

BétonlabFree 3
Leçon N°2

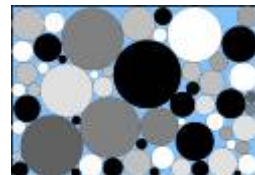
Compacité – Indice de serrage

François de Larrard

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

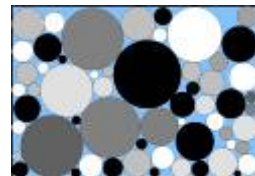
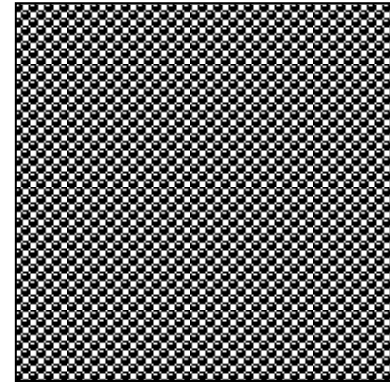
Plan de la leçon

- Compacité, porosité
- Effet du mode de mise en place – Indice de serrage
- Effet des parois du récipient
- Notion de compacité propre
- Compacité d'un mélange binaire
- Compacité d'un mélange ternaire
- Granularité continue
- Intérêt du concept en formulation des bétons
- Quelques fausses idées à évacuer
- Conclusion



Compacité, porosité

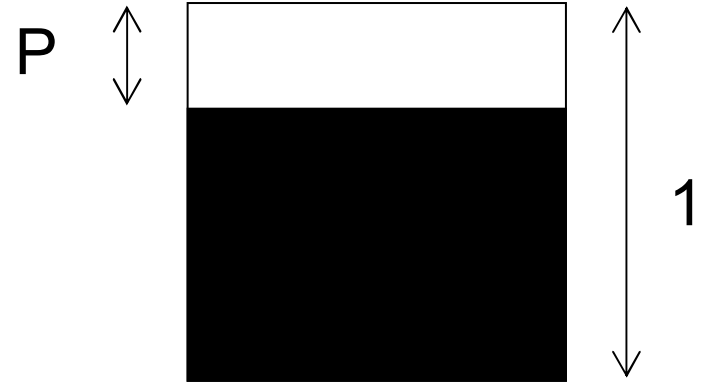
- mélange granulaire sec (grains solides non liés et vides)
- compacité = proportion de volume solide / volume total



Compacité, porosité (suite)

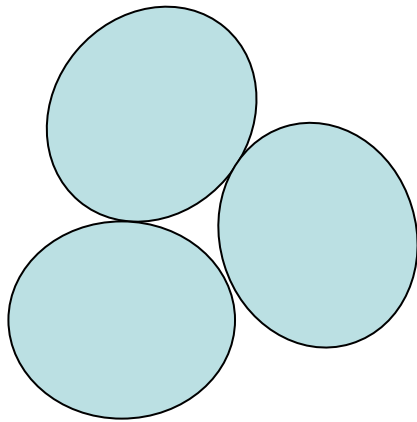
- porosité = proportion vide/volume total

$$\text{porosité} + \text{compacité} = 1$$



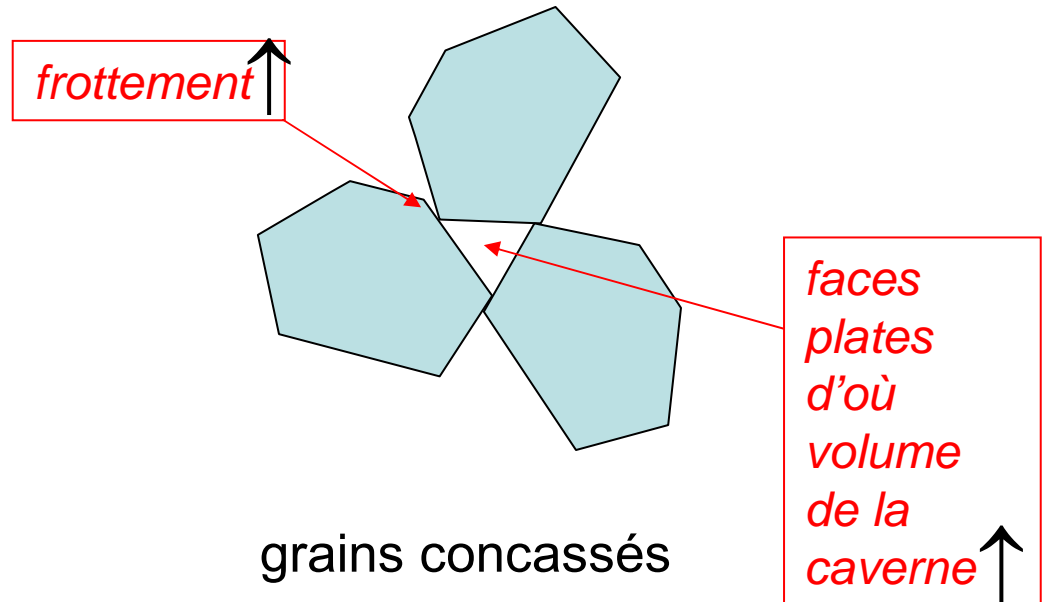
Compacité, porosité (suite)

- mélanges de grains de taille similaire: la compacité dépend de la forme (et de la rugosité) des grains



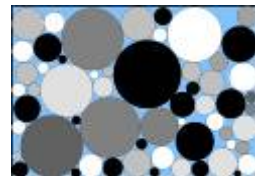
grains roulés

$\Phi \approx 0,60 - 0,64$



grains concassés

$\Phi \approx 0,53 - 0,58$



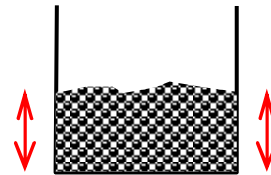
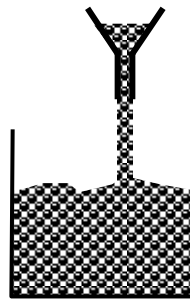
Effet du mode de mise en place

