

BétonlabPro 3  
Leçon N°2

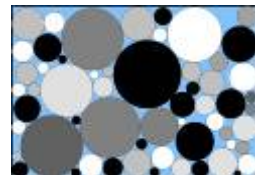
# Compacité – Indice de serrage

François de Larrard

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
Centre de Nantes

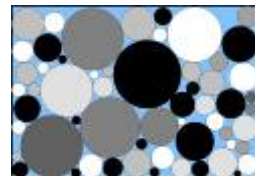
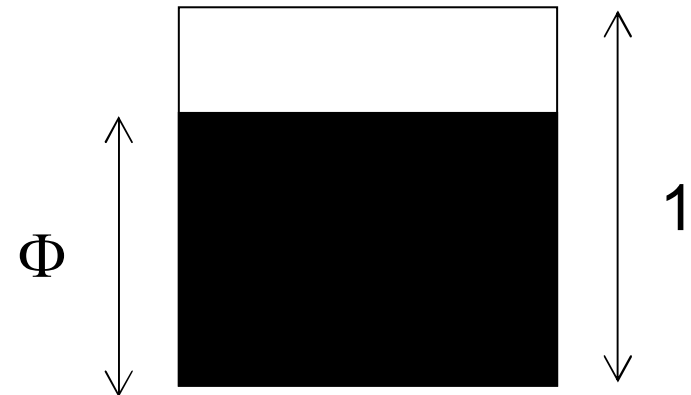
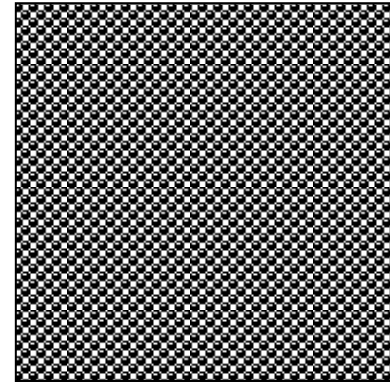
# Plan de la leçon

- 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

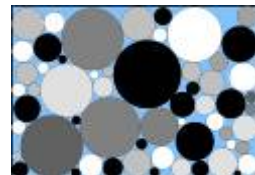
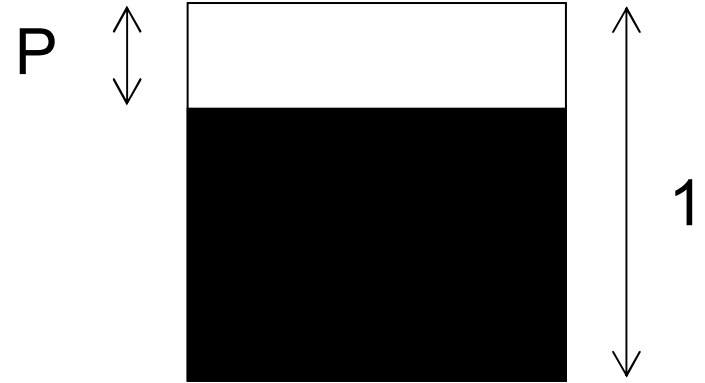
- mélange granulaire sec (grains solides non liés et vides)
- compacité = proportion de volume solide / volume total



# Compacité, porosité (suite)

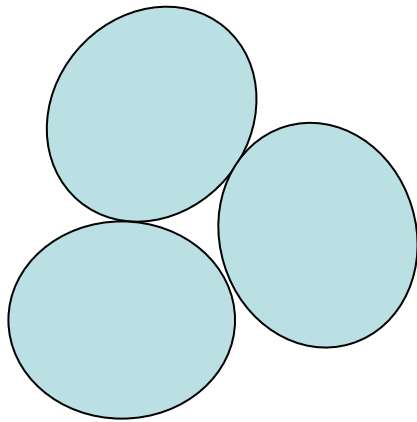
- porosité = proportion vide/volume total

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



# Compacité, porosité (suite)

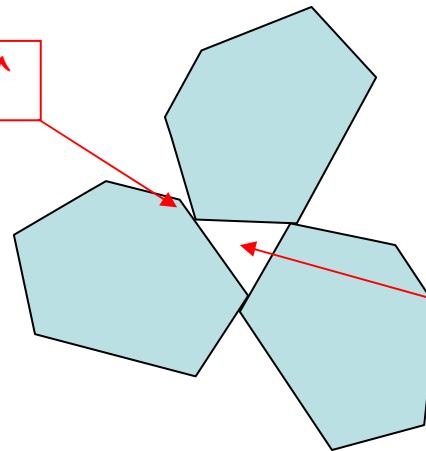
- mélanges de grains de taille similaire: la compacité dépend de la forme (et de la rugosité) des grains



grains roulés

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

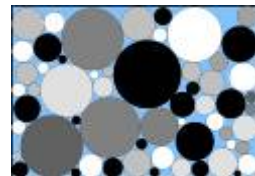
frottement ↑



grains concassés

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

faces plates d'où volume de la caverne ↑



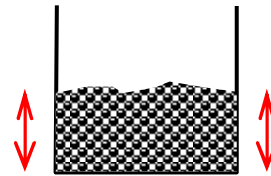
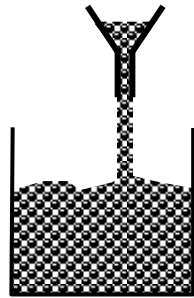
# Effet du mode de mise en place

