

BétonlabPro 3

Leçon N°8

Contribution d'une addition minérale aux résistances mécaniques

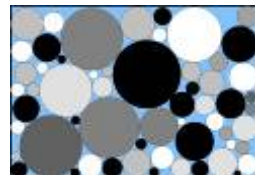
François de Larrard

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Centre de Nantes

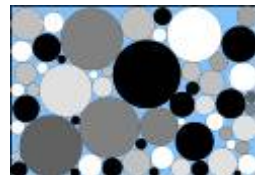
Plan de la leçon

- Intérêt des additions minérales dans les bétons modernes
- Coefficient « K »: intérêt et limites
- Effet des additions minérales et coefficients BétonlabPro correspondants
 - fillers calcaires
 - additions pouzzolaniques
 - laitiers moulus de haut-fourneau
- Conclusion



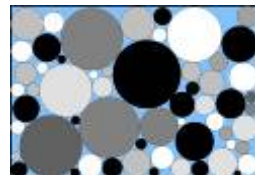
Intérêt des additions minérales dans les bétons modernes

- Dans un béton bien formulé, nécessité d'une quantité suffisante d'éléments fins
 - pour limiter le dosage en eau, et donc la porosité du béton durci
 - pour limiter le ressuage et ses inconvénients
- Si on n'utilise que du ciment Portland pur pour combler les vides du squelette, on est conduit à des bétons assez résistants mécaniquement (par ex.: $R_{c28} \approx 40$ MPa)



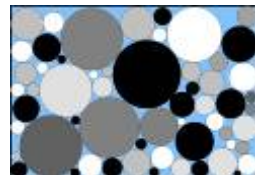
Intérêt des additions minérales dans les bétons modernes (suite)

- Inconvénients d'un fort dosage en ciment:
 - chaleur d'hydratation (selon application)
 - coût économique
 - coût environnemental (consommation d'énergie et dégagement de CO₂)
- Si performances surabondantes, intérêt de remplacer une partie du ciment par une addition minérale, à coûts économiques et environnementaux moindres



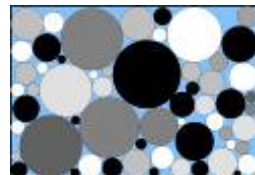
Intérêt des additions minérales dans les bétons modernes (suite)

- Dans certains cas, l'addition peut aussi accroître la durabilité du béton
- Principaux types:
 - Roche naturelle broyée (fillers calcaires ou siliceux)
 - Laitiers de hauts-fourneaux vitrifiés et moulus
 - Déchets industriels fins à caractère pouzzolanique (cendres volantes, fumées de silice) etc.



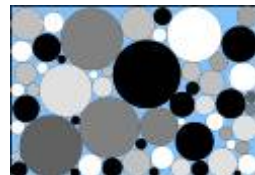
Intérêt des additions minérales dans les bétons modernes (suite)

- Ajouts des additions
 - soit dans le ciment (CEM II, CEM III ...)
 - soit dans le béton
- Dans le second cas, on recommande d'utiliser des produits normalisés
- Comment les caractériser mécaniquement et intégrer leur caractéristiques dans BétonlabPro ?



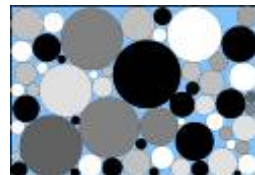
Coefficient « K »: force et limites

- Selon certaines normes (EN 206), additions caractérisées à l'aide d'un coefficient d'équivalence K
- Alors: masse d'addition $a \approx$ masse $K.a$ de ciment
- Liant équivalent: $c + Ka$
- Calcul effectué pour garantir la durabilité du béton (dosage en liant minimum, rapport eau/liant maximum)



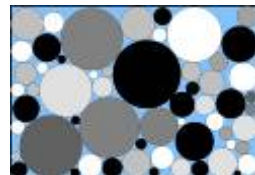
Coefficient « K »: force et limites (suite)

- Mais si on cherche à calculer K à partir d'essais
 - K dépend de la proportion d'addition (quand $a \uparrow$, $K \downarrow$)
 - K dépend de l'âge (ex. des cendres volantes)
 - K dépend parfois du ciment (fillers calcaires)
 - K dépend de la propriété du béton considérée (exemple: pour le gel-dégel, on peut avoir K négatif)
- BétonlabPro utilise des modèles différents pour chaque catégorie d'addition



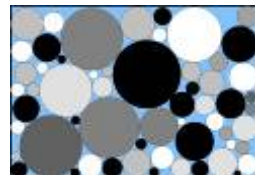
Les fillers calcaires

- Produits industriels et réguliers
- Deux rôles en termes de résistance mécanique
 - effet accélérateur: les hydrates du ciment précipitent sur les grains de filler (sites de nucléation)
 - léger effet liant: phase aluminates du ciment + filler calcaire => carbo-aluminates



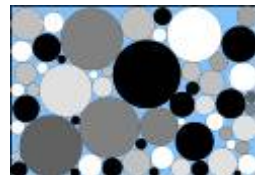
Les fillers calcaires (suite)

- Pour un filler donné, meilleure efficacité liante avec un ciment riche en C_3A
- Pour un ciment donné, rôle accélérateur plus important avec un filler fin
- Mais la demande en eau du béton croît aussi avec la finesse
- **BétonlabPro prend en compte l'effet du filler sans coefficient spécial à entrer**

