

Composition des bétons végétaux

thibaut.lecompte@univ-ubs.fr

Ecole d'Automne, Larmor Plage, 7 au 10 novembre 2022



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Introduction

- Substitution des granulats minéraux par des granulats végétaux : vraiment?
- Approche « minérale »: résistance mécanique et empilement granulaire (choix des granulats et ouvrabilité) ; formulation en E/L et L/G
- Approche « végétale »: résistance thermique, acoustique et porosité; formulation en E/L, L/G et taux de compactage

En repartant de la formulation des bétons

Ex: Méthode de Dreux et Gorisse:

4 critères :

- Dimension maximale des granulats
- **Résistance mécanique souhaitée**
- **Ouvrabilité désirée**
- Nature du ciment utilisé (/agressivité du milieu)

[Dreux, G., Composition des bétons, Techniques de l'ingénieur, C2220 V1, Mai 1982]

En repartant de la formulation des bétons

Résistance mécanique souhaitée:

=> Évaluation du rapport E/C:

Exemple: Formule de Bolomey :

$$R = G \sigma_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Qualité du granulat
(~0,5)

Classe de résistance du ciment
(32,5 MPa, 52,5 MPa...)

[Dreux, G., Composition des bétons, Techniques de l'ingénieur, C2220 V1, Mai 1982]

En repartant de la formulation des bétons

Résistance mécanique souhaitée:

=> Évaluation du rapport E/C:

Formule de type « Féret » :

$$R = K_G \sigma_c \left(\frac{1}{(1 + \frac{E}{C}) (\frac{\rho_C}{\rho_E})} \right)^2$$

Qualité du granulat
(~5)

Classe de résistance du ciment
(32,5 MPa, 52,5 MPa...)

En repartant de la formulation des bétons

Résistance mécanique souhaitée:

=> Évaluation du rapport E/C:

Formule de type « De Larrard »/ Formule généralisée :

Résistance spécifique de la pâte de ciment

$$R = \sigma_0 (\phi_L)^a$$

Fraction volumique de
pâte à l'état durci

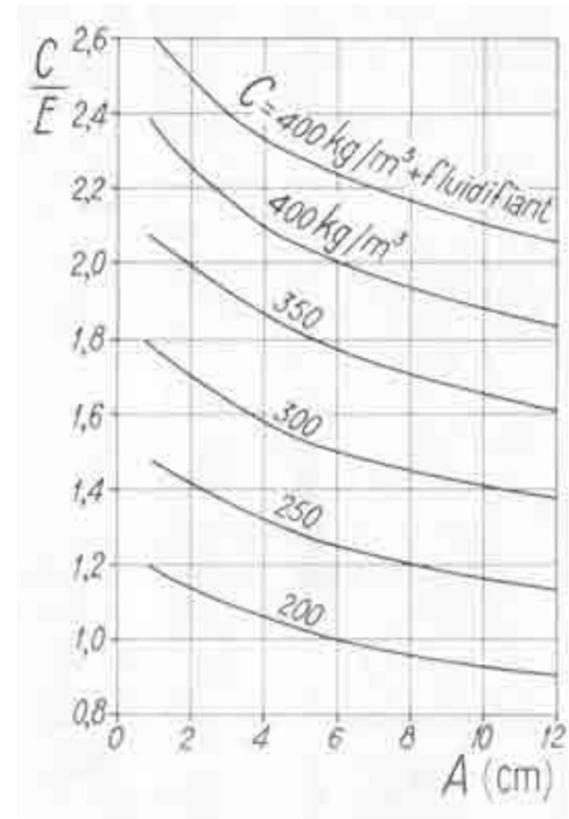
~3 pour la chaux
~2 pour le ciment

[Lanos et al., Formulation and implementation, Bio-Aggregate Based Building Materials, Wiley, 2013]

En repartant de la formulation des bétons

Ouvrabilité souhaitée:

=> Dosage en ciment (!)



[Dreux, G., Composition des bétons, Techniques de l'ingénieur, C2220 V1, Mai 1982]

En repartant de la formulation des bétons

Optimisation de l'empilement granulaire (granulats):

Dépend de la **taille maximale des granulats**, de la **finesse du sable**, du **procédé de fabrication**

⇒ Volume V_g de granulats par m^3 de béton à partir du coefficient de compacité γ théorique, dépendant de la nature et de la taille des granulats, de l'ouvrabilité et de l'énergie de piquage.