Indice de serrage

La compacité dépend du mode de mise en place

simple versement

$$\Phi = 0,56$$

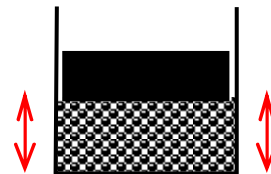
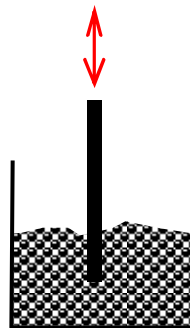


vibration

$$\Phi = 0,58$$

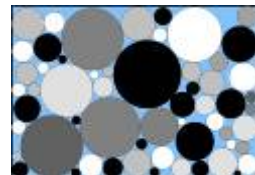
piquage

$$\Phi = 0,57$$



vibration + compression

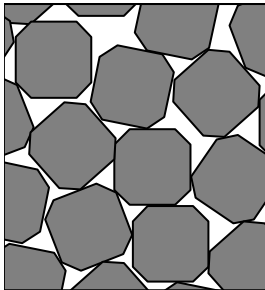
$$\Phi = 0,63$$



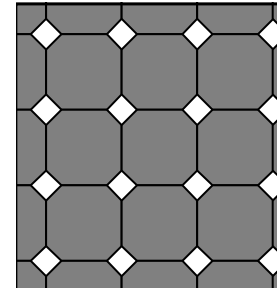
Effet du mode de mise en place

Indice de serrage (suite)

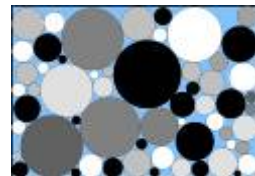
- La valeur maxi correspondrait à un mélange construit grain par grain (mélange « virtuel »)



mélange réel
(arrangement aléatoire)



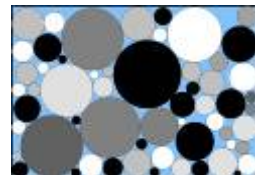
mélange virtuel
(arrangement ordonné)



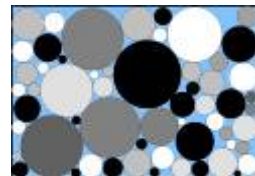
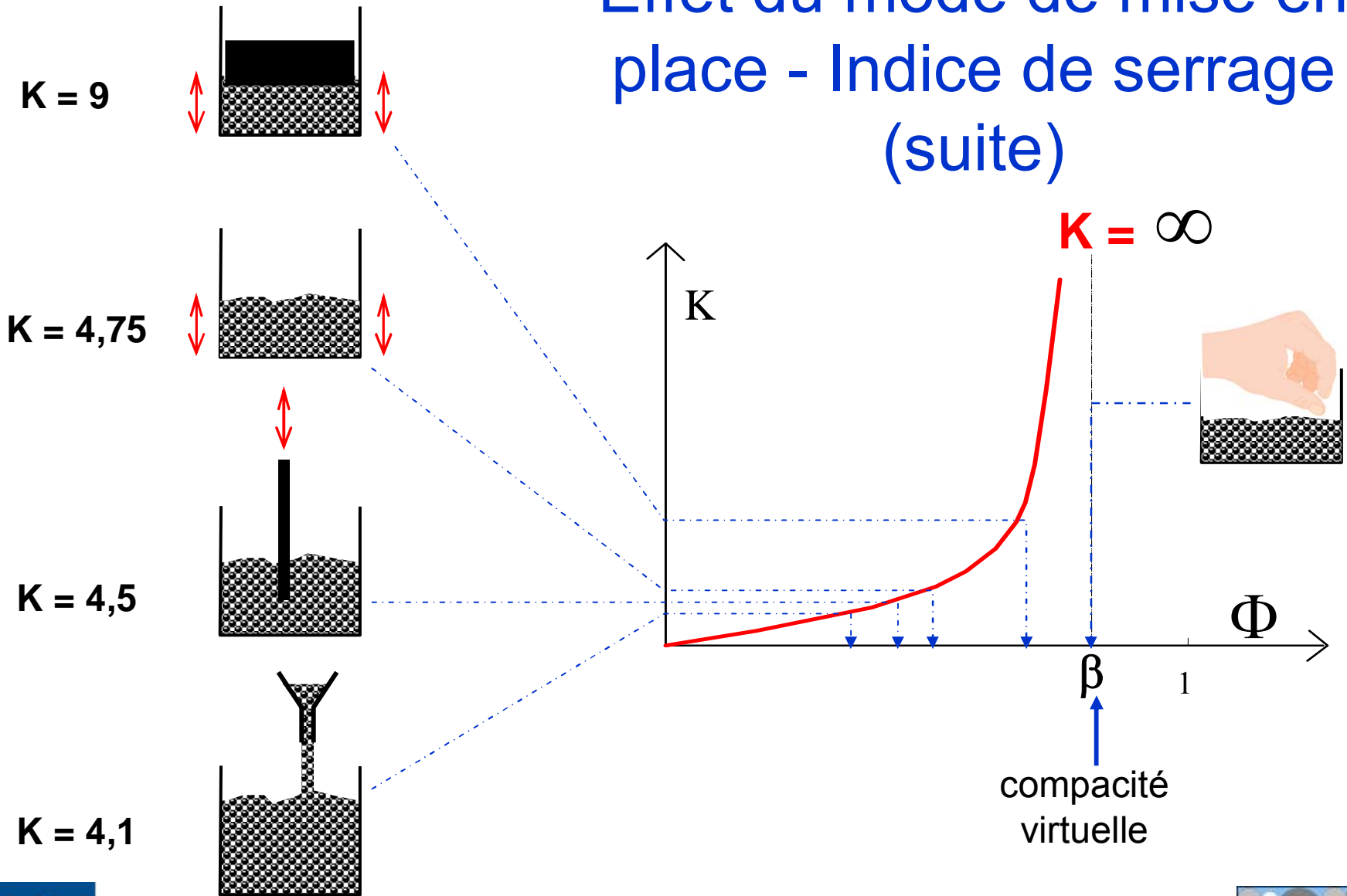
Effet du mode de mise en place

Indice de serrage (suite)

- L'indice de serrage K caractérise l'énergie fournie pour la mise en place du système
- K dépend du mode de mise en place et de compactage de l'empilement
- La compacité croît avec K

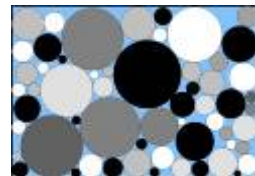
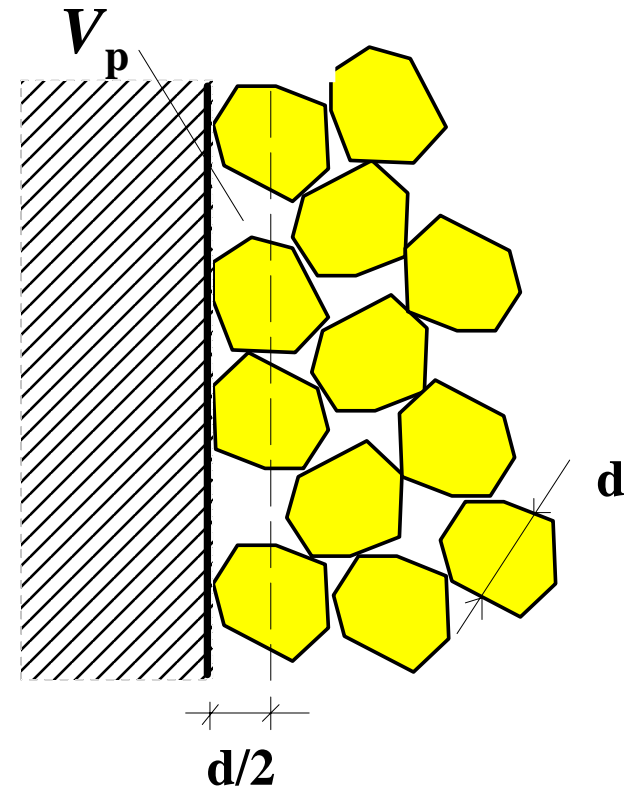