## Indice de serrage

La compacité dépend du mode de mise en place

simple versement

$$\Phi = 0,56$$

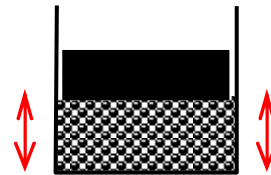
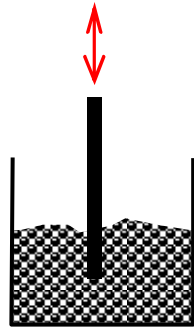


vibration

$$\Phi = 0,58$$

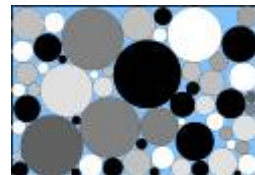
piquage

$$\Phi = 0,57$$



vibration + compression

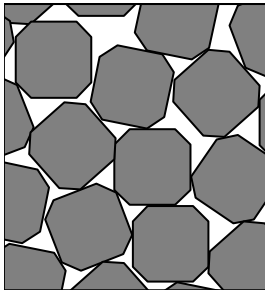
$$\Phi = 0,63$$



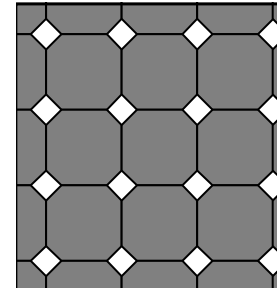
# Effet du mode de mise en place

## Indice de serrage (suite)

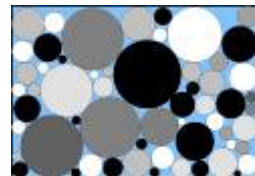
- La valeur maxi correspondrait à un mélange construit grain par grain (mélange « virtuel »)



mélange réel  
(arrangement aléatoire)



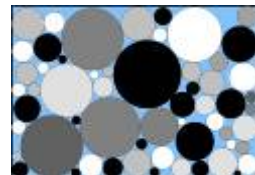
mélange virtuel  
(arrangement ordonné)



# Effet du mode de mise en place

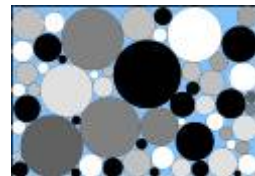
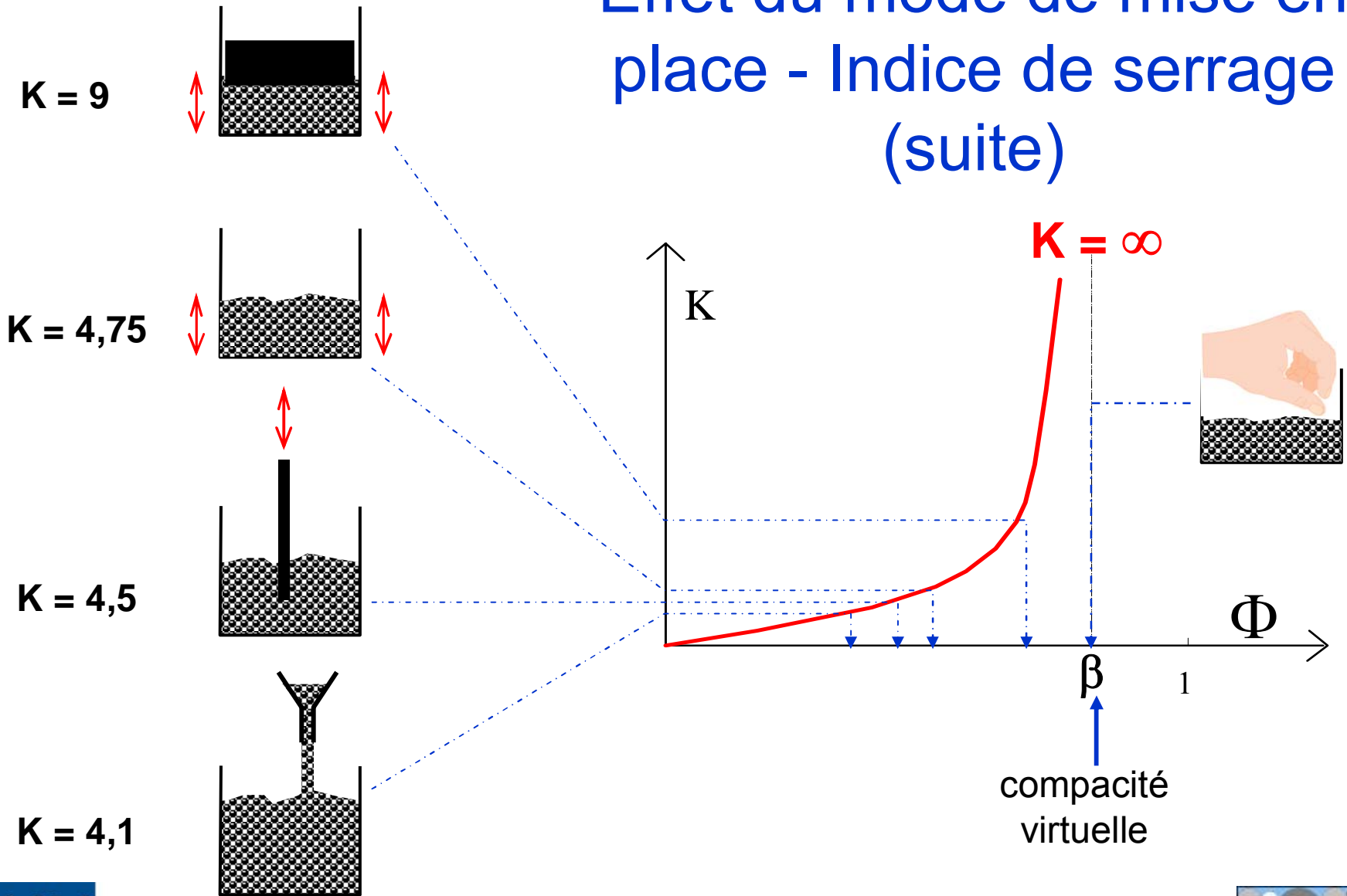
## Indice de serrage (suite)