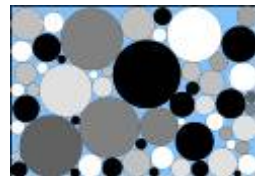
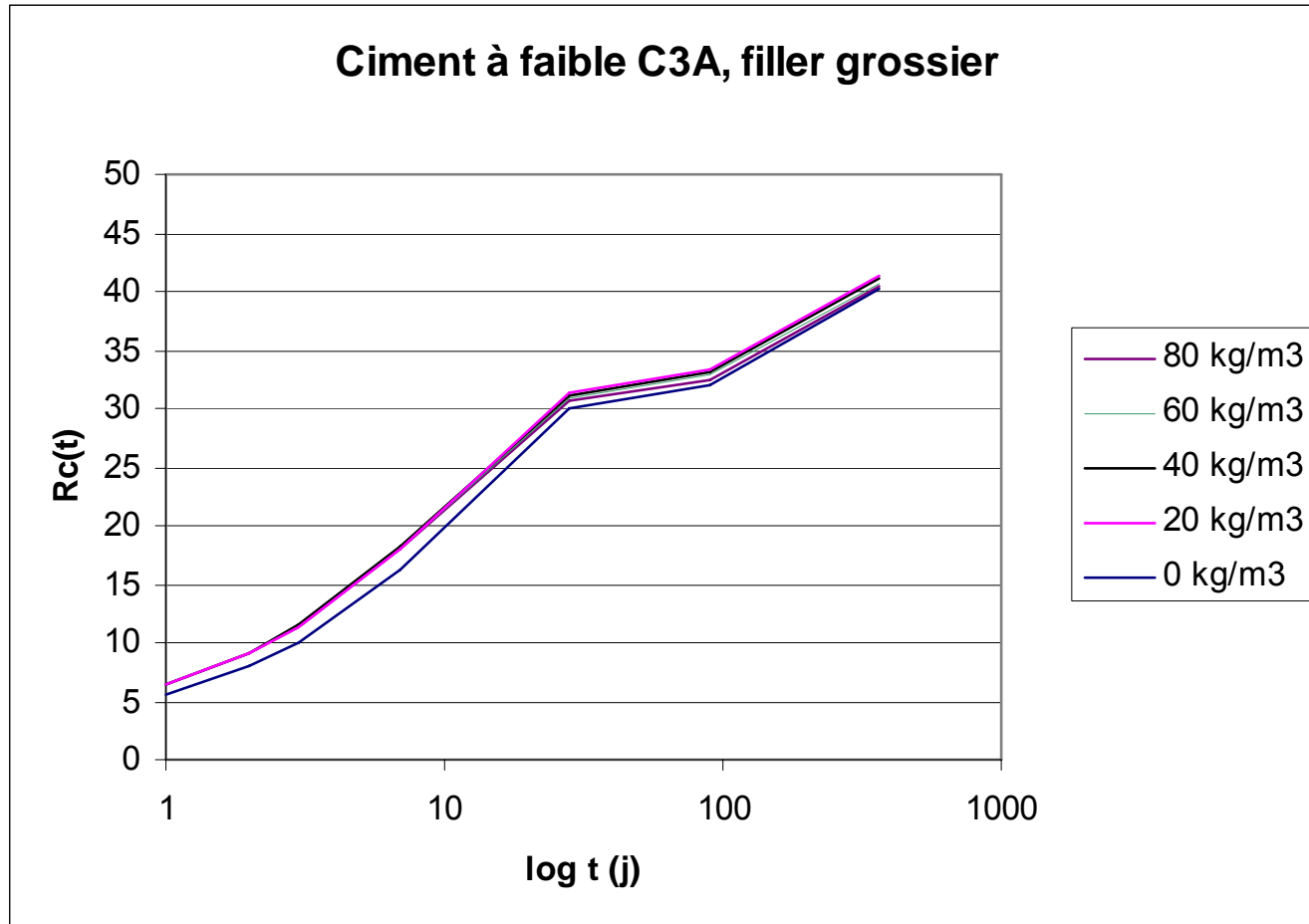


Les fillers calcaires (suite)

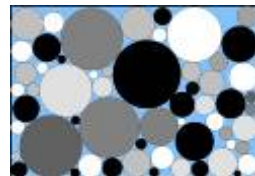
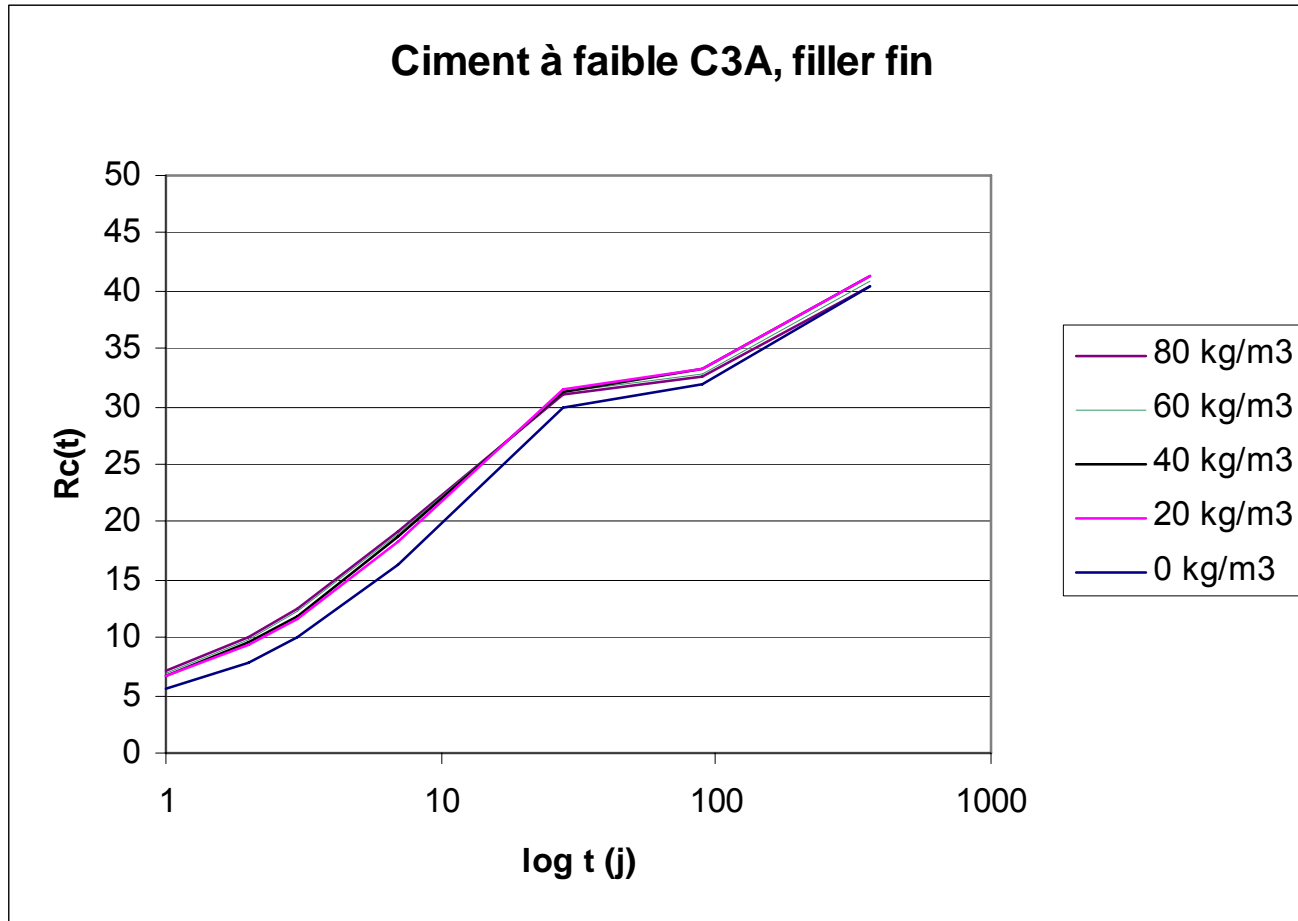
- Quelques simulations:
 - béton dosé à 280 kg/m³ de CEM I
 - deux ciments (teneurs en C₃A de 2 et 9 %)
 - deux fillers (d₅₀ de 4 μm et 20 μm)
 - dosage en filler croissant de 0 à 80 kg/m³
 - dosage en eau efficace constant de 190 l/m³
 - effet sur le développement des résistances ?