Effet du mode de mise en place - Indice de serrage (suite)



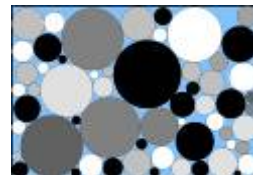
Effet des parois du récipient

- Dans le volume V_p , il y a plus de vides qu'en pleine masse
- La compacité à l'échelle d'un récipient de dimension L sera réduite quand d/L augmentera
- On distingue la compacité en milieu infini, de celle en milieu confiné (confinement dépendant des dimensions du moule)



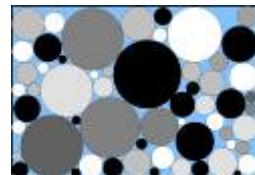
Notion de compacité propre

- Dans un mélange quelconque, on appelle classe granulaire l'ensemble des grains dont la grosseur est encadrée par les tailles de deux tamis successifs
- Si on empile ces grains séparément, on mesure une compacité *réelle* α , qui correspond à une compacité *virtuelle* β , résultant de la forme et de la rugosité de cette population particulière
- La compacité du mélange global sera conditionnée par les compacités virtuelles de chaque classe, et par l'indice de serrage global

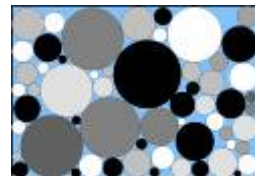


Exemple

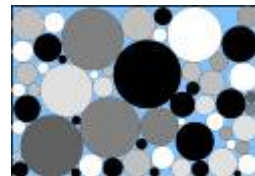
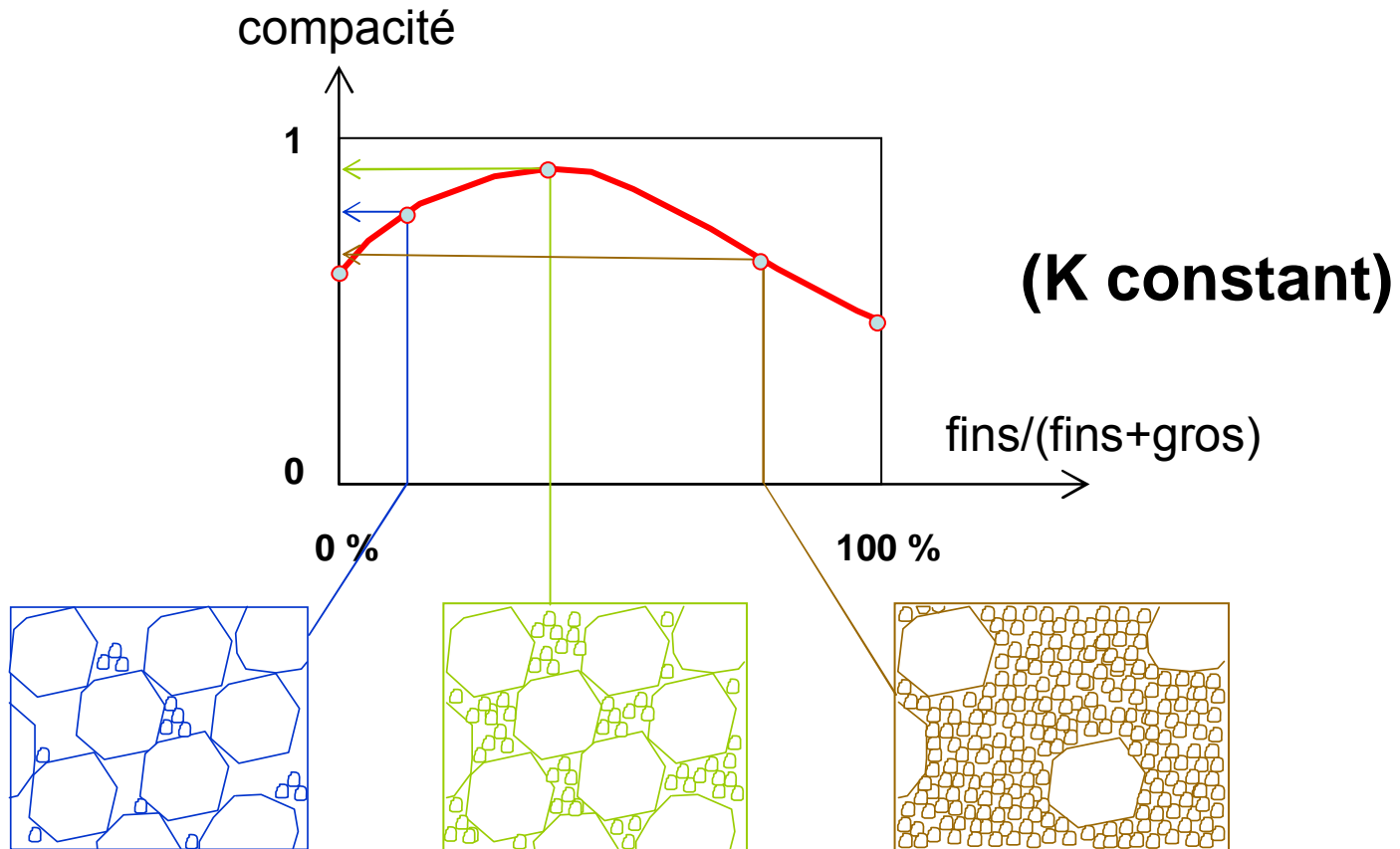
- Dans un béton typique, on pourrait avoir par exemple
 - un ciment: grains anguleux, petite taille, $\beta \approx 0,48$ (0,53 en présence d'adjuvant)
 - un sable: grains roulés et lisse, $\beta \approx 0,63$
 - un petit gravillon: grains semi-concassés relativement aplatis, $\beta \approx 0,66$
 - un gros gravillon: grains semi-concassés de meilleure forme, $\beta \approx 0,70$



