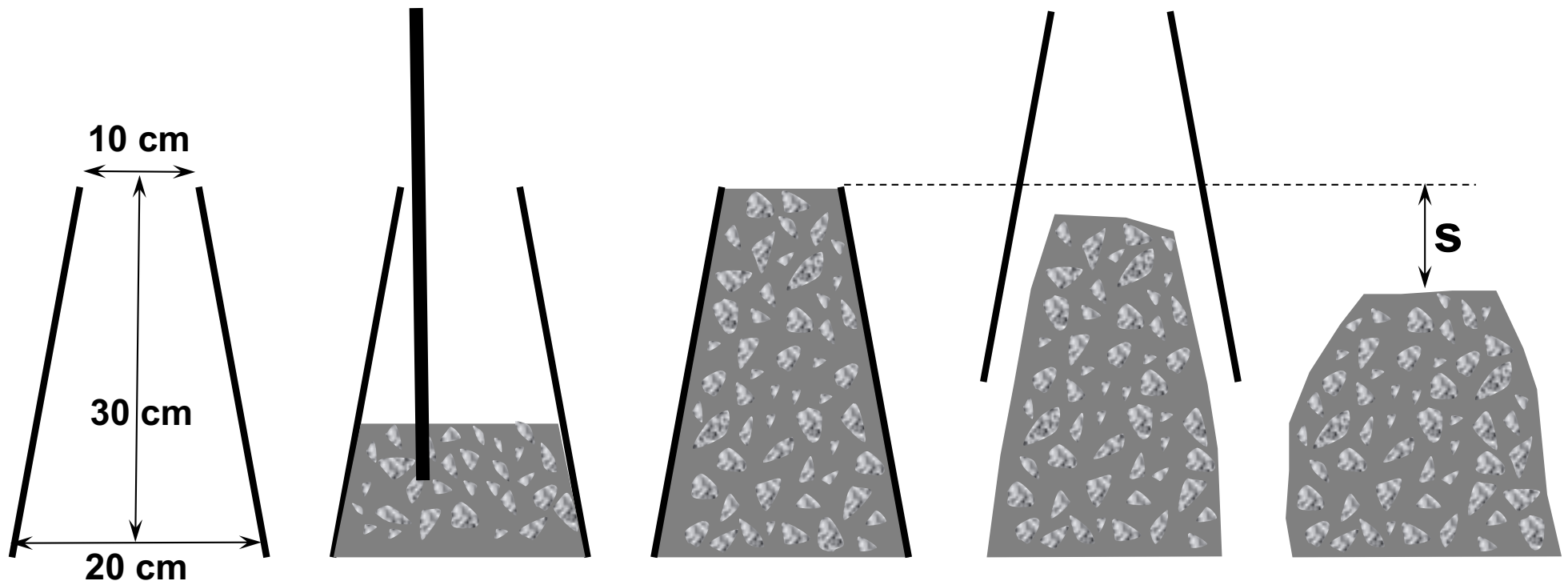
Capacité à remplir les formes
à se compacter