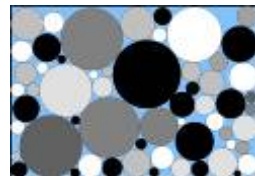
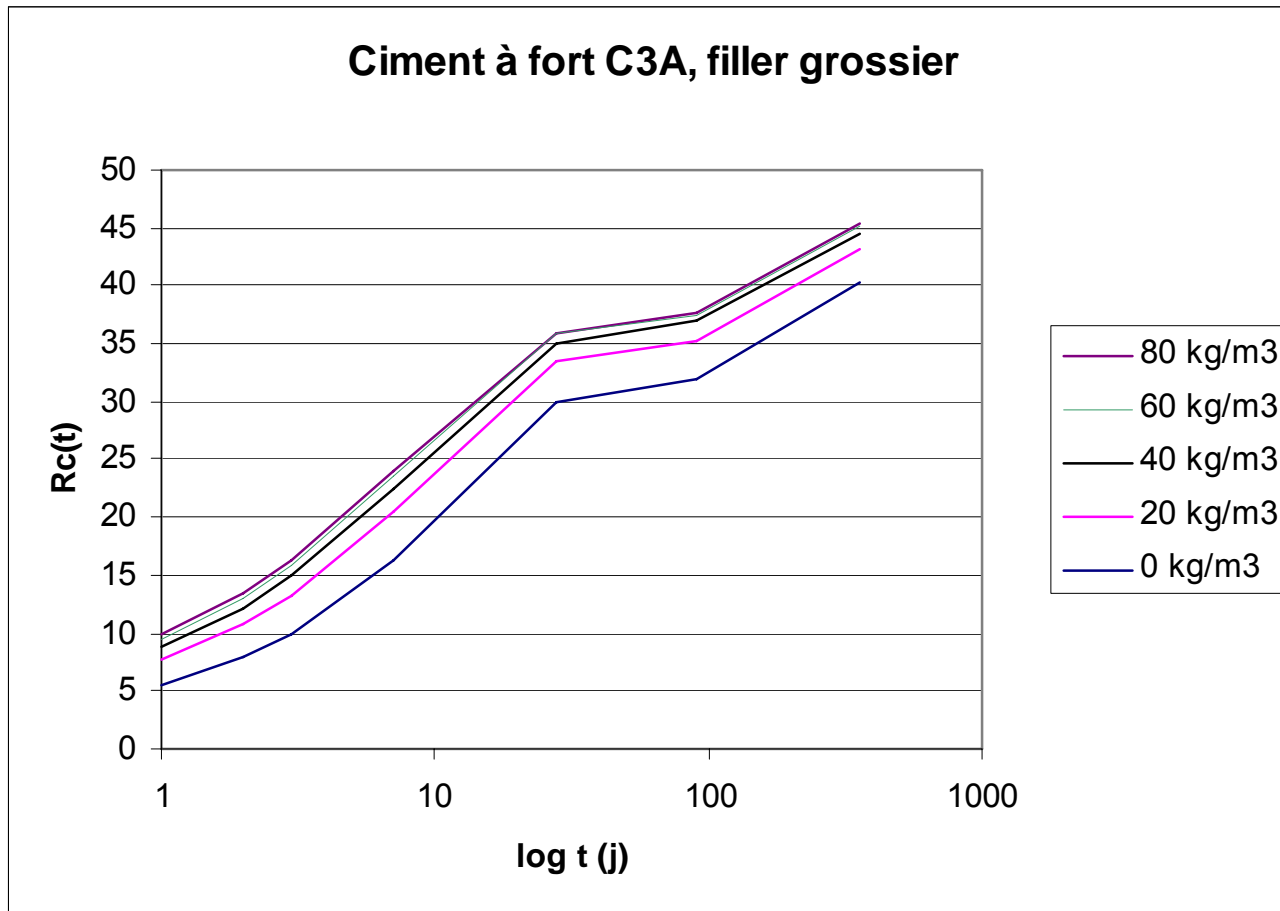
Les fillers calcaires (suite)



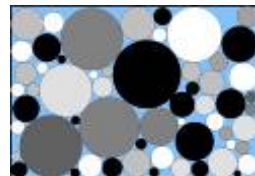
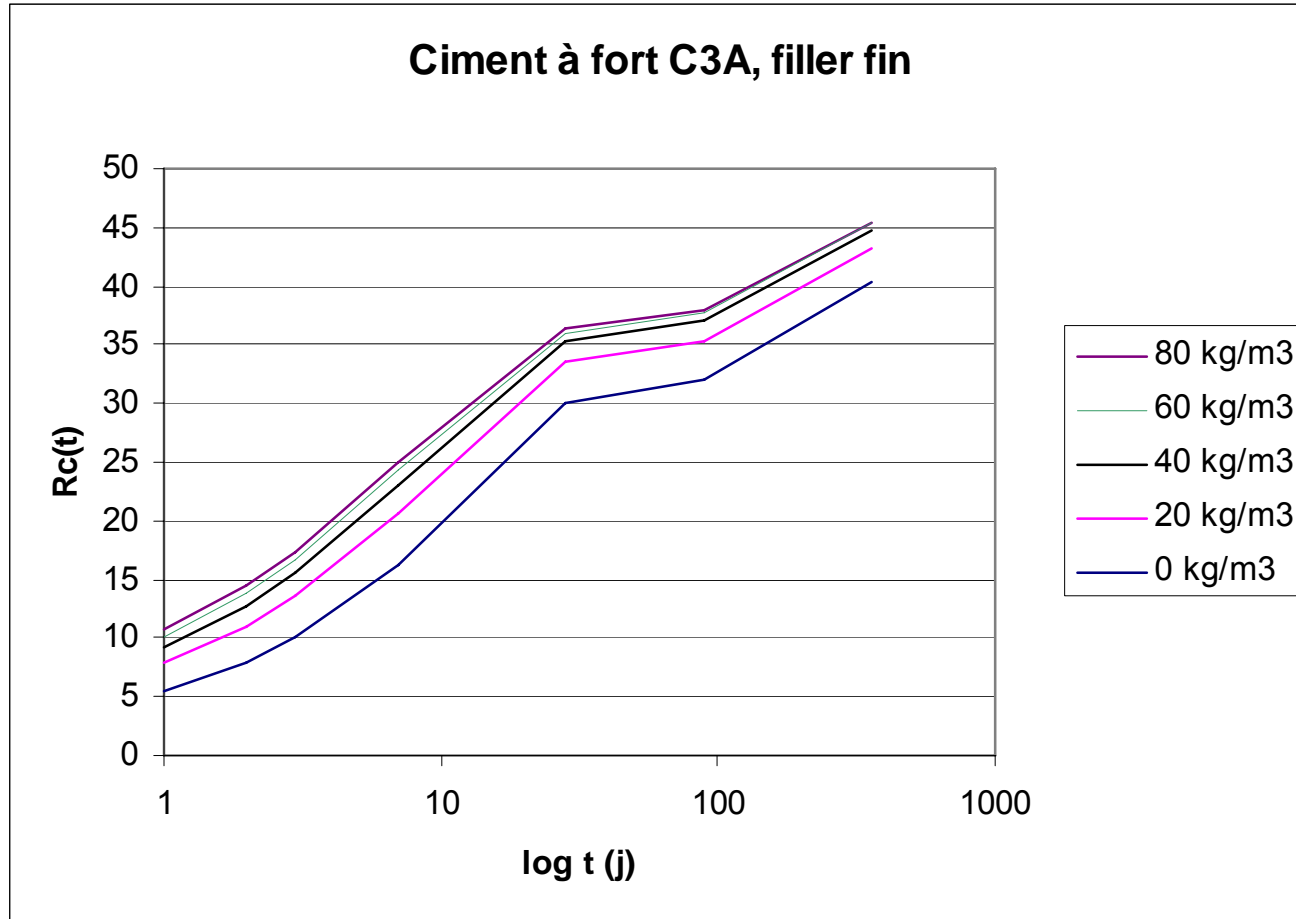
Les fillers calcaires (suite)



Les fillers calcaires (suite)