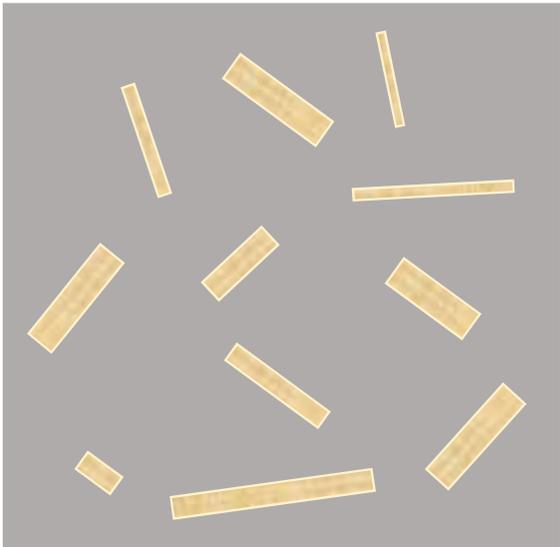
Et pour un béton végétal?

Seulement trois « ingrédients »:

- Particules végétales
- Eau
- Liant : Chaux, Ciment ou barbotine (ou rien?)

Granulats végétaux en milieu dilué

Granulats végétaux = porosité supplémentaire



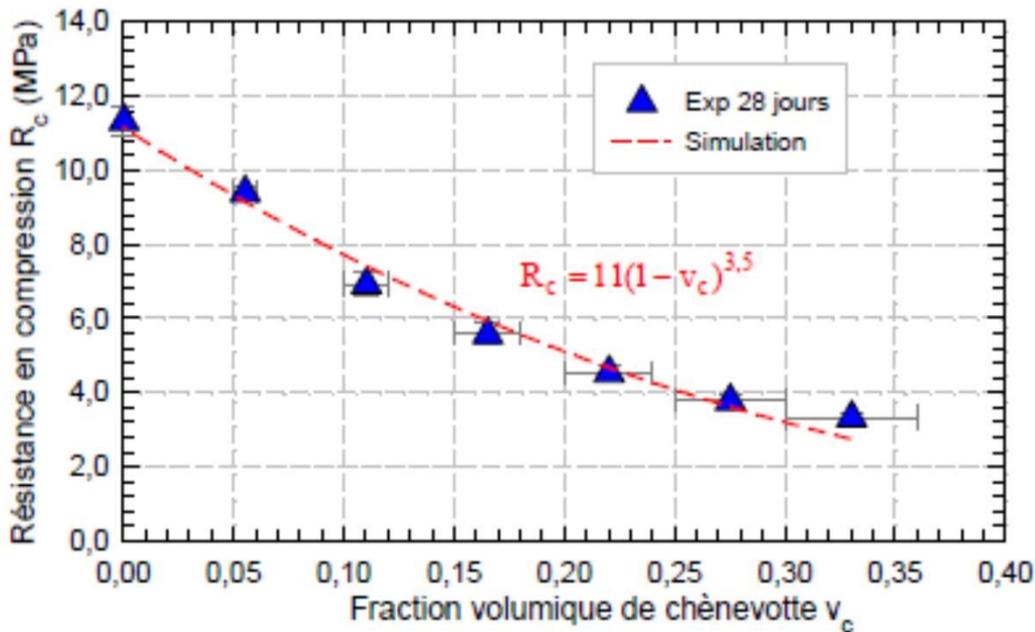
$$\phi_L = \frac{V_L}{V_L + V_G} = \frac{1}{1 + \frac{G}{L} \frac{\rho_L}{\rho_{part}}}$$

Densité particulaire

$$R = \sigma_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{G}{L} \frac{\rho_L}{\rho_{part}}} \right)^a$$

Granulats végétaux en milieu dilué

Granulats végétaux = porosité supplémentaire



[Thèse Pham TH, Thèse Université Bretagne-Sud, 2014]

$$\phi_L = \frac{V_L}{V_L + V_G} = \frac{1}{1 + \frac{G}{L} \frac{\rho_L}{\rho_{part}}}$$