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

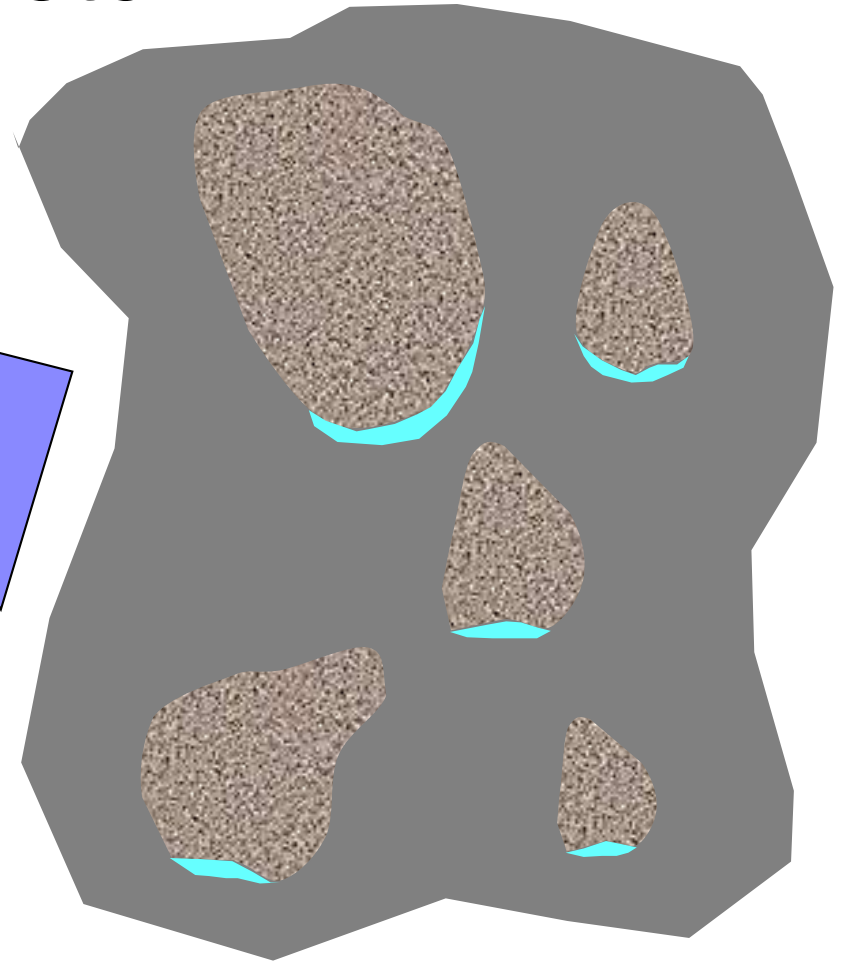
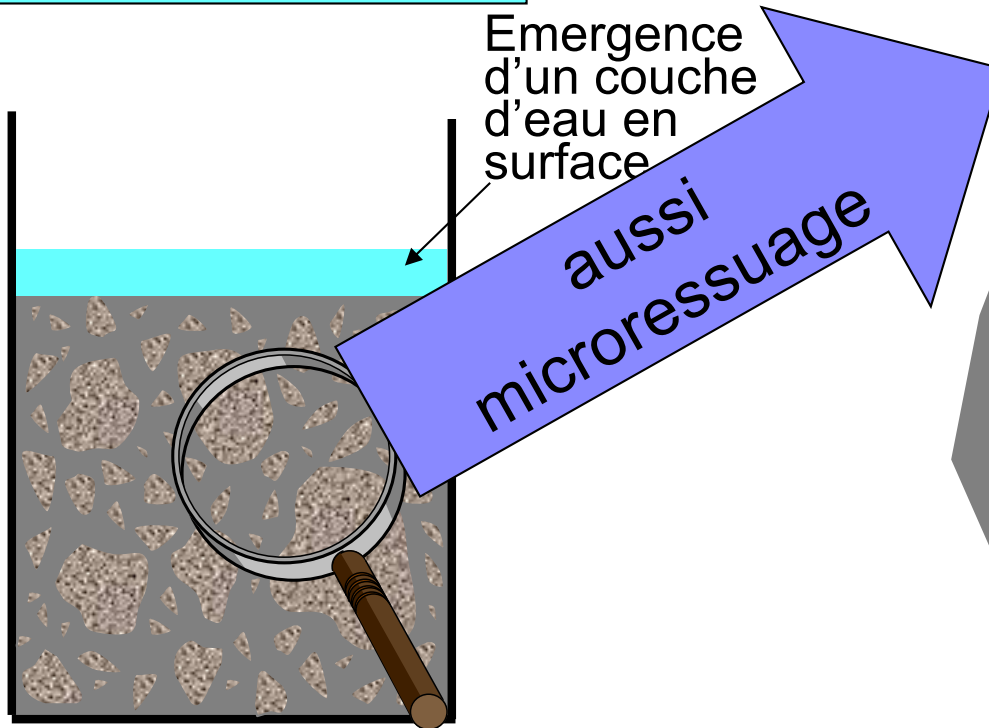
Slump test