- 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  $K$



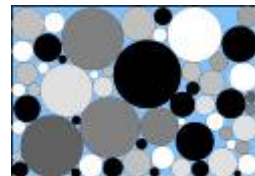
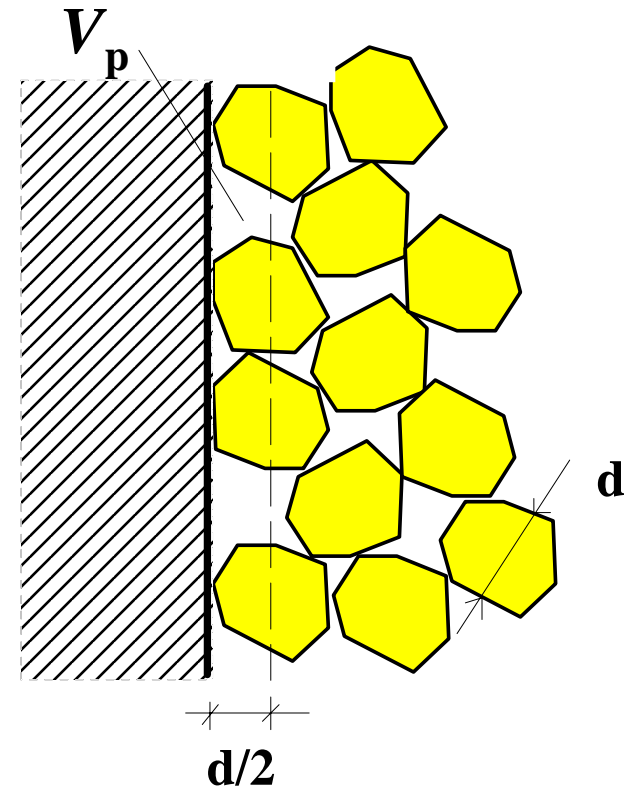


# Effet du mode de mise en place - Indice de serrage (suite)



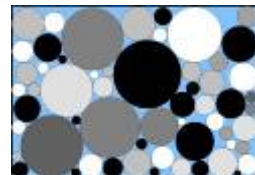
# Effet des parois du récipient

- 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)



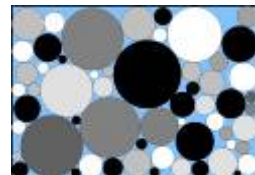
# Notion de compacité propre

- 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*  $\alpha$ , qui correspond à une compacité *virtuelle*  $\beta$ , 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

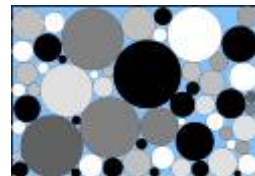


# Exemple

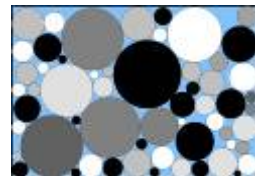
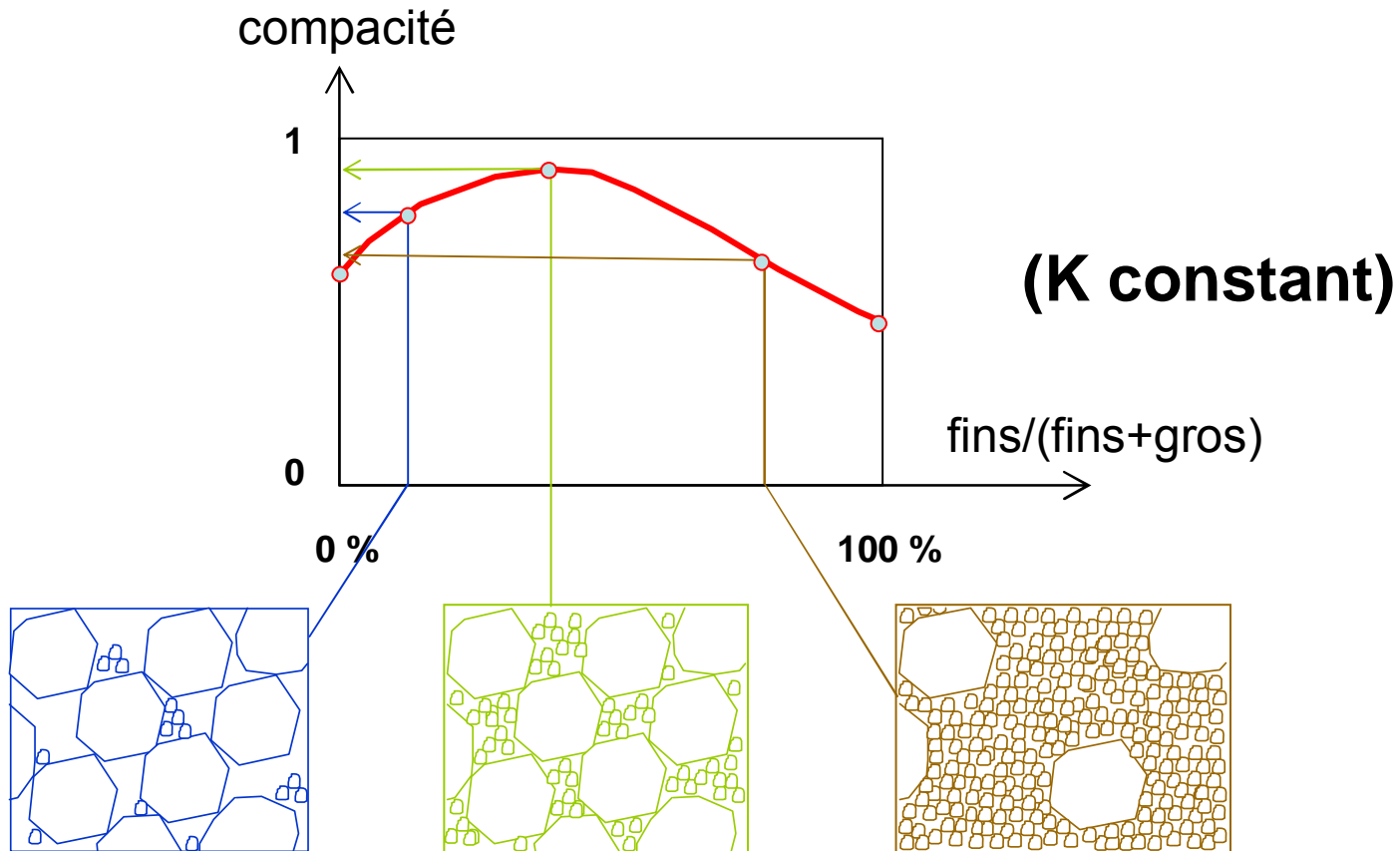
- Dans un béton typique, on pourrait avoir par exemple
  - un ciment: grains anguleux, petite taille,  $\beta \approx 0,48$  (0,53 en présence d'adjuvant)
  - un sable: grains roulés et lisse,  $\beta \approx 0,63$
  - un petit gravillon: grains semi-concassés relativement aplatis,  $\beta \approx 0,66$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