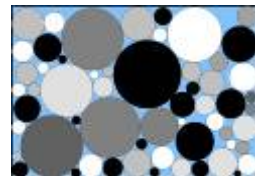
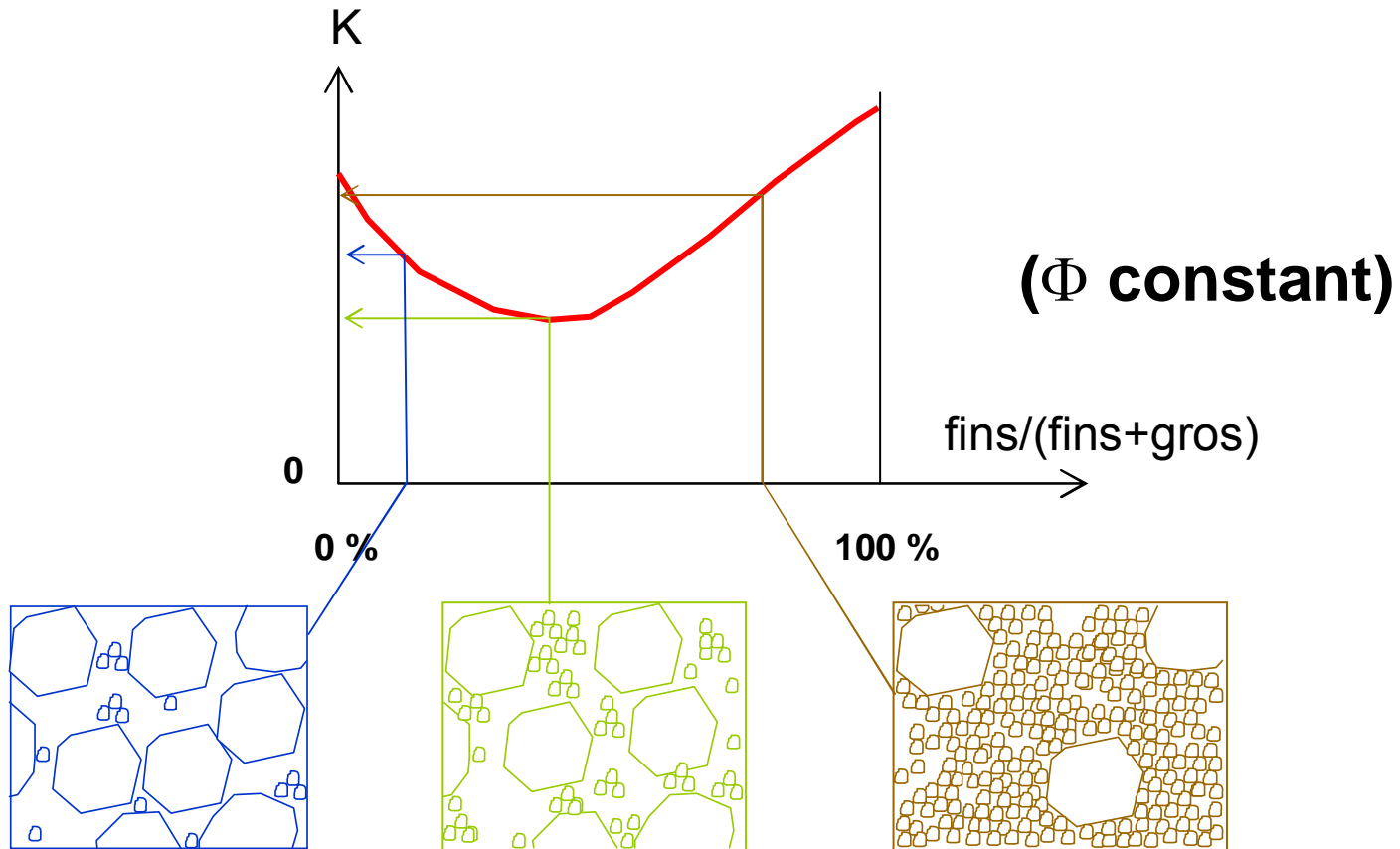
MÉLANGES BINAIRES



compacité \leftrightarrow proportions



indice de serrage \leftrightarrow proportions



Proportions optimales

maximum de compacité

à indice de serrage fixé

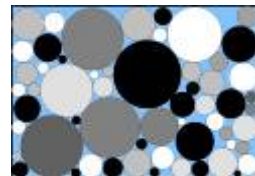
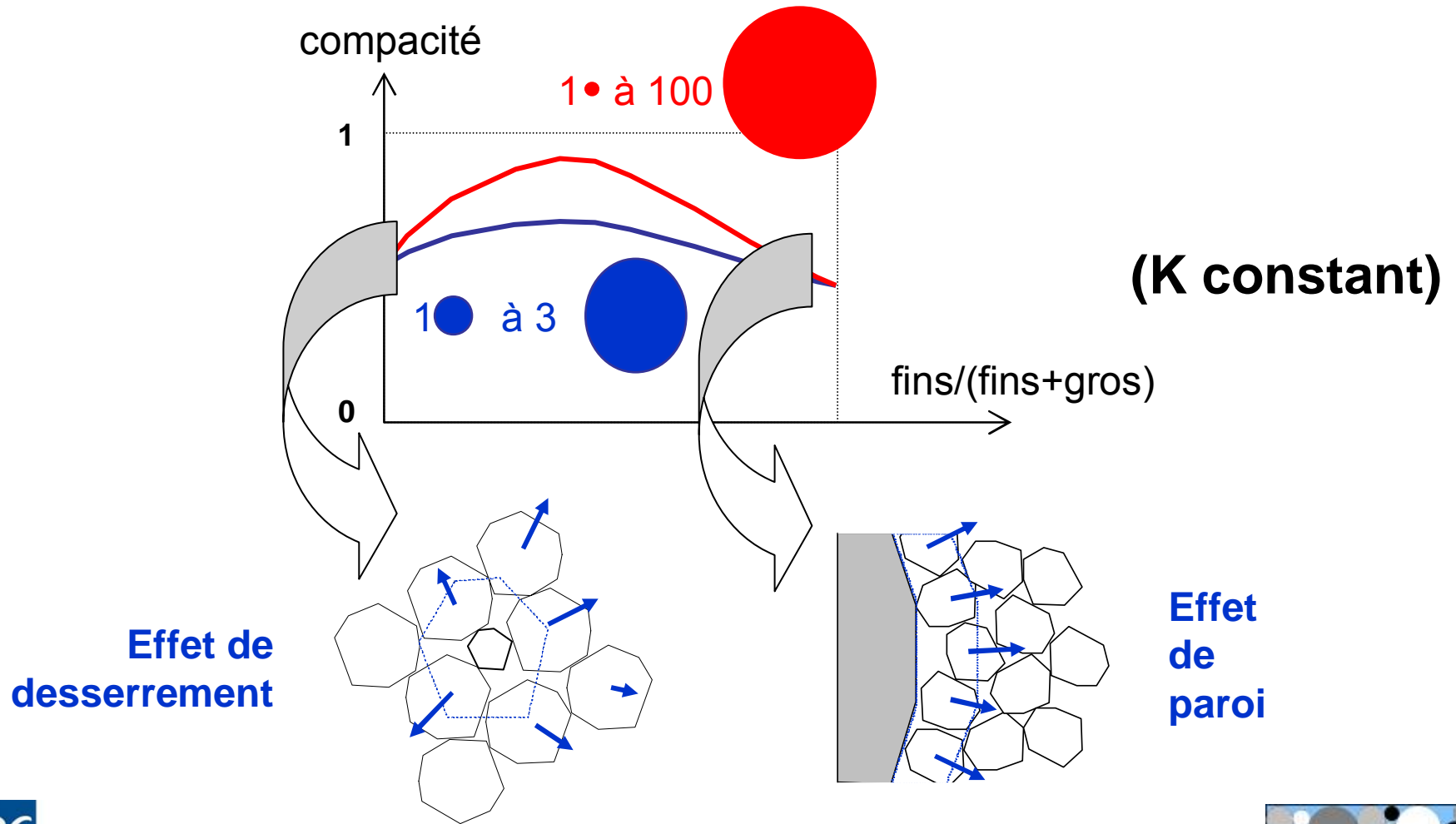
ou