Densité particulaire

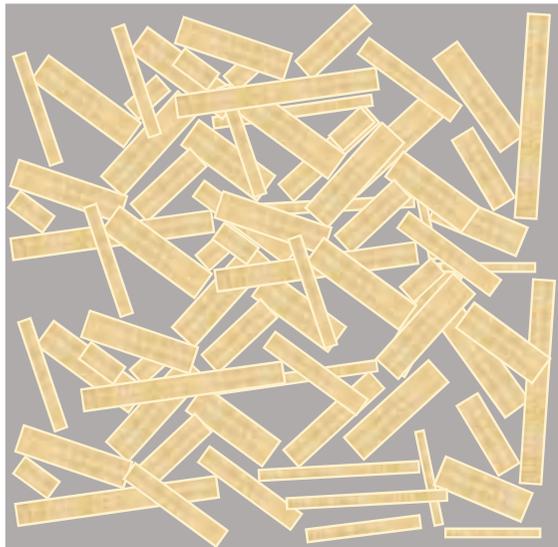
$$R = \sigma_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{G}{L} \frac{\rho_L}{\rho_{part}}} \right)^a$$

Particules végétales en milieu percolant



Granulats végétaux = empilement granulaire

⇒ Comportement d'un empilement granulaire seul:
Plusieurs modèles (anciens) dans la littérature:



Jones : $\rho/\rho_s = (\sigma/\sigma_s)^a$

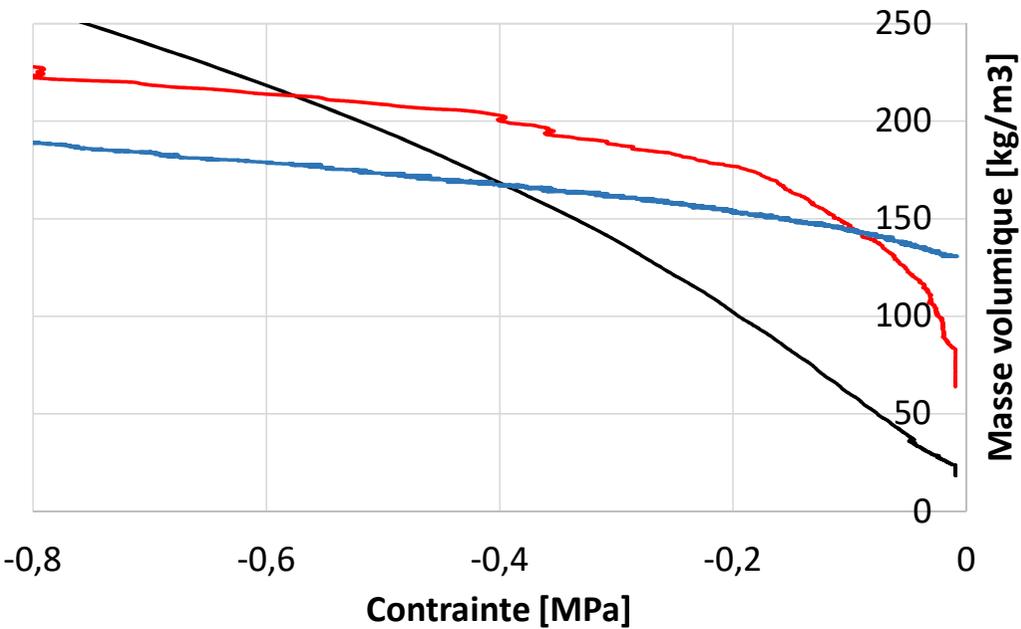
Walker : $\frac{\rho}{\rho_0} = a \ln(\sigma/\sigma_0)$

Cooper&Eaton: $\frac{1-C/C_0}{1-C_0} = a_r e^{-\frac{P_r}{\sigma}} + a_d e^{-\frac{P_d}{\sigma}} + \dots$