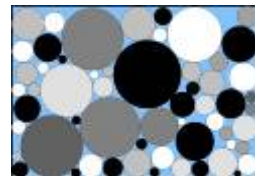
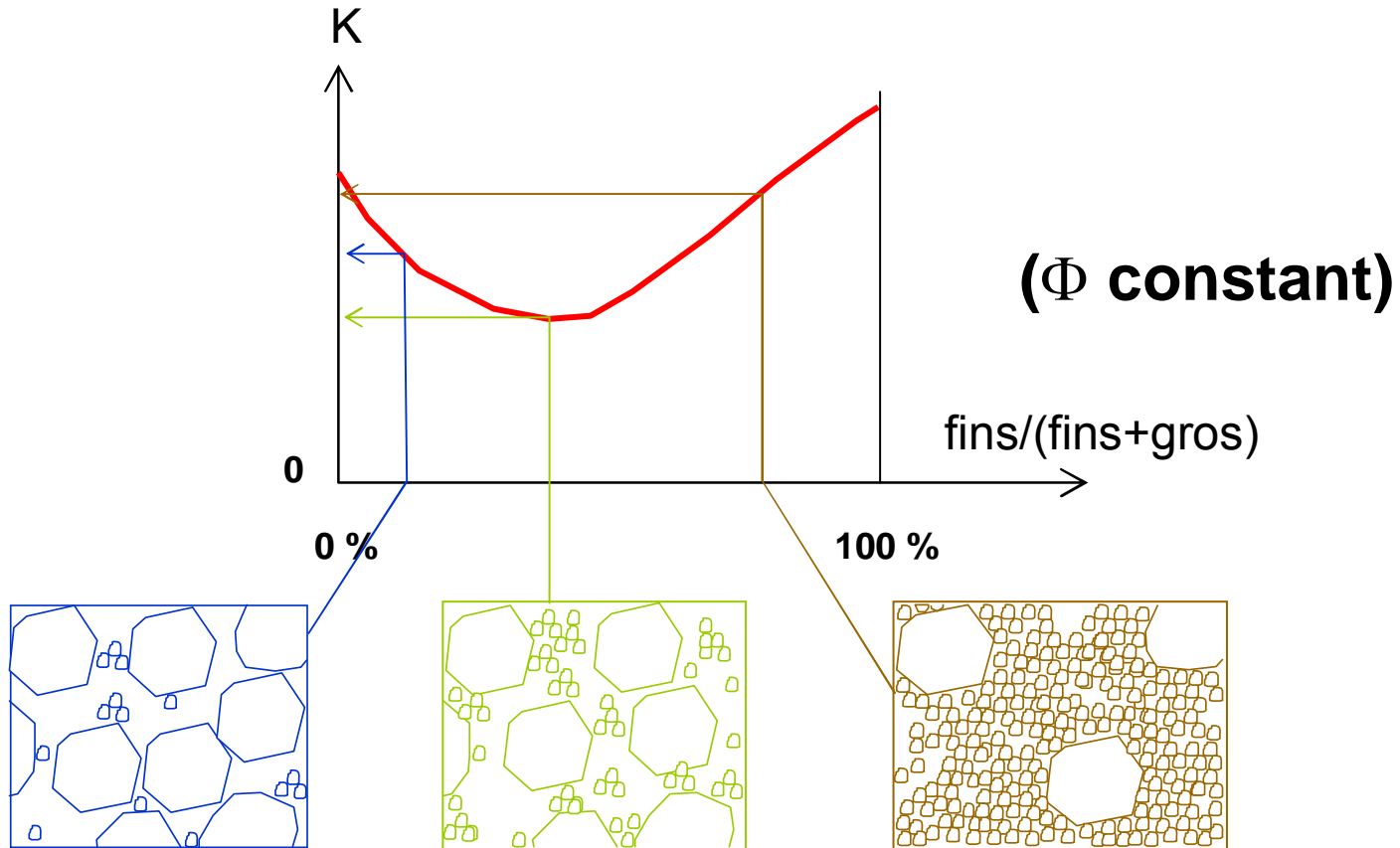
# MÉLANGES BINAIRES