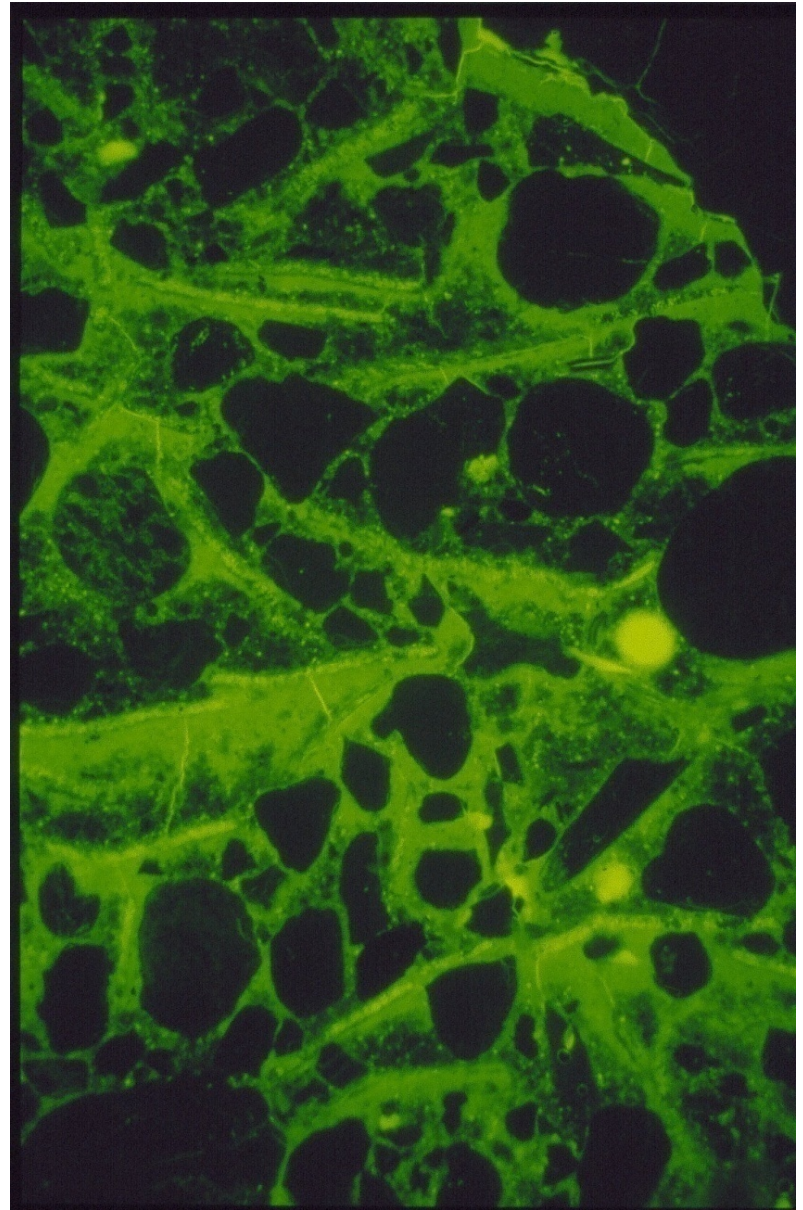