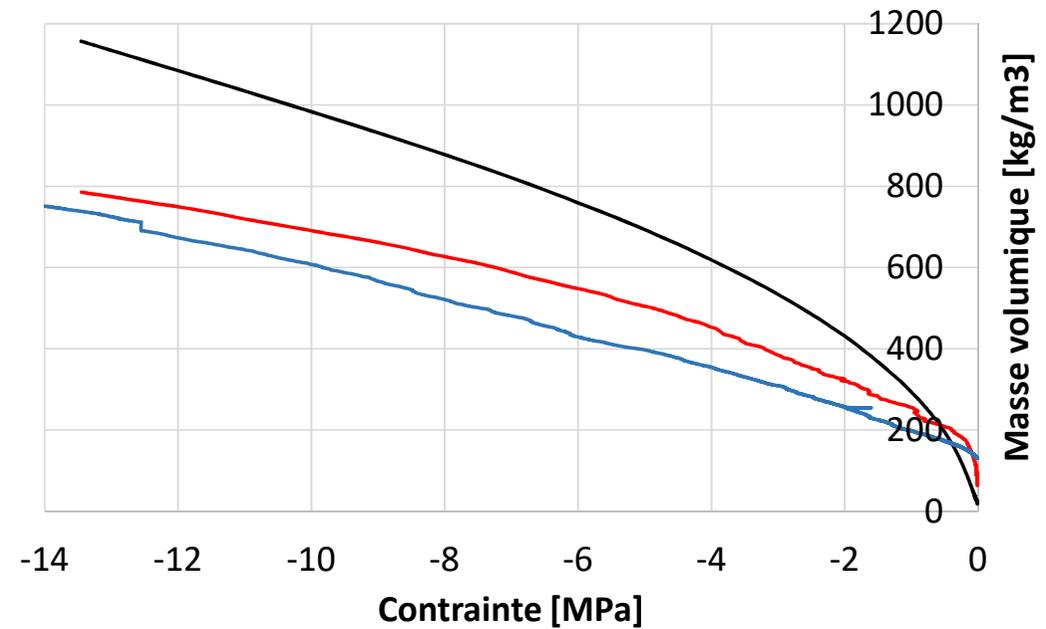
[Walker, E., The properties of powders_ Part, Trans. Faraday Soc., 1923 ; Cooper, A., Eaton, L., Compaction behavior of several ceramic powders, J. Am.Ceram.Soc., 1962; Jones, WD, Fundamental principle of powder metallurgy, Edward Arnold Publisher, 1960 ; Glé et al., Densities of hemp shiv for building: From multiscale caractérisation to application, Ind. Crops. Prod., 2021]