# compacité $\leftrightarrow$ proportions



# indice de serrage $\leftrightarrow$ proportions



# Proportions optimales

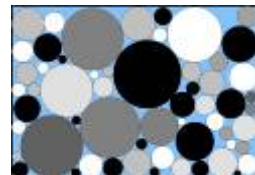
**maximum de compacité**

**à indice de serrage fixé**

*ou*

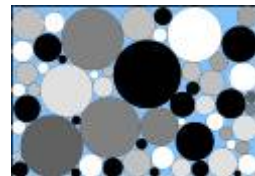
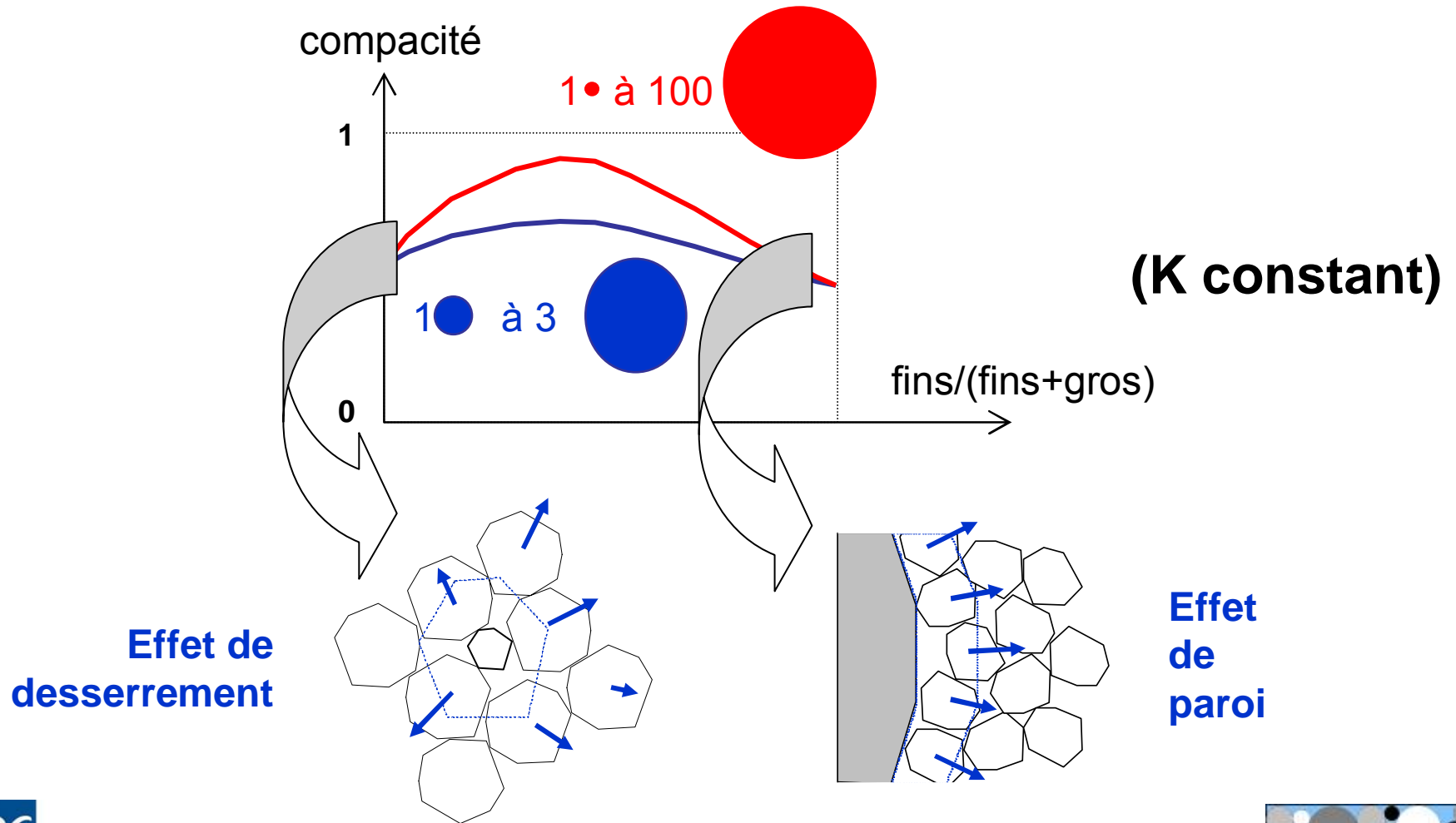
**minimum d'indice de serrage**

**à compacité fixée**



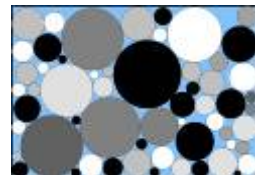


# Effet du rapport des tailles

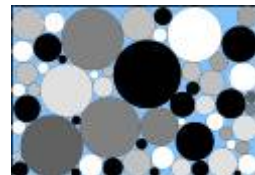


# Conclusions sur les mélanges binaires

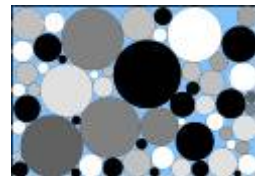
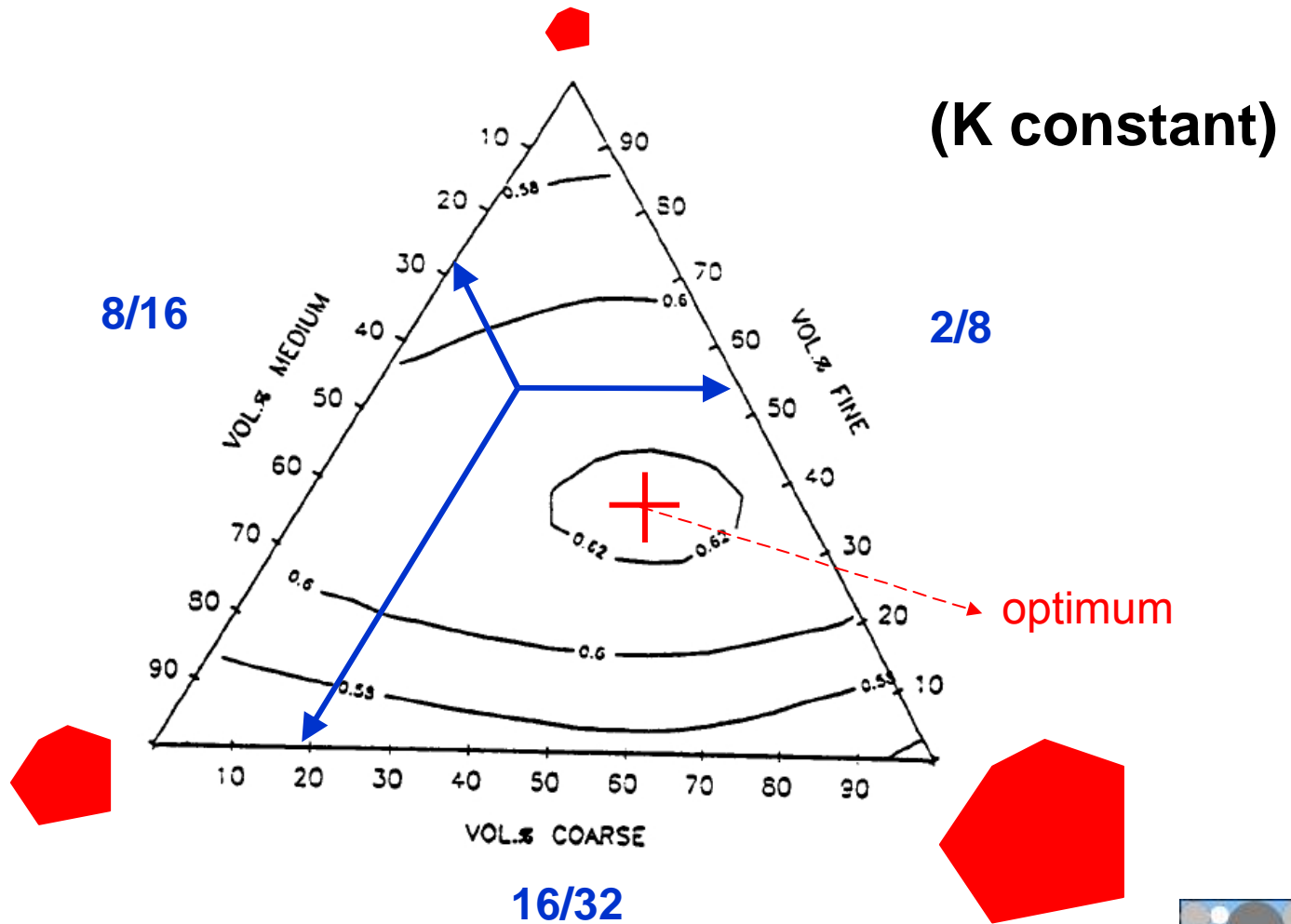
- Il existe toujours une certaine proportion fins/(fins+gros) qui donne la compacité maximale (ou l'indice de serrage minimal)
- Cette compacité maximale est d'autant plus forte que les grains ont une bonne forme, et que leurs tailles sont différentes