minimum d'indice de serrage

à compacité fixée

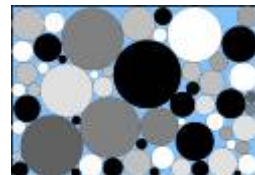


Effet du rapport des tailles

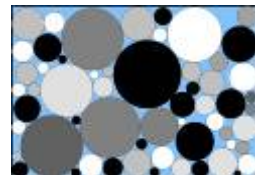


Conclusions sur les mélanges binaires

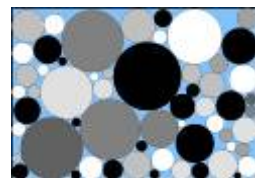
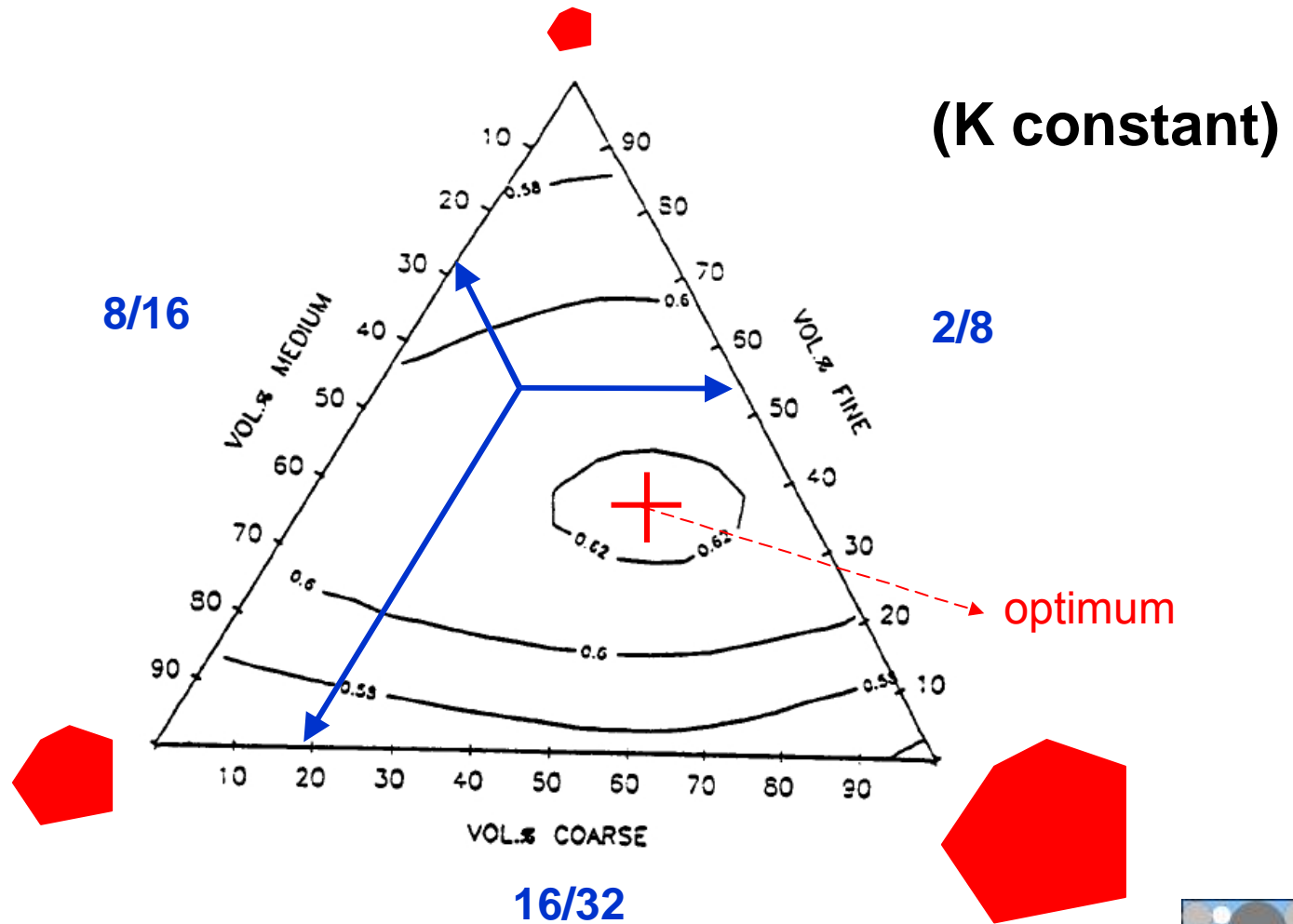
- Il existe toujours une certaine proportion fins/(fins+gros) qui donne la compacité maximale (ou l'indice de serrage minimal)
- Cette compacité maximale est d'autant plus forte que les grains ont une bonne forme, et que leurs tailles sont différentes



MÉLANGES TERNAIRES

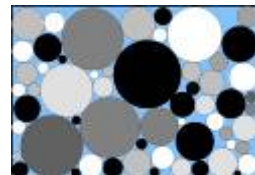


Compacité d'un mélange ternaire

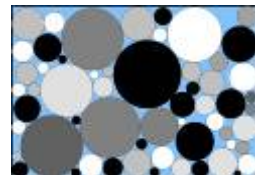


Compacité d'un mélange ternaire (suite)