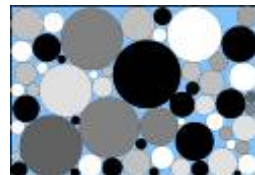


Les fillers calcaires (suite)



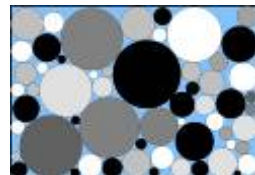
Les additions pouzzolaniques

- Produits contenant de la silice amorphe, soluble en milieu alcalin
- Exemples: cendres volantes silico-alumineuses, fumées de silice, métakaolins, cendres de paille de riz, fillers siliceux...
- Ne font pas prise seules, mais renforcent l'efficacité liante du ciment
- Plus efficaces à long terme qu'à court terme

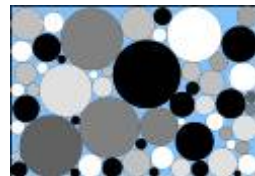
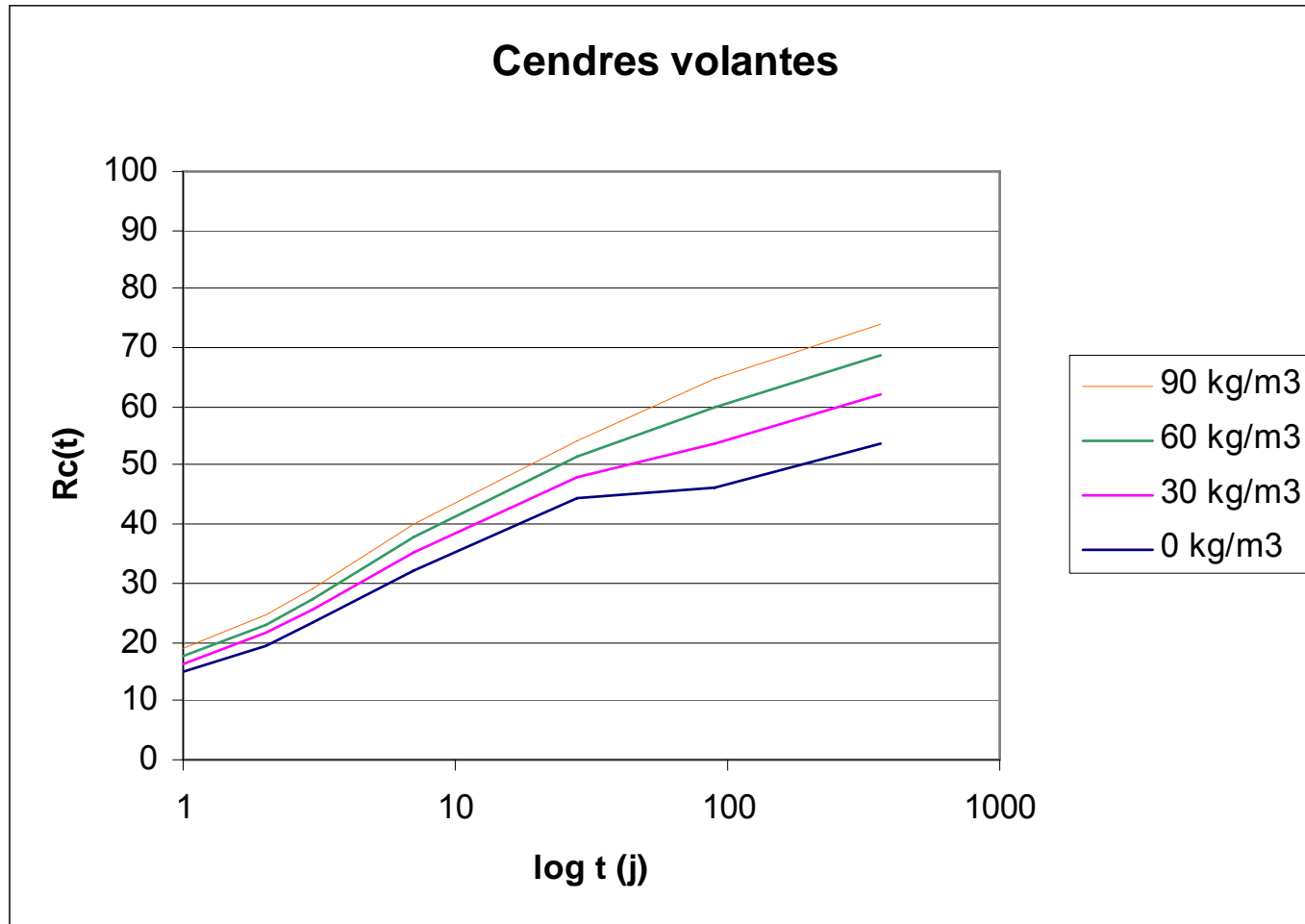


Les additions pouzzolaniques (suite)

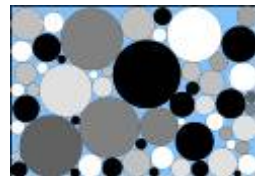
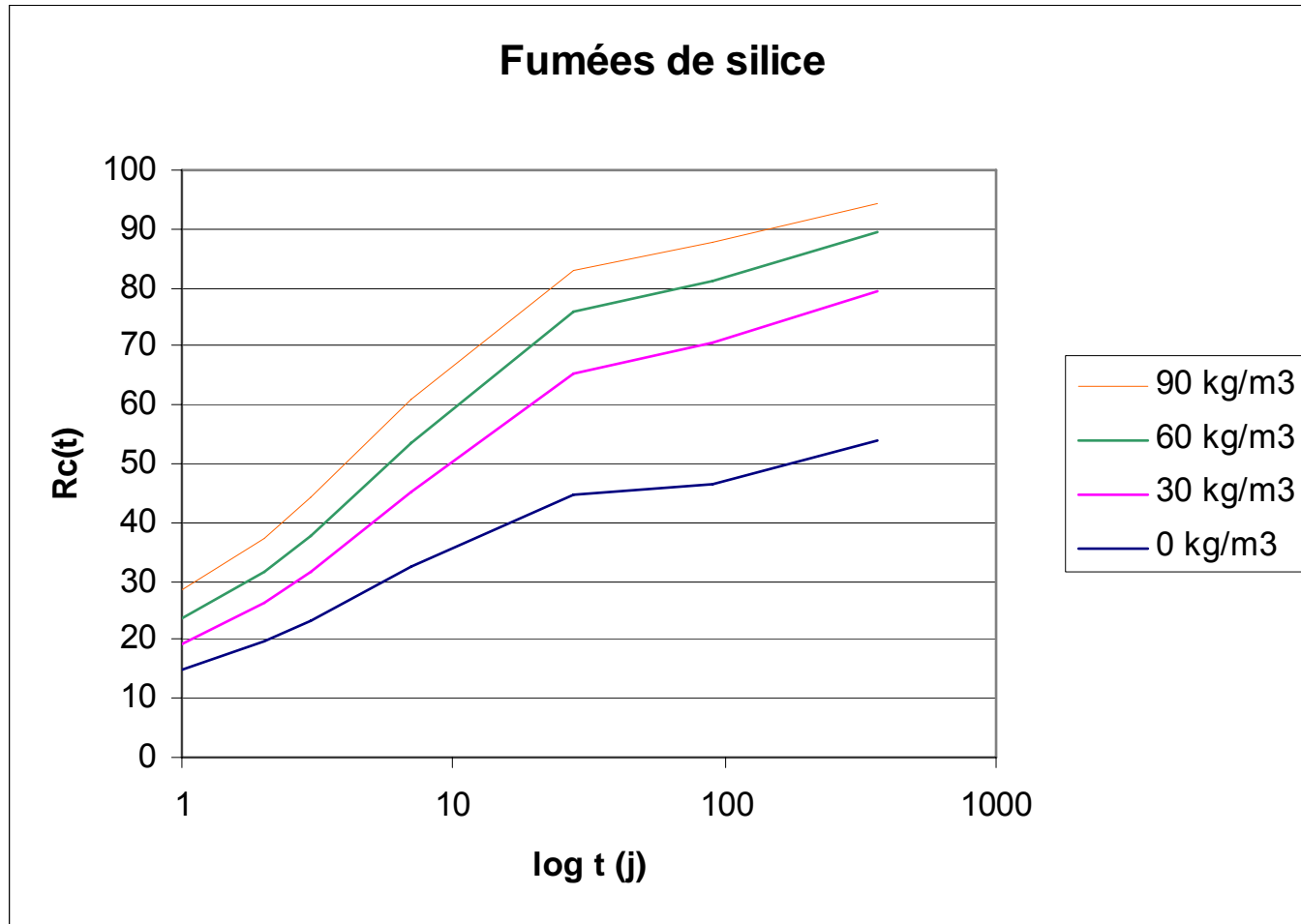
- Quelques simulations:
 - béton dosé à 300 kg/m³ de CEM I
 - dosage en eau (160 l/m³) et en superplastifiant constants
 - dosages croissants en cendre volante puis en fumée de silice
 - effet sur le développement des résistances ?