# MÉLANGES TERNAIRES

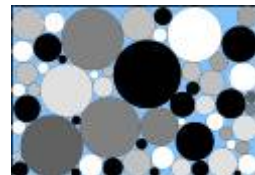


# Compacité d'un mélange ternaire

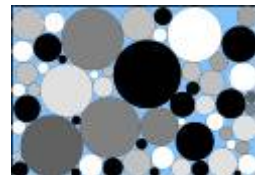


# Compacité d'un mélange ternaire (suite)

- 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

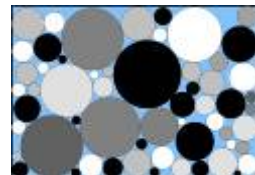


# GRANULARITÉ CONTINUE



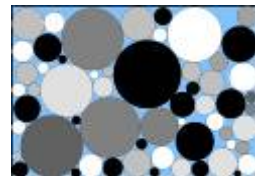
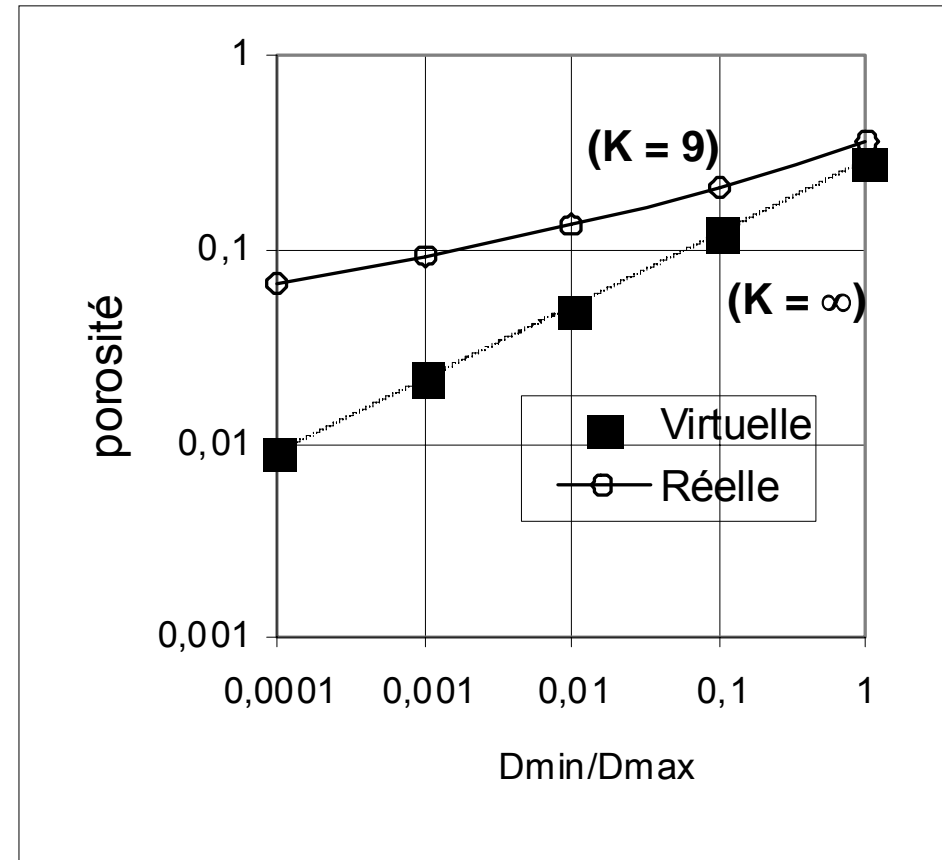
# Facteurs influant la compacité