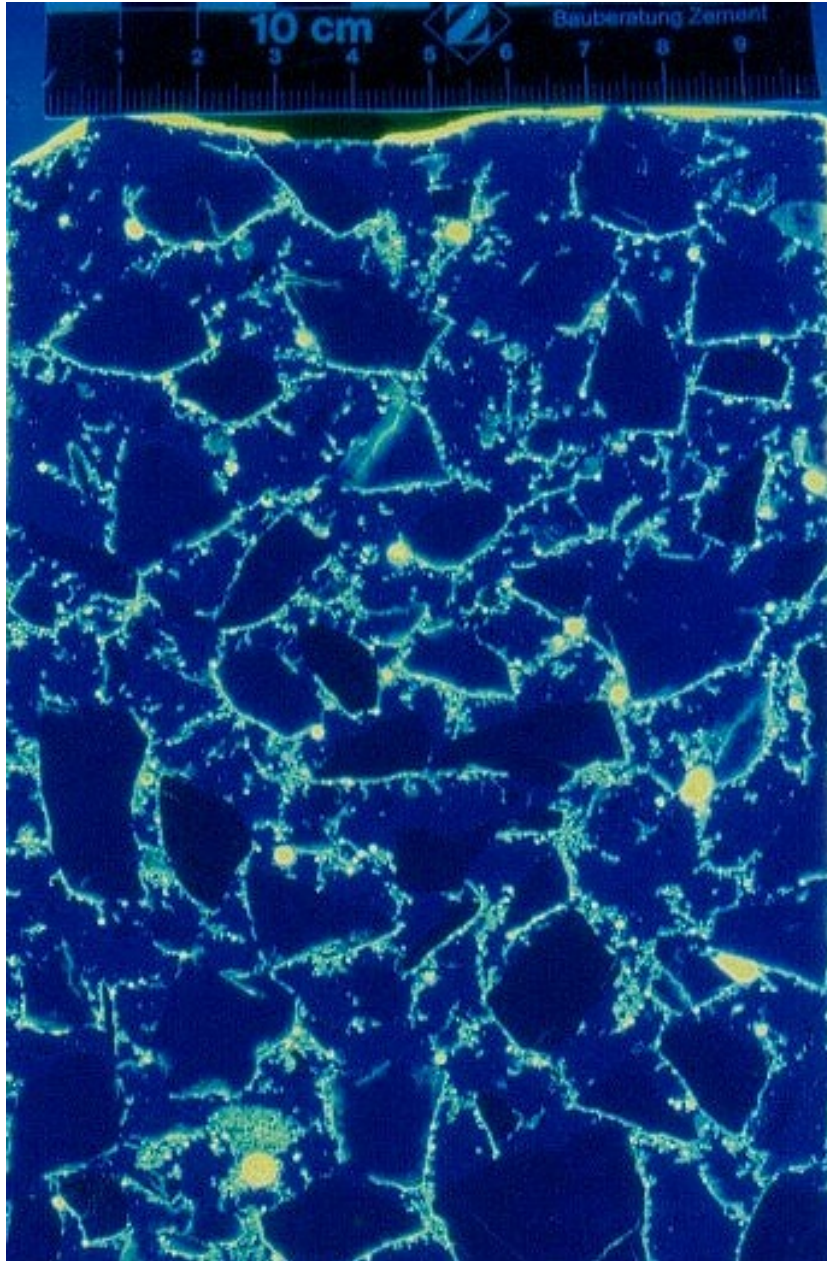