- Là encore, il existe toujours un ensemble de proportions qui donne la compacité maximale
- Pour que la classe intermédiaire soit représentée, il faut
 - que sa forme soit correcte par rapport aux grains fins et gros
 - que les tailles soient suffisamment éloignées

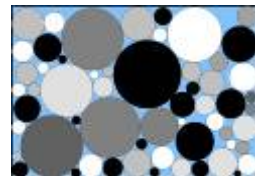


GRANULARITÉ CONTINUE



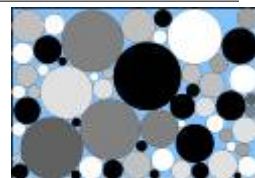
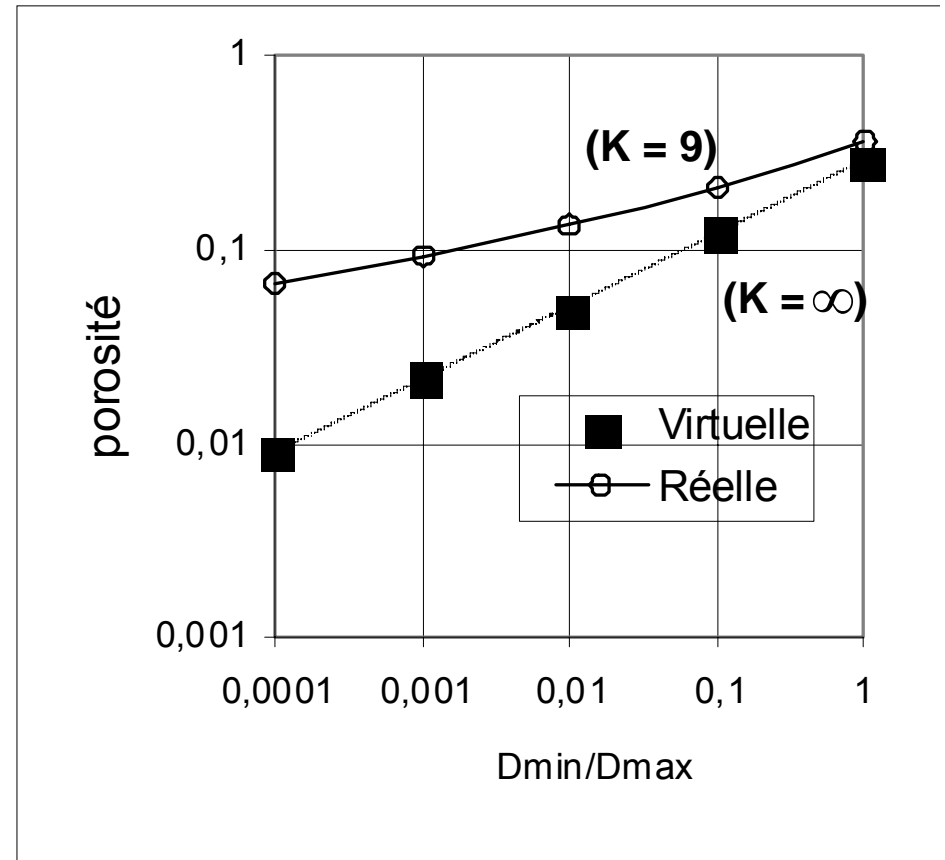
Facteurs influant la compacité

- Le cas le plus courant pour le béton
- Les mêmes tendances sont retrouvées:
 - quand l'énergie de mise en place croît, alors Φ augmente
 - quand D_{\min}/D_{\max} diminue, Φ augmente (à K fixé) ou K diminue (à Φ fixé)
 - quand la forme d'une classe de grains i s'améliore (β_i augmente), Φ croît (ou reste égal)
 - quand les dimensions du récipient diminuent, Φ diminue



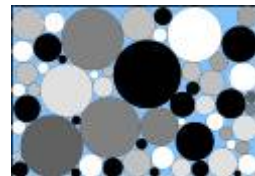
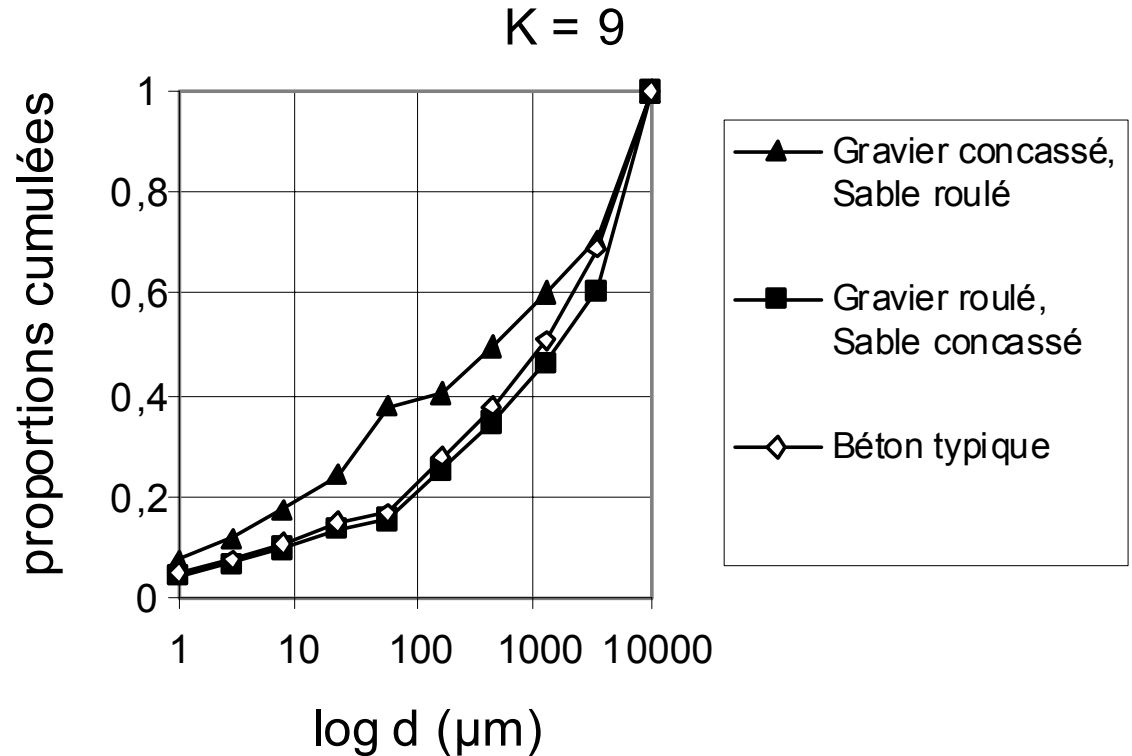
Compacité maximale