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



# Compacité maximale

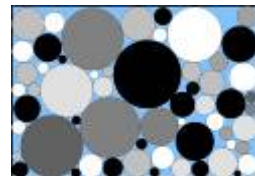
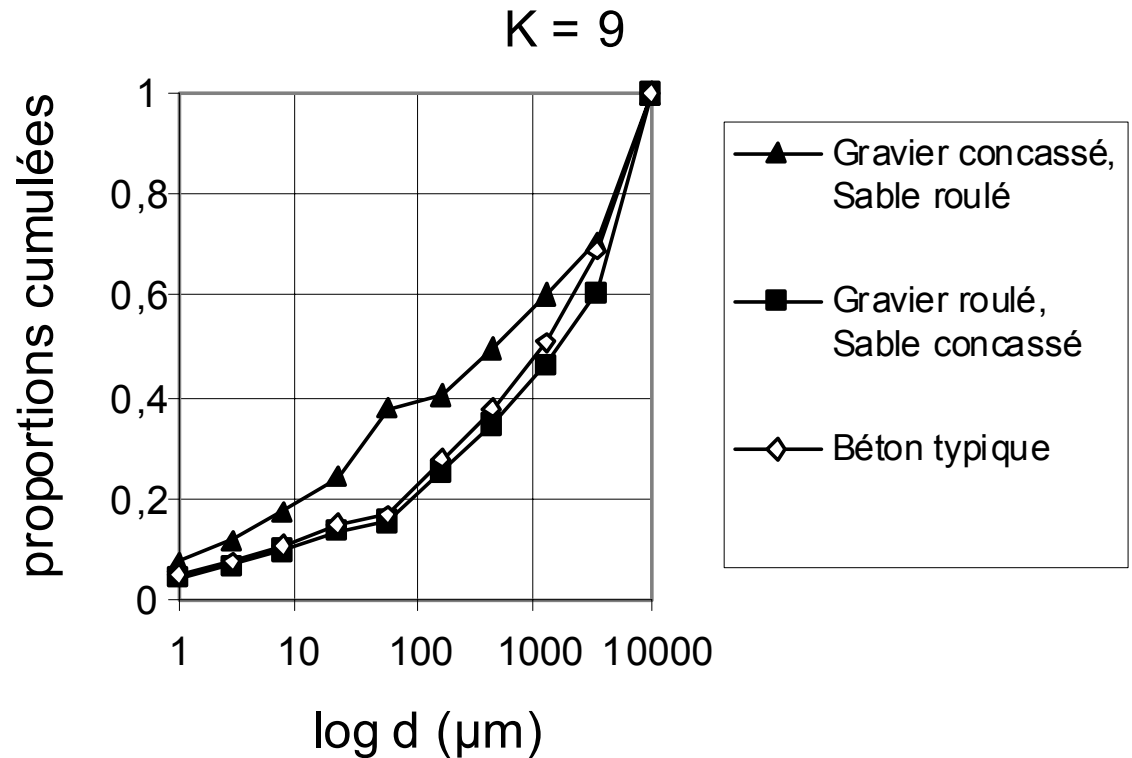
- Quand l'étendue granulaire augmente, la porosité virtuelle (pour  $K$  infini) tend vers 0, mais pas la porosité réelle
- Augmenter  $D$  ou diminuer  $d$  augmente donc la compacité, jusqu'à un certain niveau où l'effet devient négligeable





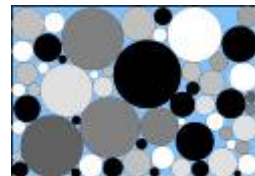
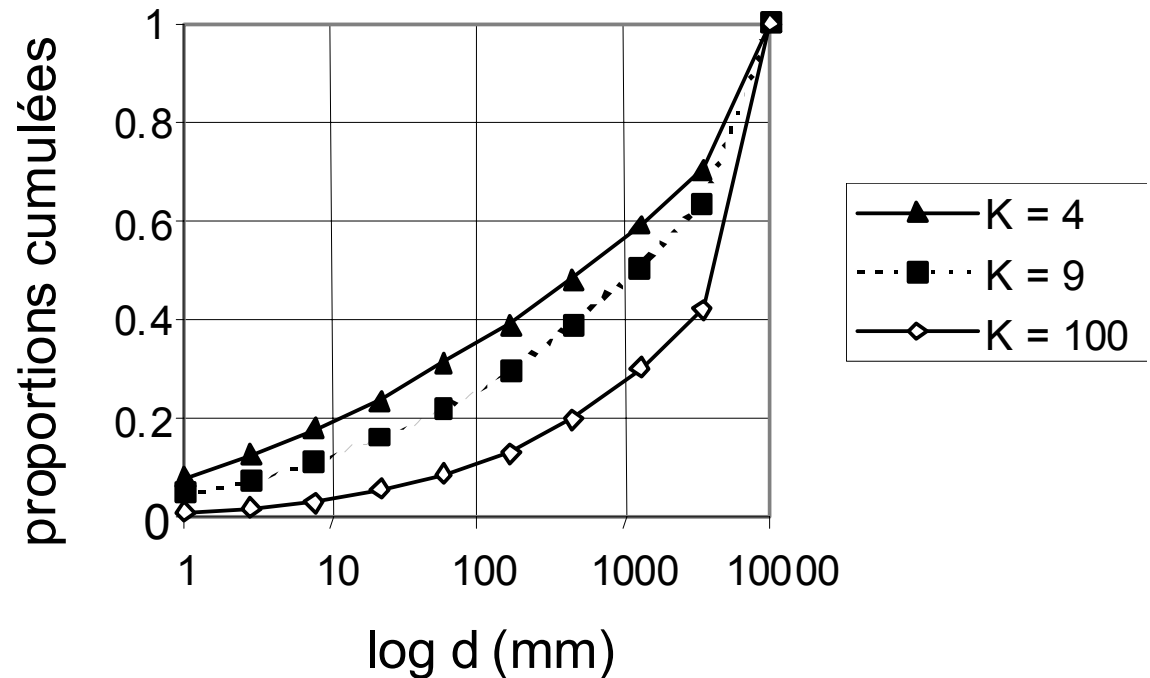
# Granularité optimale