À éviter pour un bon béton:

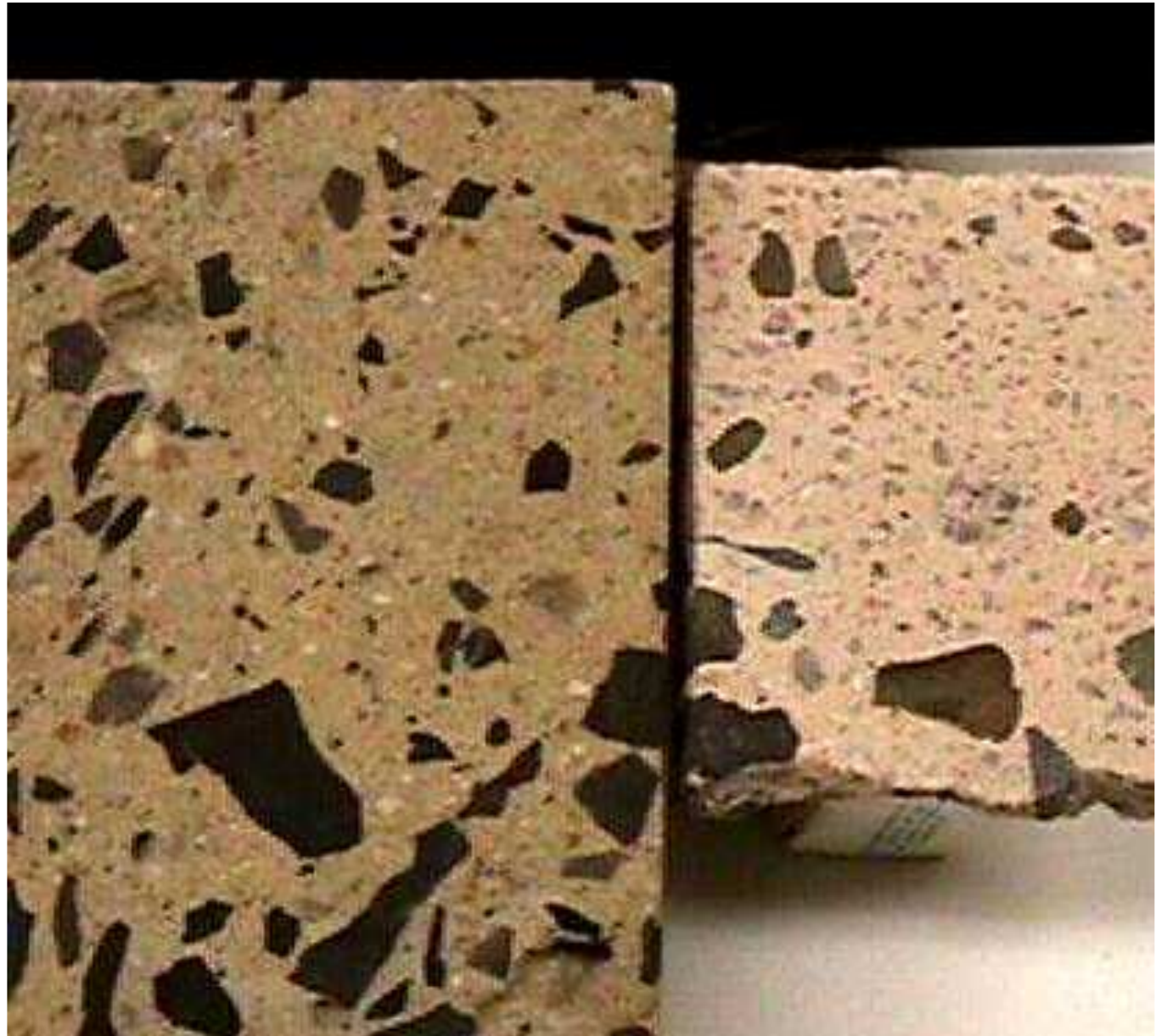
Ressuage - (bleeding)



