

# Journée d'étude "Impression 3D avec du béton"

28 mars 2023 - Limelette

## Formulation et caractérisation de mortiers imprimables en 3D à impact environnemental réduit

Sébastien Rémond – Université d'Orléans

Raghd Al-Thib, Naima Belayachi – Université d'Orléans

David Bulteel - IMT Nord Europe

Estelle Hynek, Antoine Urquizar - Constructions 3D

# Mortiers imprimables en 3D : un cahier des charges exigeant



Mortier imprimable: des propriétés spécifiques à l'état frais

- Pompable
- Extrudable
- Constructible

Mais aussi des propriétés d'usage identiques à celles des bétons conventionnels:

- propriétés mécaniques
- durabilité

⇒ La vraie nouveauté vient du comportement à l'état frais

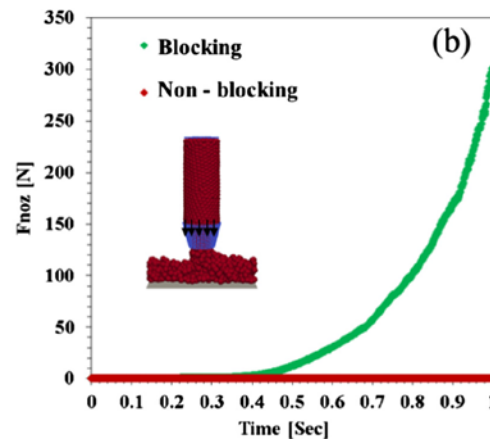
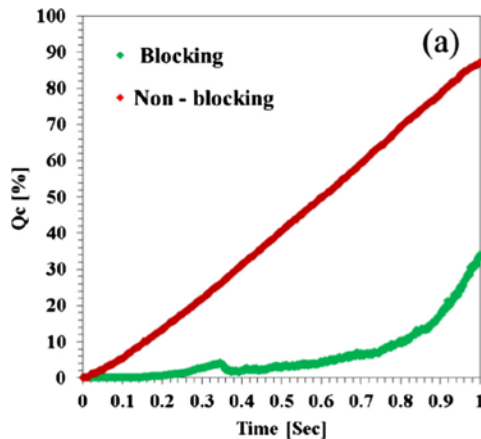
# Mortiers imprimables en 3D : compositions courantes

Exemple de composition

Ciment	Sable	Eau ( $E_{\text{eff}}/C = 0.31$ )	SP
905	1128	281	1,85%

Une granulométrie réduite (très fort dosage en sable)  
Un très fort dosage en liant  
Une adjuvantation spécifique

Pourquoi des dosages  
en liant et en sable  
aussi élevés?



Eviter les blocages ( $D_{\text{max}} \leq 1/5 D_{\text{nozzle}}$ )

⇒ Imprimer un cordon fin avec un  $D_{\text{max}}$  réduit ... et beaucoup de liant et de sable?

⇒ Ou imprimer un cordon large avec un béton classique?

Attention aux comparaisons pour 1  $\text{m}^3$  de béton

# Mortiers imprimables en 3D : réduire l'impact environnemental

Réduire l'impact environnemental des mortiers imprimés ...

- utiliser des ressources recyclées (CIRMAP pour le sable)
- utiliser des liants à plus faible teneur en clinker (thèse E. Hynek – Constructions-3D)



Principe de formulation :

- Hypothèse : on dispose d'un mortier imprimable de référence satisfaisant au cahier des charges
- Objectif : on veut substituer (partiellement ou totalement) des constituants (liant et/ou sable) avec des matériaux de substitution sans changer (ou en changeant le moins possible) les propriétés du matériau,



# Mortiers imprimables en 3D : réduire l'impact environnemental

Viscosité des suspensions concentrées : modèle de Krieger et Dougherty

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$$

$\eta$ : viscosité de la suspension (mortier)

$\eta_0$ : viscosité du fluide interstitiel (pâte)

$\phi$ : fraction volumique de grains en suspensions (volume de sable)

$\phi_m$ : fraction volumique d'empilement maximal (compacité du sable)