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

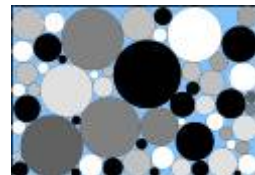


# Granularité optimale (suite)

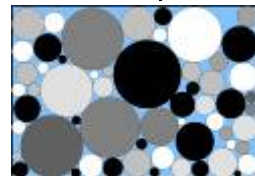
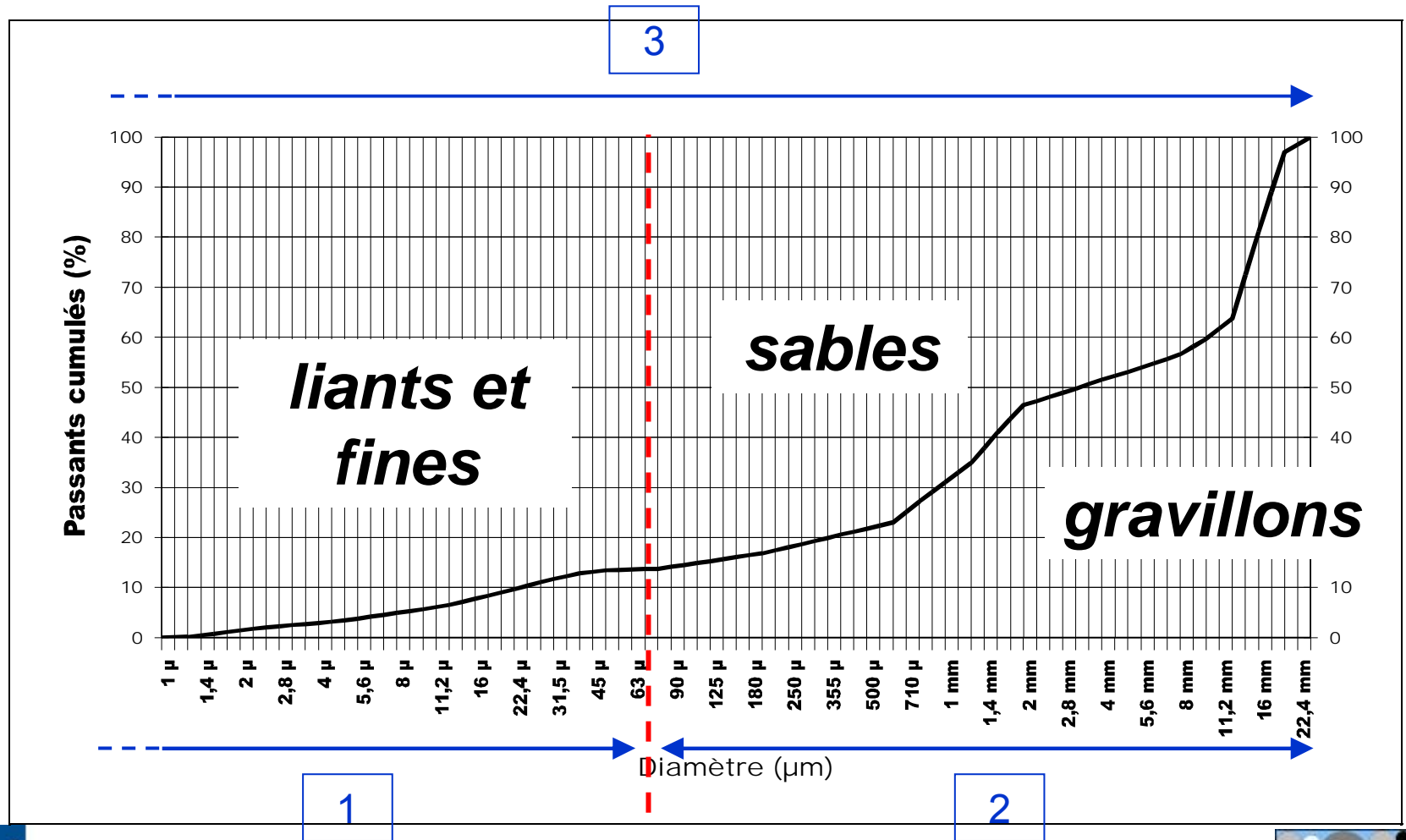
Pour un jeu de constituants donné, la granularité donnant la compacité optimale dépend de K



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

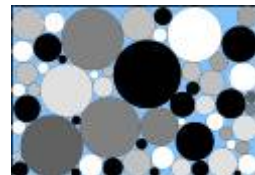


# Trois systèmes granulaires



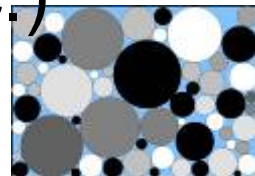
# Trois systèmes granulaires (suite)

- 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)



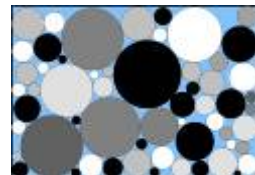
# 1 : la matrice

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



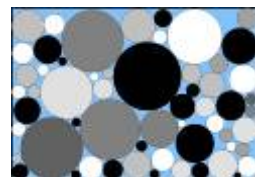
# 2: le squelette

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



# 3: le béton dans son ensemble

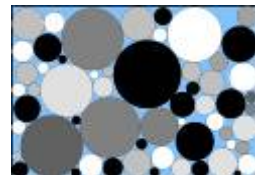
- Sa porosité correspond au volume eau+air
- La compacité du béton est liée à sa masse volumique (quand  $\Phi_{\text{béton}} \uparrow$ ,  $\rho_{\text{béton}} \uparrow$ )
- L'indice de serrage du béton traduit la facilité de mise en place, pour les bétons nécessitant une action de vibration/compactage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





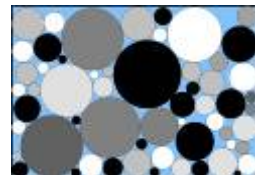
# Quelques fausses idées à évacuer

- « 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).



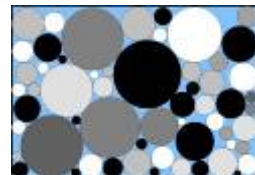
# Quelques fausses idées à évacuer (suite)

- « 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...



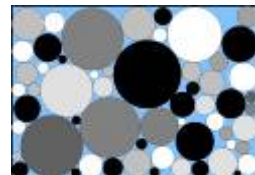
# Quelques fausses idées à évacuer (suite)

- 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 !



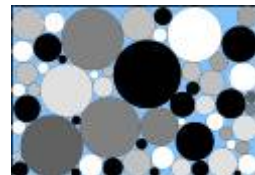
# Quelques fausses idées à évacuer (suite)

- « 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.



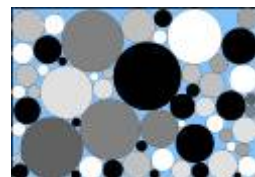
# Conclusion

- 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:  $K \leq 6$ , béton compacté:  $K \approx 14$ ); cf. leçon N°9
- Le fait d'utiliser des plastifiants/superplastifiants permet d'atteindre des valeurs de  $K$  plus élevées (rôle lubrifiant de l'adjuvant)