Les additions pouzzolaniques (suite)

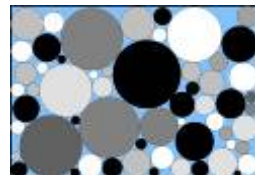


Les additions pouzzolaniques (suite)

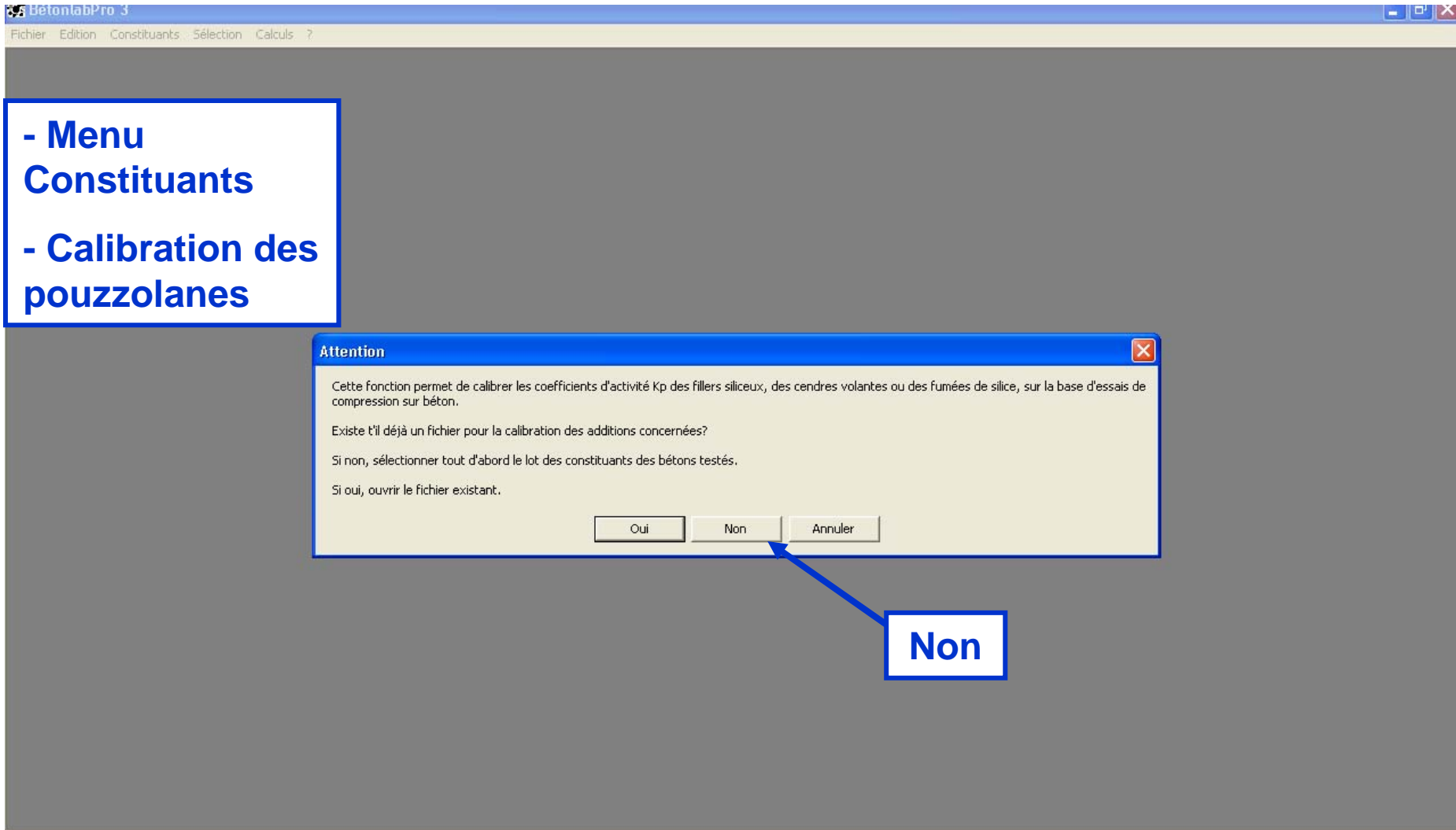


Les additions pouzzolaniques (suite)

- Pour BétonlabPro, addition pouzzolanique caractérisée par des coefficients $K_p(t)$
- Attention: K_p n'a rien à voir avec le coefficient K des normes !
- Outil permettant la calibration de $K_p(t)$ à partir de résultats d'essais de compression sur des bétons dont tous les autres constituants sont connus (comme pour p et q – cf. leçon N°4)
- Exemple: calibration des K_p d'une cendre volante



Les additions pouzzolaniques (suite)



The screenshot shows the main window of the 'BetonlabPro 3' software. The menu bar includes 'Fichier', 'Edition', 'Constituants', 'Sélection', and 'Calculs'. A white box on the left lists the current menu items: '- Menu Constituants' and '- Calibration des pouzzolanes'. A dialog box titled 'Attention' is open, containing the following text:

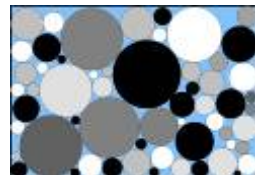
Cette fonction permet de calibrer les coefficients d'activité K_p des fillers siliceux, des cendres volantes ou des fumées de silice, sur la base d'essais de compression sur béton.

Existe-t-il déjà un fichier pour la calibration des additions concernées?

Si non, sélectionner tout d'abord le lot des constituants des bétons testés.