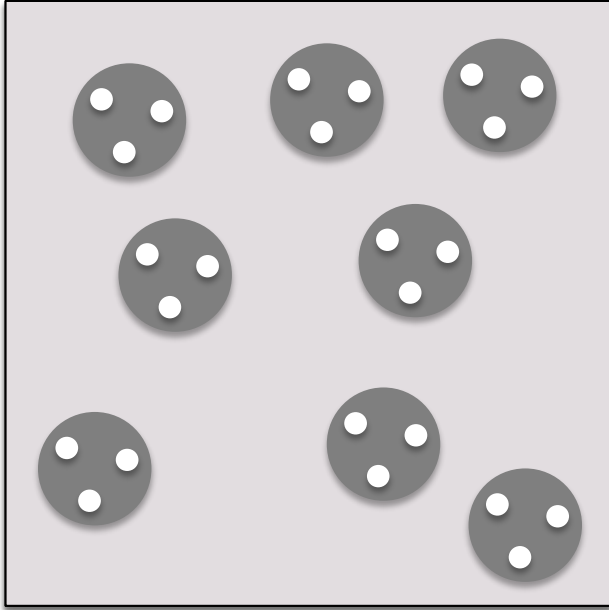
$[\eta]$ : viscosité intrinsèque des grains (morphologie des particules)

⇒ Pour conserver le même comportement rhéologique

- Garder une viscosité de pâte constante ( $E_{\text{eff}}/C$  et adjuvantation)
- Garder la fraction volumique de sable constante (substitution volumique)
- Garder les mêmes caractéristiques du squelette granulaire

# Mortiers imprimables en 3D : substitution du sable naturel par un sable recyclé

(Thèse de R. Al-Thib – encadrement N. Belayachi, S. Rémond - CIRMAP)



Substitution du volume réel de SN par un même volume réel de SR

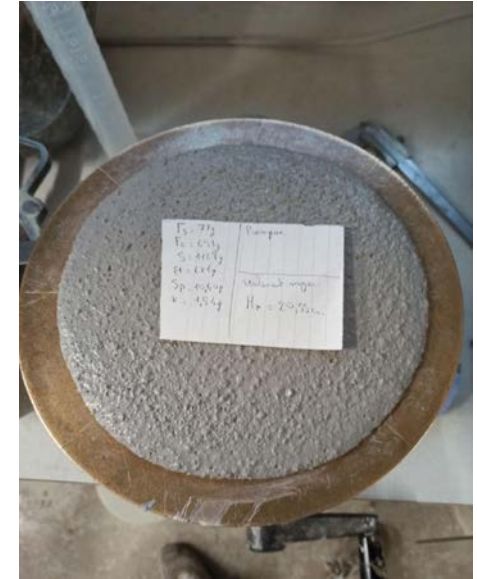
Compensation de l'eau absorbée par les grains

⇒ nécessité de mesurer précisément WA

# Mortiers imprimables en 3D : substitution du SN par du SR

Le coefficient d'absorption d'eau WA étant connu:

- Calcul de la masse volumique réelle puis du volume réel de SR
- Compensation de l'eau absorbée par les granulats ( $E_{\text{eff}} = E_{\text{totale}} - S \times WA$ )
- Légère correction de l'adjuvantation (SP) pour tenir compte des modifications du squelette granulaire et ramener l'étalement du mortier à celui du mortier de référence



# Mortiers imprimables en 3D : substitution du SN par du SR



Mesure de la vitesse de structuration des mortiers:

Mesures successives de  $\tau_0$  toutes les 150s

$$\tau_0 = \frac{F \cos^2 \theta}{\pi h^2 \tan \theta}$$

Relation linéaire (Roussel) : calcul  $A_{thix}$  et estimation constructibilité.

$$\tau_0(t) = A_{thix} \cdot t + \tau_{0,0}$$



# Mortiers imprimables en 3D : substitution du SN par du SR



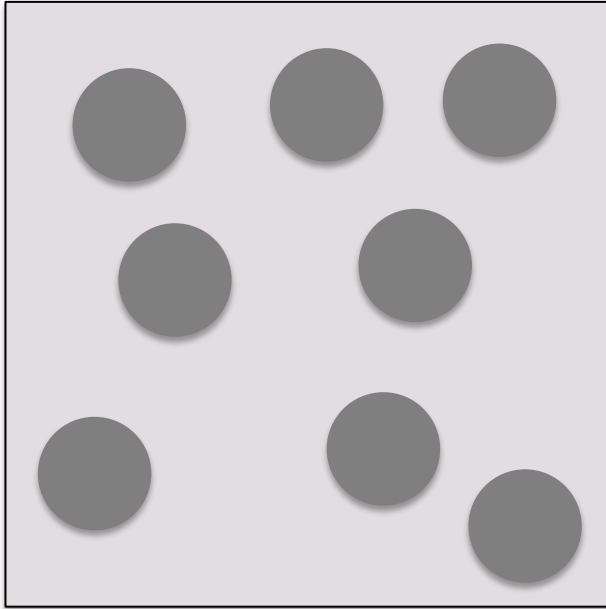
Légère réduction de  $A_{thix}$  due au faible surdosage en SP (dû au choix du SN)