Particules végétales en milieu percolant

— Moelle EXP — Roseau EXP — chenevotte EXP

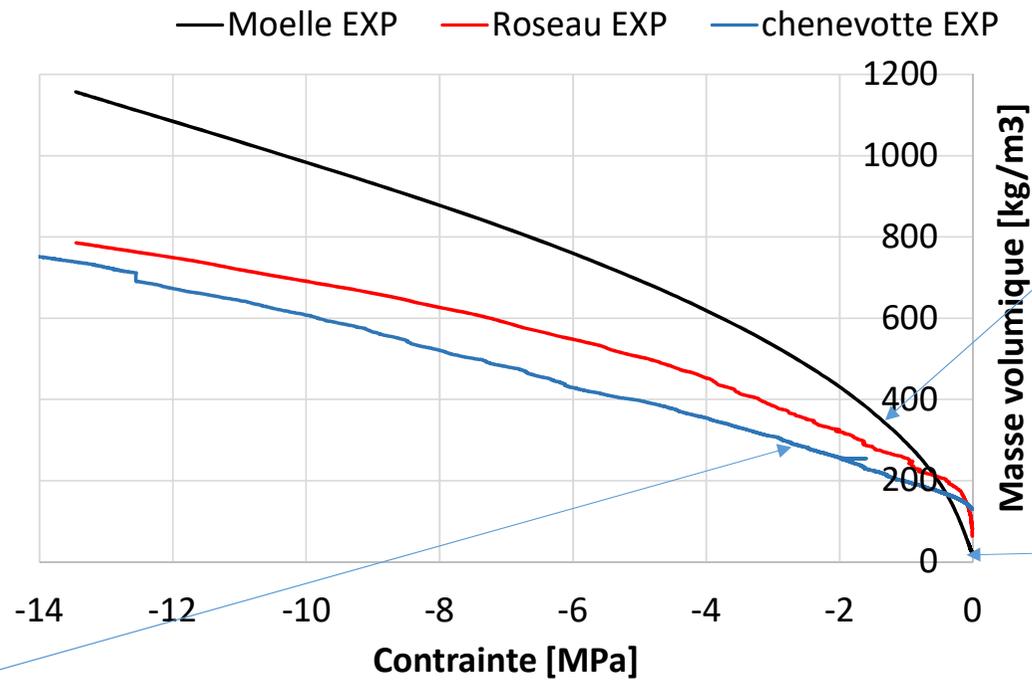


— Moelle EXP — Roseau EXP — chenevotte EXP



COMPRESSION EN CELLULE DE COMPRESSION

Particules végétales en milieu percolant



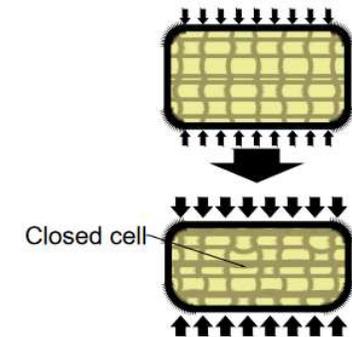
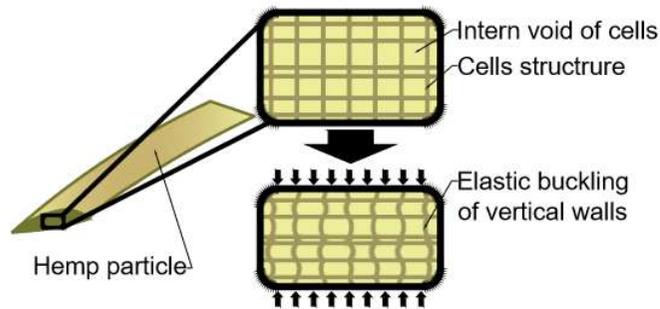
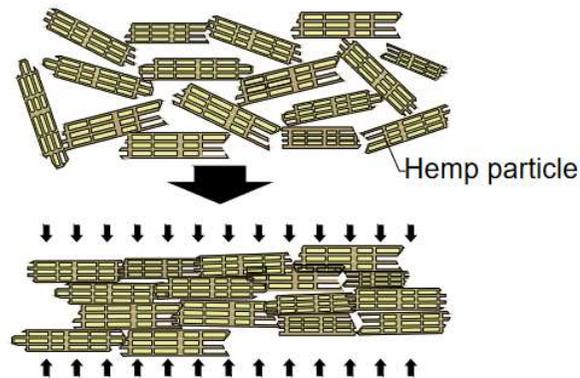
COMPRESSION EN CELLULE DE COMPRESSION

Particules végétales en milieu percolant

Granulats végétaux = empilement granulaire

Cooper&Eaton:

$$\frac{1-C/C_0}{1-C_0} = a_r e^{-\frac{P_r}{\sigma}} + a_d e^{-\frac{P_d}{\sigma}} (+ a_f e^{-\frac{P_f}{\sigma}})$$



$$\frac{1}{\rho} = \frac{1 - e^{-\frac{-P_r}{\sigma}}}{\rho_{vrac}} + \frac{e^{-\frac{-P_r}{\sigma}} - e^{-\frac{-P_d}{\sigma}}}{\rho_{part}} + \frac{e^{-\frac{-P_d}{\sigma}}}{\rho_{dense}}$$

[Cooper, A., Eaton, L., Compaction behavior of several ceramic powders, J. Am.Ceram.Soc., 1962;

Glé et al., Densities of hemp shiv for building: From multiscale caractérisation to application, Ind. Crops. Prod., 2021]

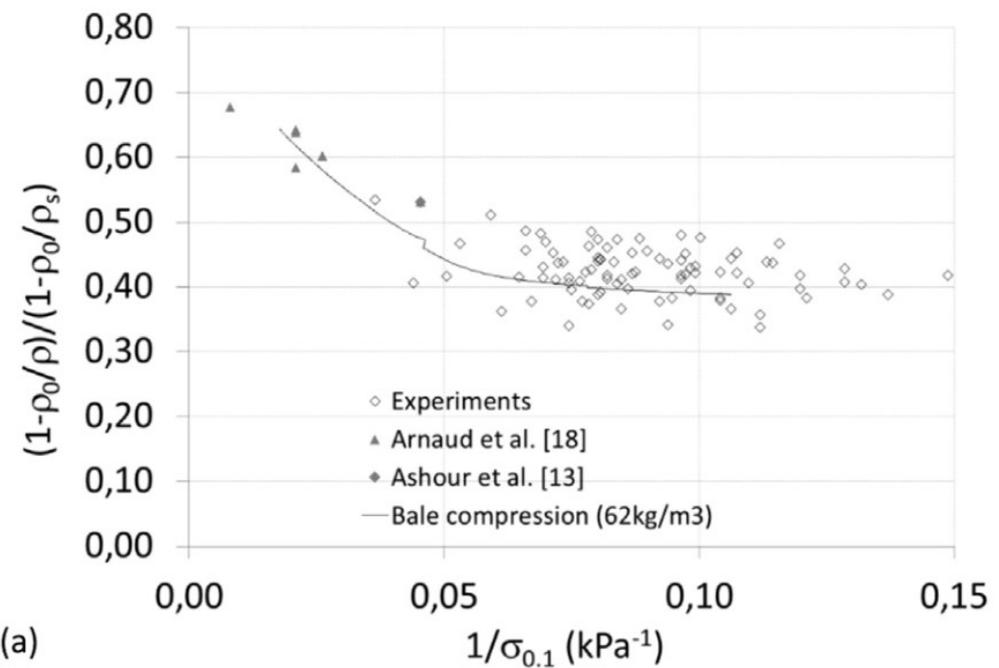
Particules végétales en milieu percolant