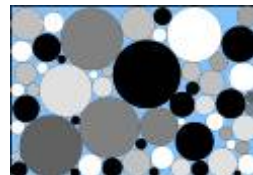
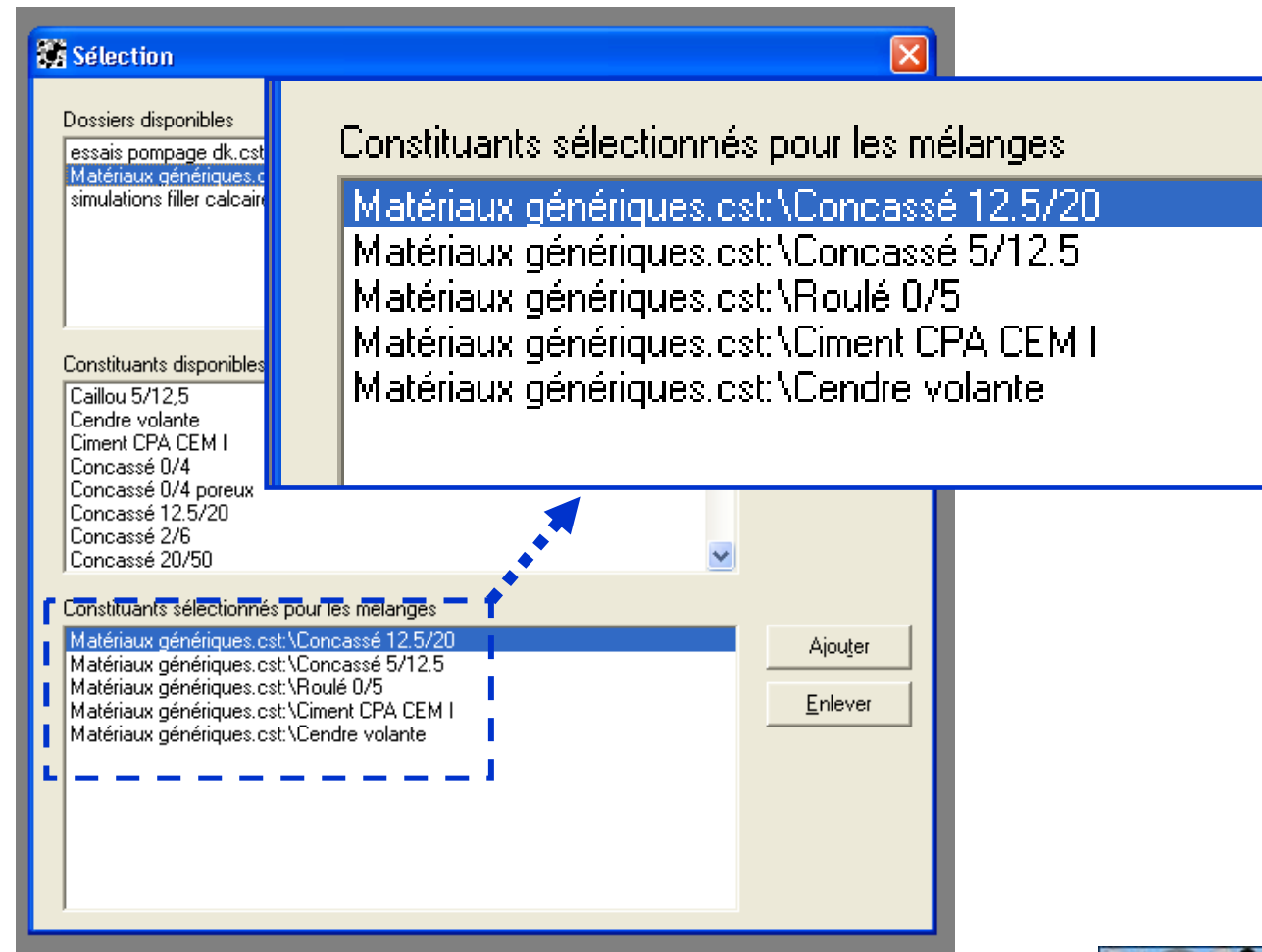
Si oui, ouvrir le fichier existant.

At the bottom of the dialog are three buttons: 'Oui', 'Non', and 'Annuler'. A blue arrow points from a white box labeled 'Non' to the 'Non' button.

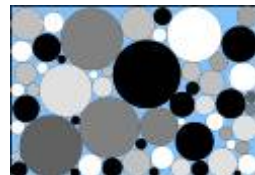
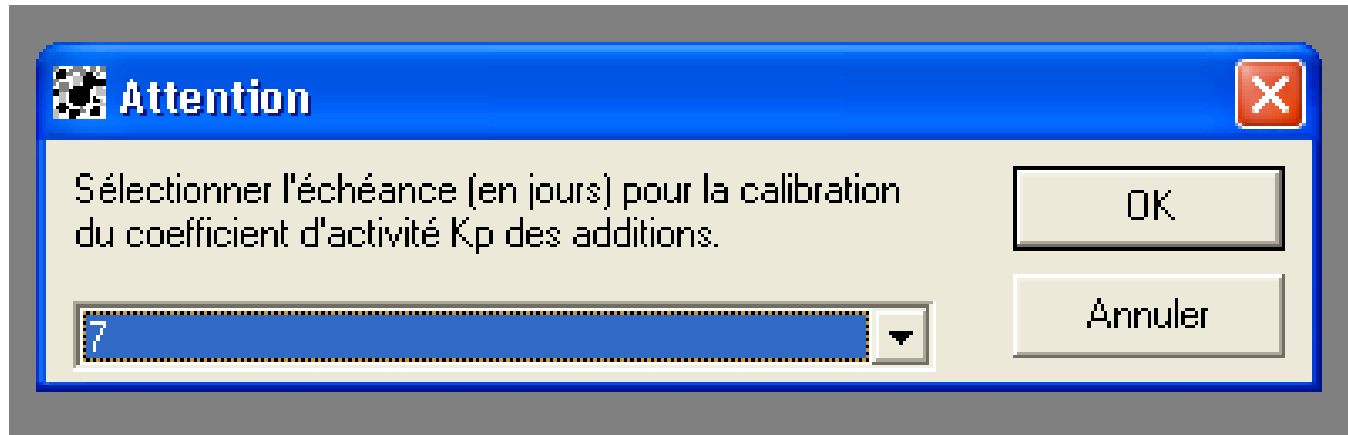


Les additions pouzzolaniques (suite)

- Sélectionner les constituants (dossier « Matériaux génériques »)
- Cliquer sur « OK »



Les additions pouzzolaniques (suite)



Les additions pouzzolaniques (suite)

Constituants

G1	Matériaux génériques.cst\Concassé 12.5/20
G2	Matériaux génériques.cst\Concassé 5/12.5
S1	Matériaux génériques.cst\Roulé 0/5
C1	Matériaux génériques.cst\Ciment CPA CEM I

Calibrer
Annuler

Composition

G1 (kg)	800
G2 (kg)	177
C1 (kg)	788
C1 (kg)	300
CV1 (kg)	100
Eau (kg)	184

Entrer
Modifier n°
Aucune gâchée
Supprimer
Exporter

Agent entraîneur d'air?
 Non
 Oui

Résistance
fc7 (MPa) 27

Beton n°	1	2	3
G1 (kg)	857	829	800
G2 (kg)	189	183	177
S1 (kg)	843	816	788
C1 (kg)	300	300	300
CV1 (kg)	0	50	100
Eau (kg)	184	184	184
Air total (%)			
AEA	Non	Non	Non
fc7 (MPa)	21	25	27