Imprimabilité comparable entre les mortiers de SN et de SR

Légère réduction de résistance due aux propriétés intrinsèques du SR

# Mortiers imprimables en 3D : substitution du ciment par des additions minérales

(Thèse de E. Hynek – encadrement D. Bulteel, S. Rémond – A. Urquizar Constructions 3D)



Conservation du volume de SN

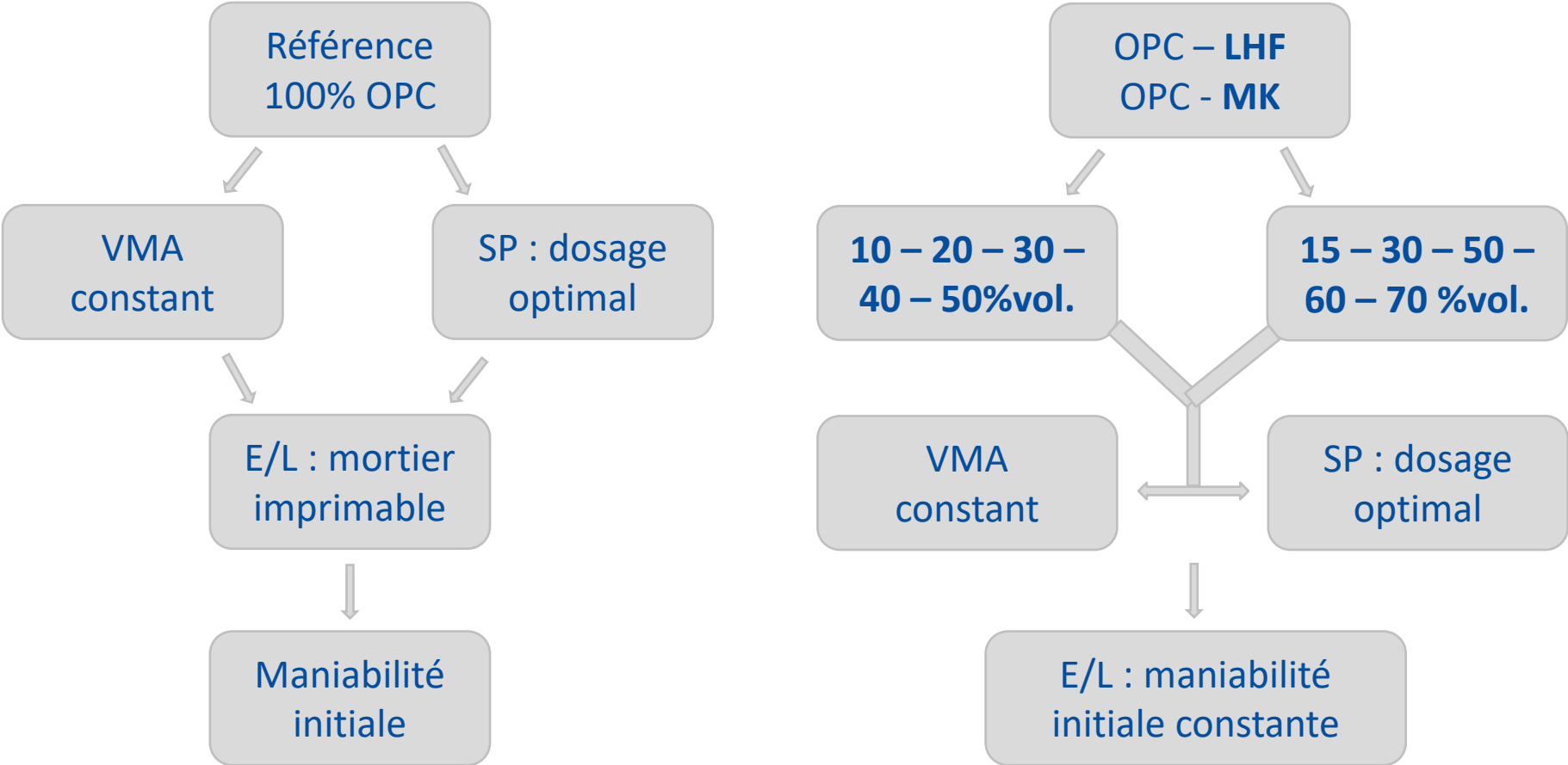
Modification de la composition du liant (on souhaite conserver la fluidité de la pâte)

Difficulté spécifique aux additions:

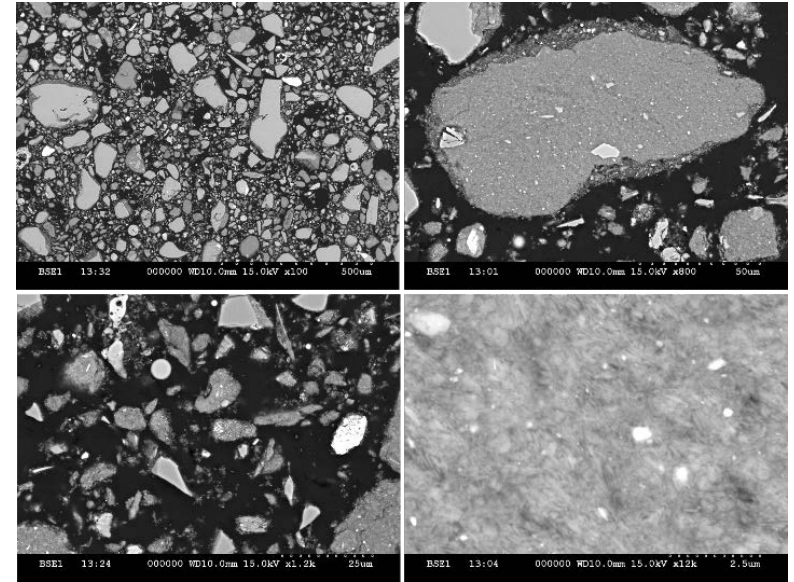
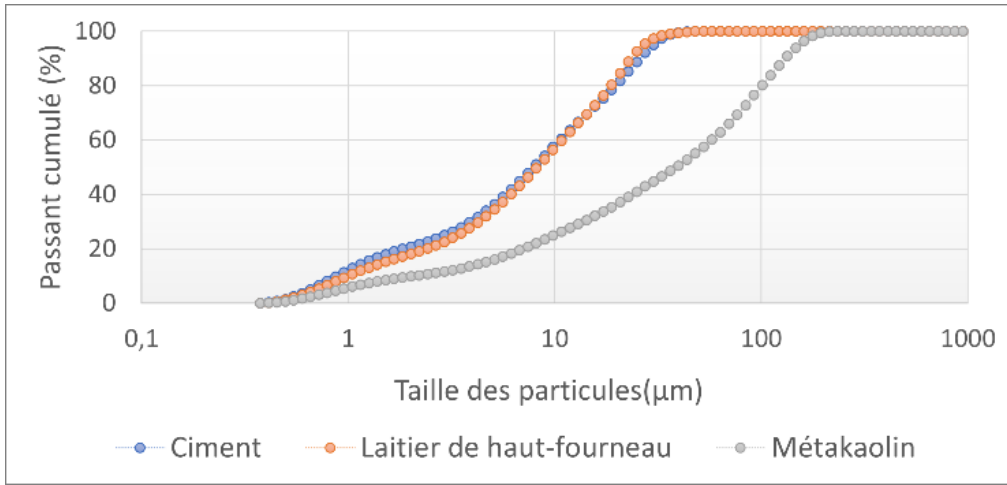
- Modification très importante de  $\phi_m$  (agglomération)
- Différences de réactivités
- Optimisation du coût (adjuvantation)

⇒ En pratique difficile de suivre la méthodologie précédente

# Mortiers imprimables en 3D : substitution du ciment par des additions minérales



# Mortiers imprimables en 3D : substitution du ciment par des additions minérales



**MK plus grossier : agglomération MK sur gros grains de quartz.**

Matériau	D50 (μm)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	Bilan carbone (kg CO <sub>2</sub> /t)
OPC	8	3,16	0,98	765
LHF	8	2,90	2,84	95
MK	39	2,63	15,46	143

# Mortiers imprimables en 3D : substitution du ciment par des additions minérales

Etat frais:

LHF : même dose de saturation que pour OPC (0,4%)

MK : augmentation de la dose de saturation (0,5 à 0,8% pour MK70)

LHF : réduction de la demande en eau (à maniabilité constante)

MK : augmentation de la demande en eau

LHF : tendance à augmenter  $A_{thix}$

MK : réduction de  $A_{thix}$

Etat durci

LHF :

- réduction des résistances à court terme
- maintien, voire augmentation des résistances à long terme ( $E_{eff}/L$  réduit)

MK :

- Réduction des résistances à court et long terme ( $E_{eff}/L$  augmenté)

# Conclusions

## Substitution totale du sable naturel par du sable recyclé?

- Possible sans affecter significativement les propriétés à l'état frais (sous réserve d'une caractérisation précise du sable recyclé)
- L'impact sur les propriétés à l'état durci dépend beaucoup des caractéristiques du sable (certains sables lavés donnent des résultats quasi aussi bons que le SN)
- Possibilité de réaliser une substitution partielle

## Réduction de la teneur en clinker des liants?

- Possible sans affecter significativement des propriétés à l'état frais (pour peu que l'on dispose de deux additions aux effets complémentaires)
- Impact significatif sur les propriétés à l'état durci