Granulats végétaux = empilement granulaire



Campagne sur une centaine de bottes de paille de blé

=> Influence de la densité, de la densité « **vrac** » et de la densité **spécifique**



[Lecompte & Le Duigou, J. Build. Eng. , 2017]

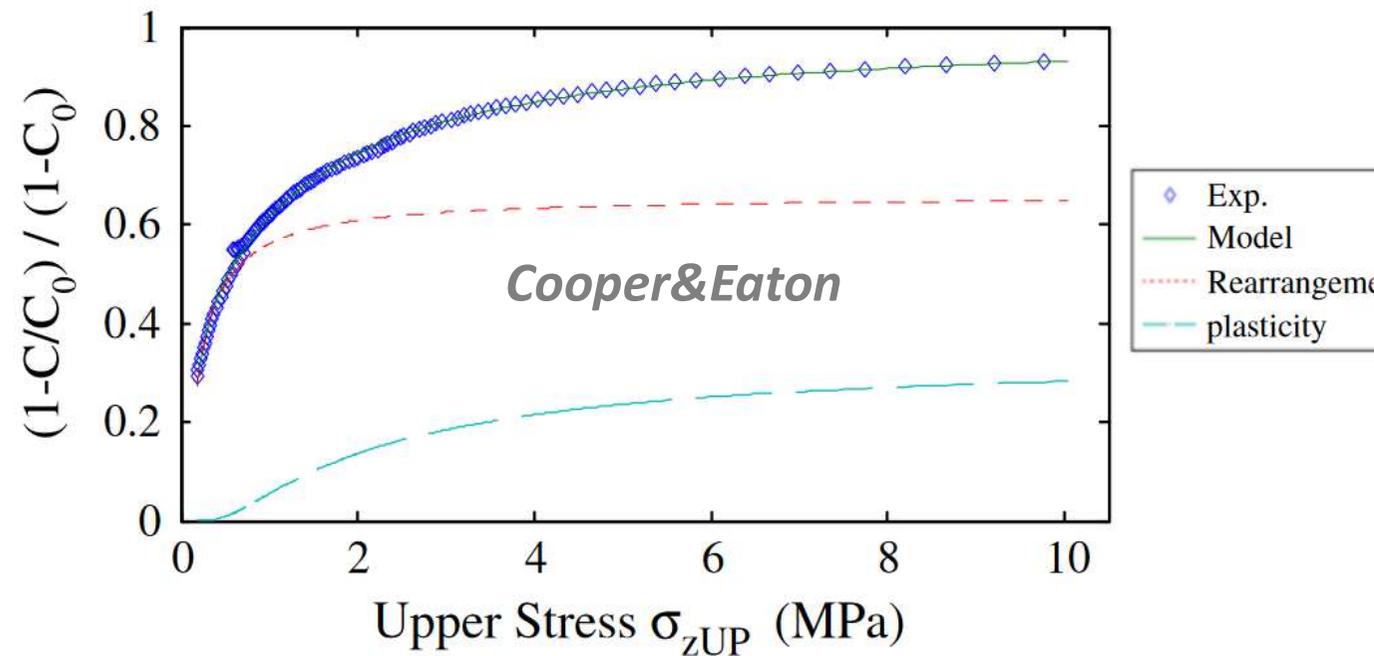
Particules végétales en milieu percolant