Pour chaque béton:

- Introduire les compositions

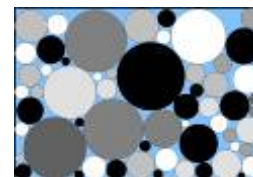
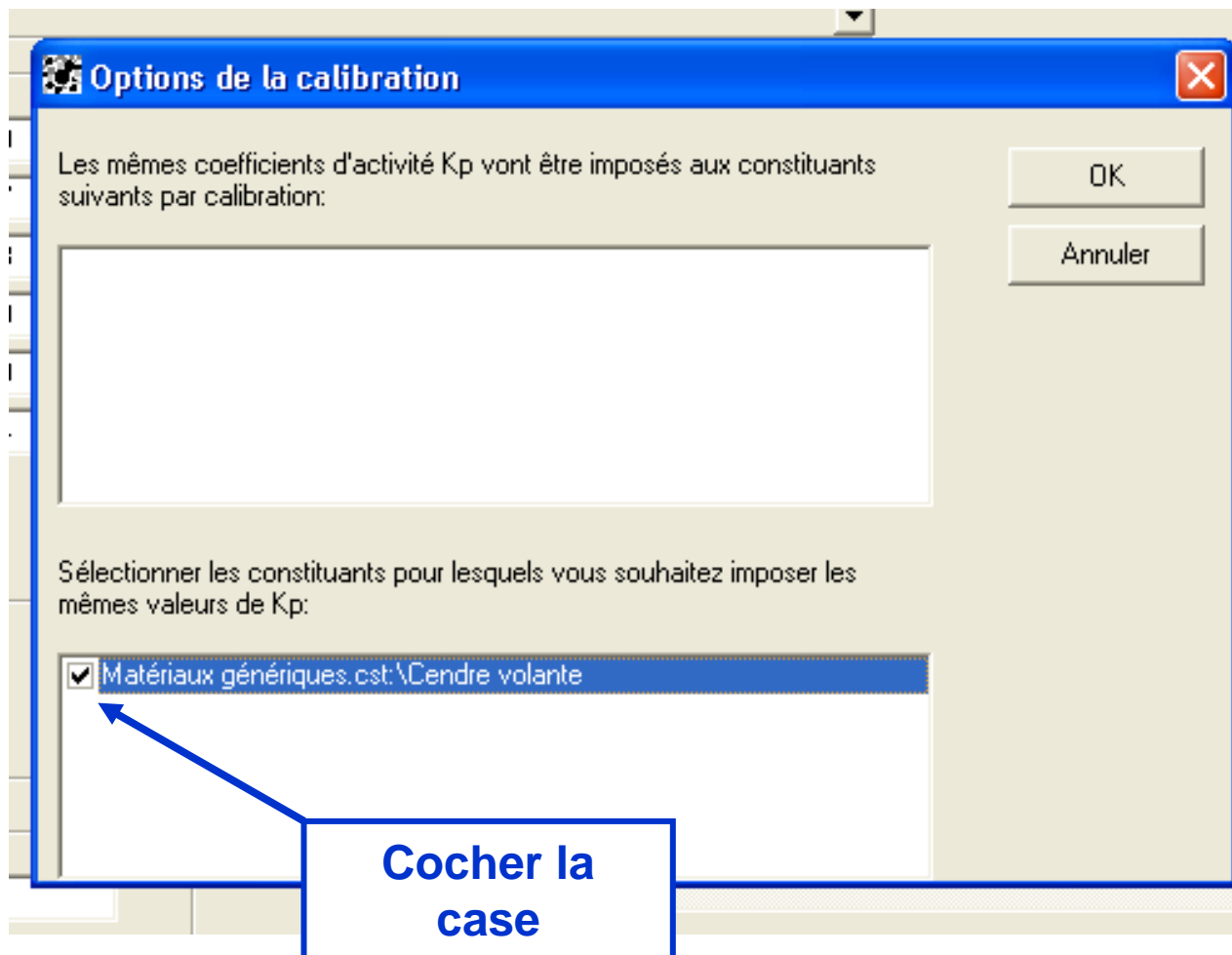
- Introduire les valeurs de Rc

- Cliquer sur « Entrer »

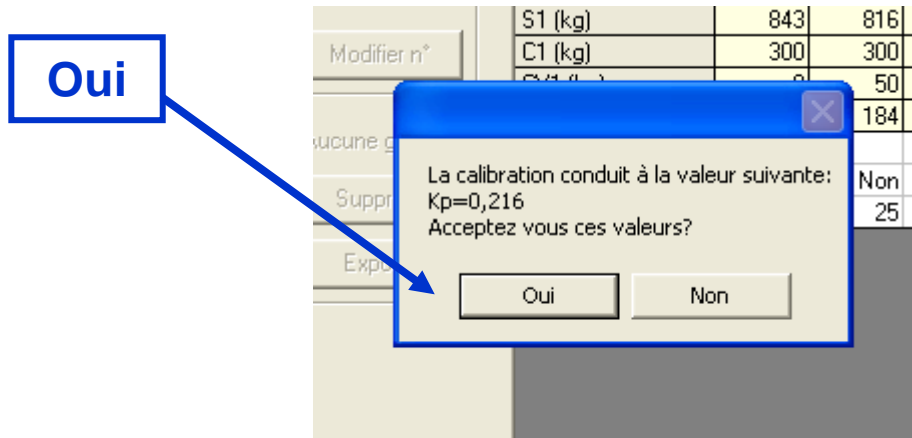
- Cliquer sur « Calibrer »



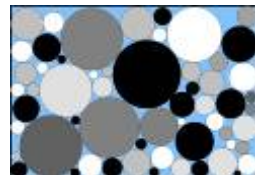
Les additions pouzzolaniques (suite)



Les additions pouzzolaniques (suite)

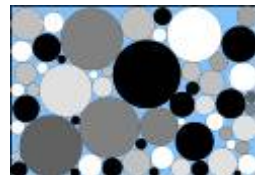


- $K_p(7) = 0,216$ est à présent intégré dans le fichier de la cendre volante
- L'exercice doit être répété pour les autres âges



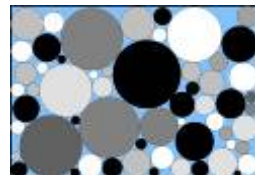
Les laitiers moulus de haut-fourneau

- Un excellent produit, malheureusement rare sur le marché français
- Véritable liant, mais nécessite un activant
- Dans les bétons de structure, le ciment Portland joue ce rôle
- D'un point de vue mécanique, le laitier se comporte comme un mélange de ciment et de pouzzolane