- Quand l'étendue granulaire augmente, la porosité virtuelle (pour K infini) tend vers 0, mais pas la porosité réelle
- Augmenter D ou diminuer d augmente donc la compacité, jusqu'à un certain niveau où l'effet devient négligeable



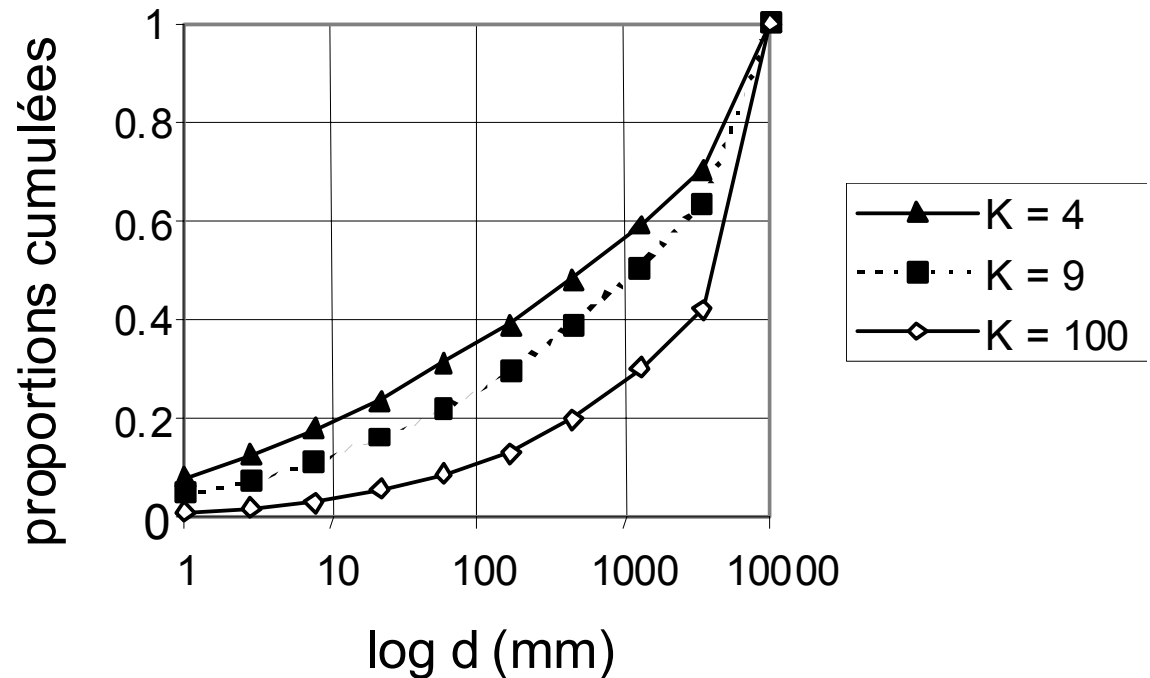
Granularité optimale

Pour D_{\min} et D_{\max} fixés, à K constant, la granularité optimale dépend de la forme des grains

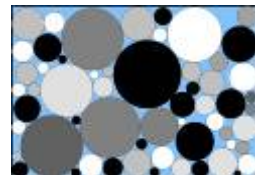


Granularité optimale (suite)

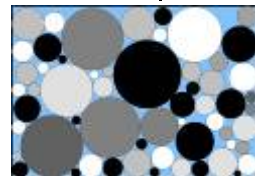
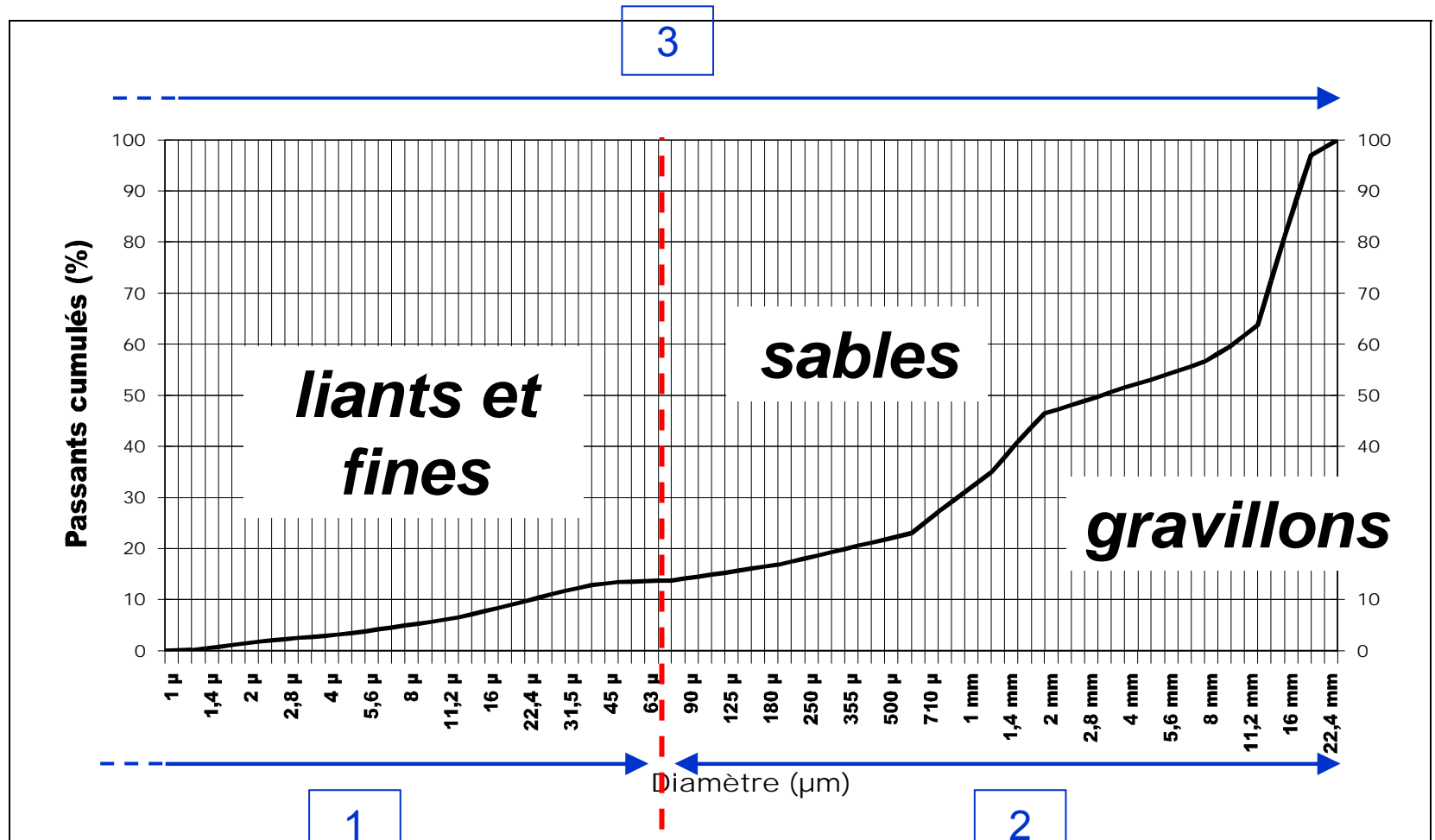
Pour un jeu de constituants donné, la granularité donnant la compacité optimale dépend de K