bleeding

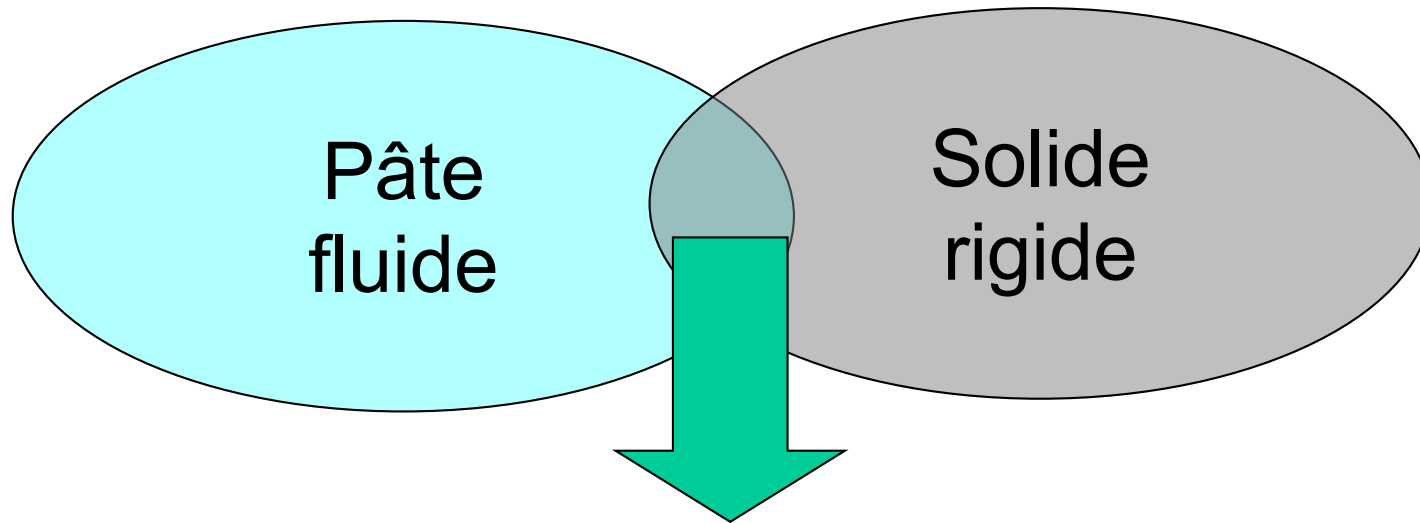


ségrégation



- **Le ressuage et la ségrégation peuvent être évités avec une bonne formulation du béton:**
- **bonne granulométrie du squelette granulat**
- **bon dosage en ciment**
- **bon rapport e/c**