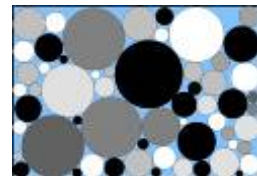
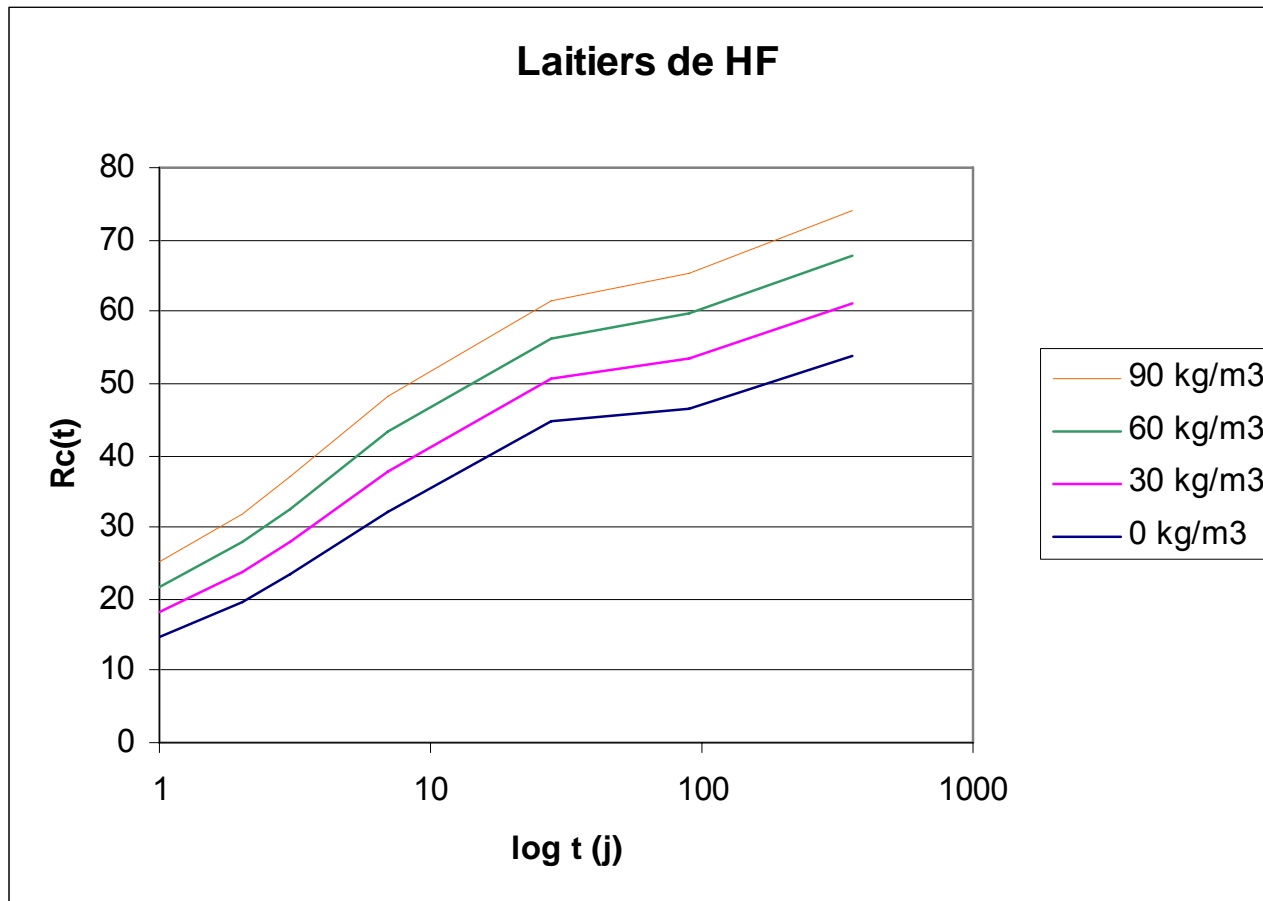


Les laitiers moulus de haut-fourneau (suite)

- Quelques simulations:
 - béton dosé à 300 kg/m³ de CEM I
 - dosage en eau (160 l/m³) et en superplastifiant constants
 - dosages croissants en laitier de HF
 - effet sur le développement des résistances ?

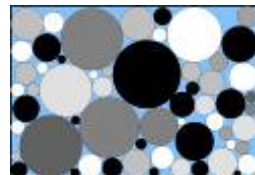


Les laitiers moulus de haut-fourneau (suite)



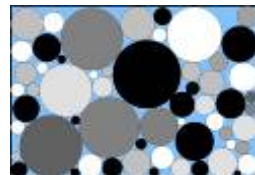
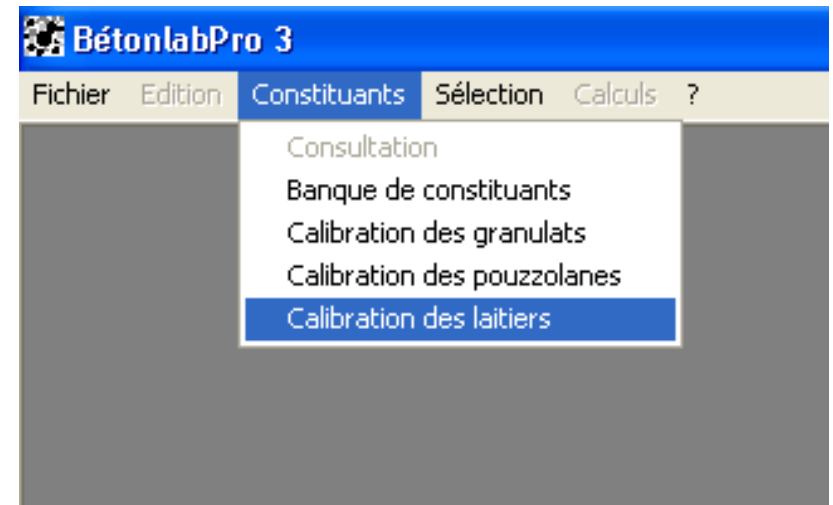
Les laitiers moulus de haut-fourneau (suite)

- Pour BétonlabPro, les laitiers sont caractérisés par deux coefficients:
 - K_ℓ coefficient d'équivalence cimentaire
 - A coefficient pouzzolanique
 - effet d'une masse ℓ de laitier à l'âge t = effet d'une masse $K_\ell \ell$ de ciment + effet d'une masse $A \log(t) \ell$ de pouzzolane



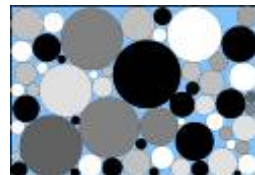
Les laitiers moulus de haut-fourneau (suite)

- K_f et A calibrés sur des essais de béton
- La procédure est similaire à celles qui permet de déterminer p et q (pour les granulats) ou K_p (pour les additions pouzzolaniques)



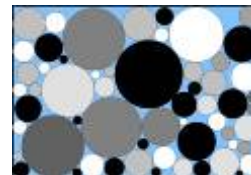
Conclusion

- BétonlabPro permet d'optimiser les bétons en utilisant la panoplie complète des additions minérales
- Accepte également tous les ciments composés contenant les mêmes additions
- La caractérisation des fillers calcaires repose uniquement sur les caractéristiques granulaires



Conclusion (suite)

- Additions pouzzolaniques: coefficient K_p par âge (à partir de 7 jours)
- Laitiers de HF: coefficients K_f et A
- Coefficients valables en principe quel que soit le ciment utilisé avec l'addition
- Il est sage de garder en mémoire l'origine du ciment avec lequel la calibration a été faite (champs « Commentaires) du fichier de l'addition



Conclusion (suite)

- Certaines additions nécessitent d'être bien défloculées pour exprimer pleinement leur rôle mécanique (cas des fumées de silice)
- Certaines additions sont des sous-produits, et peuvent parfois manquer de régularité. Pour ces produits, nécessité de contrôles réguliers et de recalage périodique des coefficients