INTÉRÊT DES CONCEPTS DE COMPACTITÉ ET D'INDICE DE SERRAGE EN FORMULATION DES BÉTONS

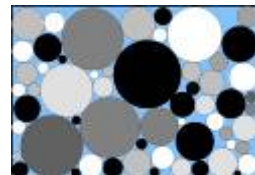


Trois systèmes granulaires



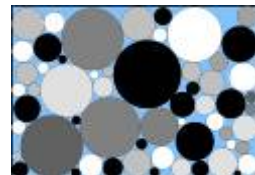
Trois systèmes granulaires (suite)

- 1° système: la matrice, ou pâte liante (grains actifs)
- 2° système: le squelette granulaire (grains inertes)
- 3° système: le béton dans son ensemble (du liant aux gros gravillons)



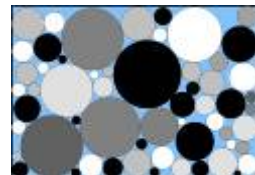
1 : la matrice

- Φ_{matrice} = volume des liants/volume de pâte
- Elle est traduite par le rapport eau/liant: quand e/l augmente, Φ_{matrice} diminue
- Quand Φ_{matrice} augmente
 - la compacité de la matrice à l'état durci croît (la porosité diminue)
 - la résistance mécanique du béton à tous les âges augmente
 - la durabilité du béton augmente (- de perméabilité à l'eau et aux gaz, - de diffusivité des chlorures etc.)



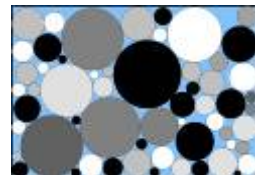
2: le squelette

- $\Phi_{\text{squelette}}$ = vol. de granulats/vol. du béton
- Sa porosité correspond au volume de matrice
- Quand $\Phi_{\text{squelette}}$ augmente:
 - le béton est moins maniable à l'état frais
 - le béton est plus rigide à l'état durci (+ de module élastique, - de retrait/fluage...)
 - le béton est plus économique (volume de liants plus faible)



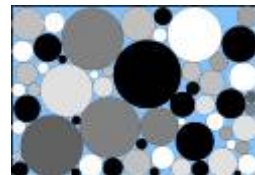
3: le béton dans son ensemble

- Sa porosité correspond au volume eau+air
- La compacité du béton est liée à sa masse volumique (qui croît avec $\Phi_{\text{béton}}$)
- L'indice de serrage du béton traduit la facilité de mise en place, pour les bétons nécessitant une action de vibration/compactage mécanique
- L'indice de serrage doit prendre en compte le confinement exercé par le coffrage et les armatures (sauf pour les bétons de masse)



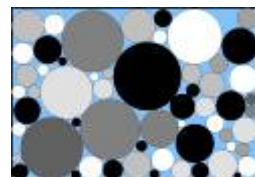
Quelques fausses idées à évacuer

- « Il existe une courbe granulaire idéale qui maximise la compacité ». Faux car les proportions optimales du squelette dépendent
 - de la forme des grains (compacité des différentes fractions);
 - de l'indice de serrage visé;
 - de la structure à couler (coffrage, armatures).



Quelques fausses idées à évacuer (suite)

- « Les bétons les plus résistants sont les plus compacts ». Egalement faux car
 - c'est la compacité de la matrice qui joue, plus que celle du béton;
 - les performances des liants sont également importantes;
 - en pratique, la compacité des bétons fibrés ultra-performants ($R_{c_{28}} \approx 200$ MPa) est plus faible que celle des bétons classiques...



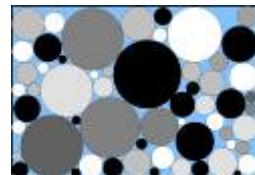
Quelques fausses idées à évacuer (suite)

- Par contre, si on fixe le dosage en ciment, alors le béton le plus compact
 - contient le volume le plus faible d'eau+vides
 - a donc le rapport eau/ciment le plus faible
 - la compacité de la matrice est la plus faible
 - et donc le béton est le plus résistant !



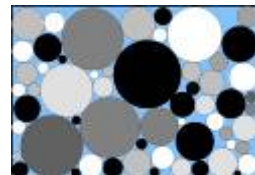
Quelques fausses idées à évacuer (suite)

- « Le rapport gravillon/sable optimal est celui pour lequel le sable remplit juste les vides des gravillons dans un empilement binaire sec ». Inexact, car
 - les liants exercent un effet de desserrement sur le sable, d'où une diminution de son volume à l'optimum;
 - l'effet des parois du récipient tend au contraire à réduire le volume de gravillon;
 - le rapport G/S doit être fixé au niveau global du béton, en prenant en compte l'ensemble du cahier des charges.



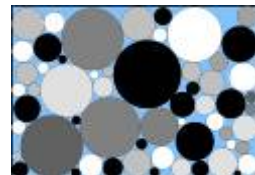
Conclusion

- Compacité = notion fondamentale pour formuler un béton
- Indice de serrage = concept dual
- L'indice de serrage K est caractéristique d'une mise en œuvre, mais ne se mesure pas directement
- Pour mesurer la compacité d'un constituant du béton, on utilise un mode opératoire caractérisé par une certaine valeur de K



Conclusion (suite)

- Compacité virtuelle: valeur maximale (énergie infinie). Caractéristique intrinsèque du matériau
- Compacité propre = compacité d'une classe mono-granulaire (ou classe étroite)
- Une mesure pratiquée sur une classe étroite donnera la compacité propre *réelle*, d'où on pourra déduire la compacité propre *virtuelle* (si on connaît l'indice de serrage associé à l'essai)



Conclusion (suite)

- Pour formuler un béton, l'expérience conduit à recommander des valeurs typiques de K suivant le type de mise en œuvre (ex.: béton ordinaire pervibré: $K \leq 6$); cf. leçon N°7
- Le fait d'utiliser des plastifiants/ superplastifiants permet d'atteindre des valeurs de K plus élevées (rôle lubrifiant de l'adjuvant)