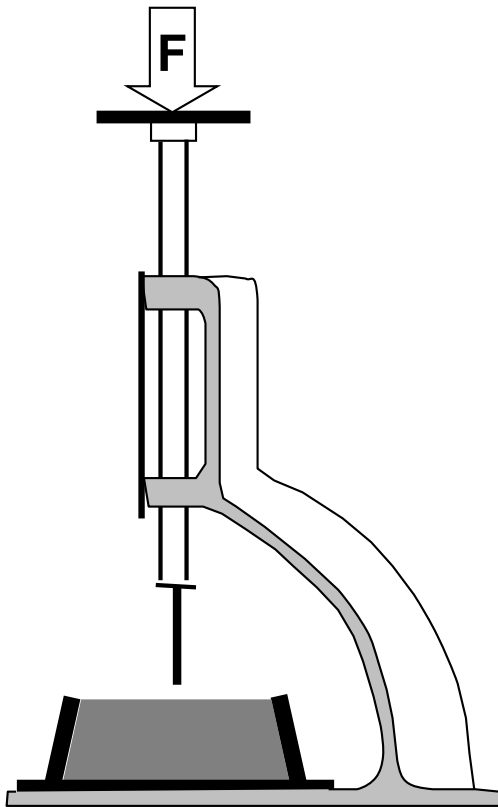
La prise



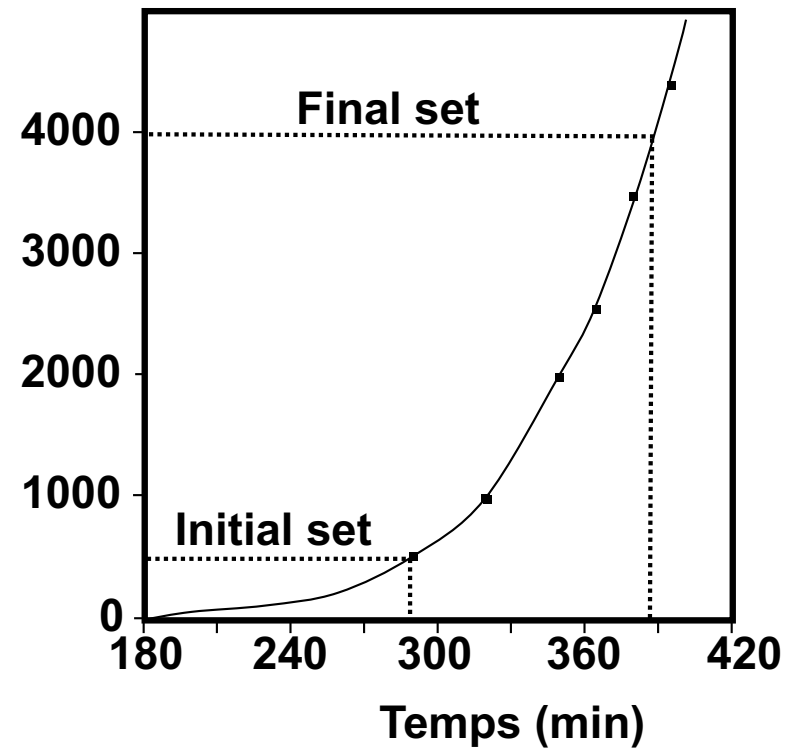
La transition n'est pas franche
la définition de la prise est un peu
arbitraire

Aiguille « Vicat »

Le test classique:



Résistance à la pénétration (psi)



La prise

- **Avec des méthodes plus précises, il semble que la prise corresponde au point de formation d'un squelette solide continu.**

Un peu de pratique!

EPFL Learning Centre

Images Alain Herzog

http://mediatheque.epfl.ch/modules.php?include=view_album.php&file=index&name=gallery&op=download&set_albumName=albup82



© Alain Herzog



© Alain Herzog



© Alain Herzog









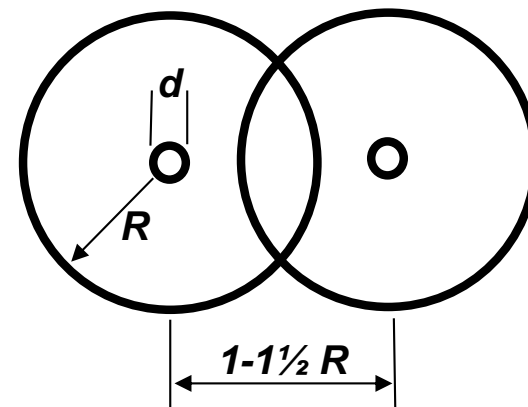
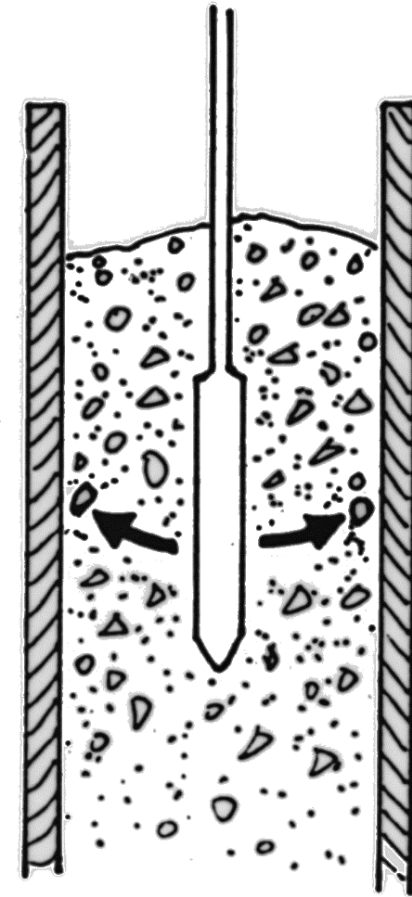


© Alain Herzog



© Alain Herzog





Zone d'influence

$$R = (3 \text{ à } 5) \times d$$



© Alain Herzog