Granulats végétaux = empilement granulaire



Mélange Chaux-Chanvre Complet

Mise en œuvre par compression



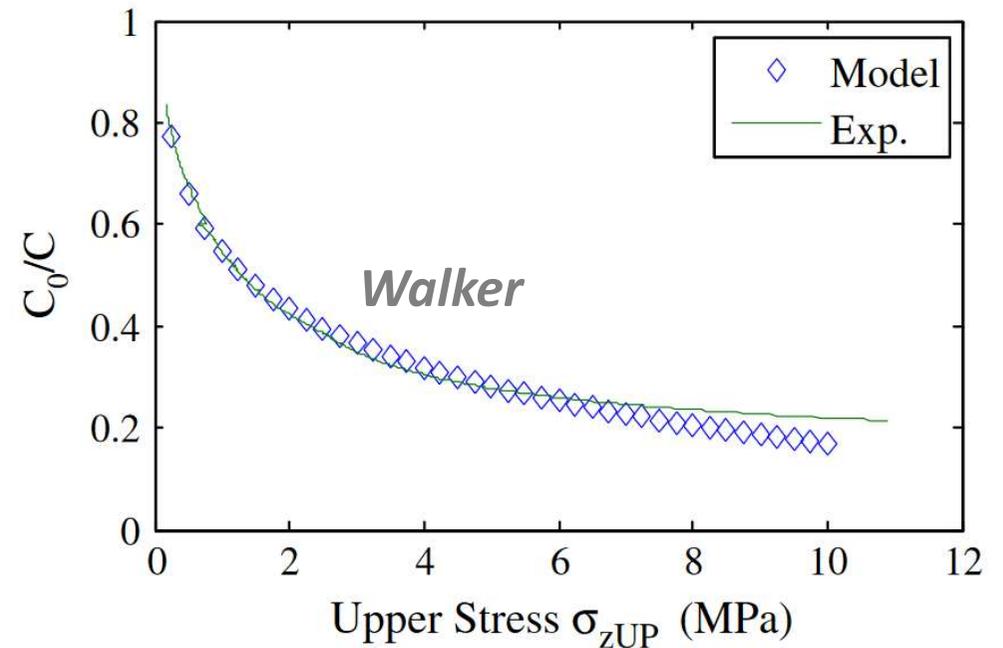
[Tronet et al., Powder Technology, 2014]

Particules végétales en milieu percolant

Granulats végétaux = empilement granulaire



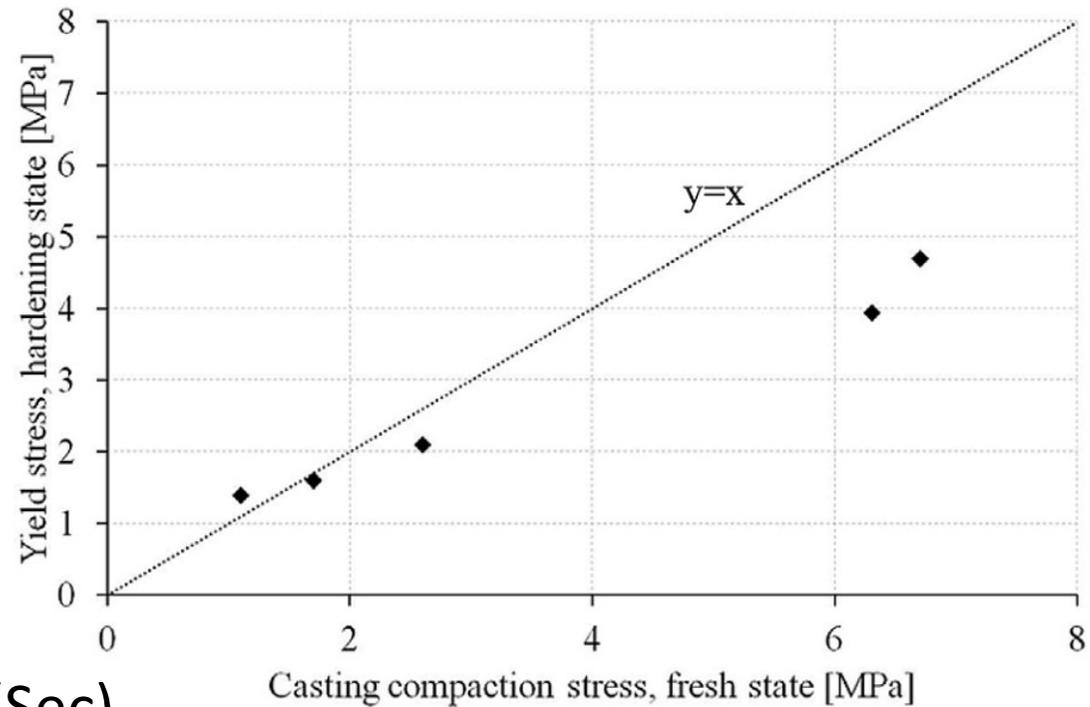
Mélange Chaux-Chanvre Complet (Sec)
Mise en œuvre par compression



[Tronet et al., Powder Technology, 2014]

Particules végétales en milieu percolant

Granulats végétaux = empilement granulaire



Mélange Chaux-Chanvre Complet (Sec)

Mise en œuvre par compression

[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Particules végétales en milieu percolant

Granulats végétaux = empilement granulaire



Remarque: si percolation des particules et compression lors de la mise en œuvre: réduction en volume et déformation des particules

Coefficient de compression

$$\Rightarrow c_{LHC} = C/C_{vrac}$$

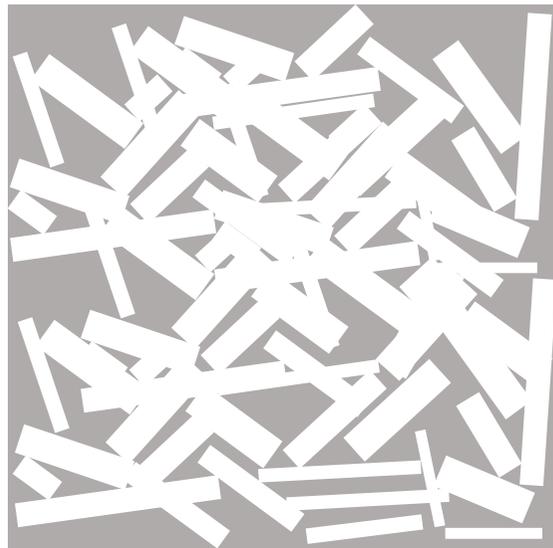
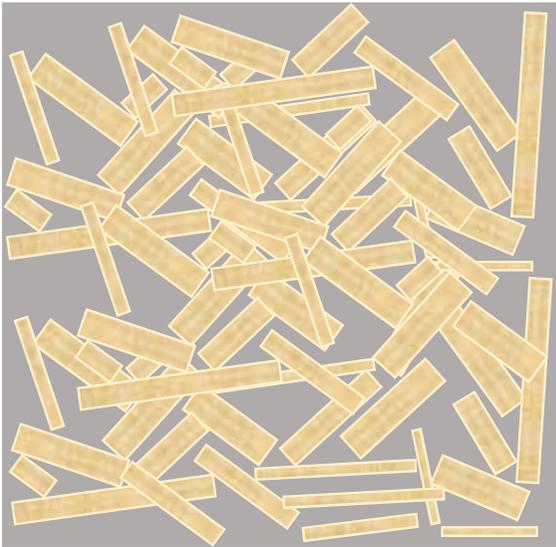
Manuellement, difficile de comprimer au-delà de la compacité de réarrangement, i.e. diminution environ par deux du volume ($c_{LHC} \sim 2$)

[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{LIANT} + \sigma_{GRANULAT}$$



[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{LIANT} + \sigma_{GRANULAT}$$

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_L (\phi_L)^a + \underbrace{\sigma_G (\tilde{\phi}_G)^b}$$

$$\phi_G = (\sigma / \sigma_G)^\beta \Rightarrow \sigma = \sigma_G (\phi_G)^{1/\beta}$$

Formule de Jones

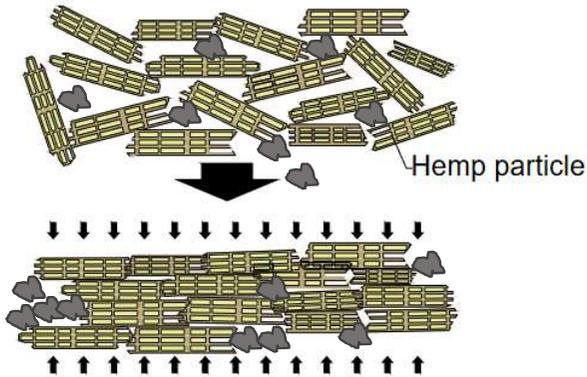
[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{LIANT} + \sigma_{GRANULAT}$$

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_L (\phi_L)^a + \sigma_G (\tilde{\phi}_G)^b$$



$$\tilde{\phi}_G = \phi_G / \phi_{G_max}$$

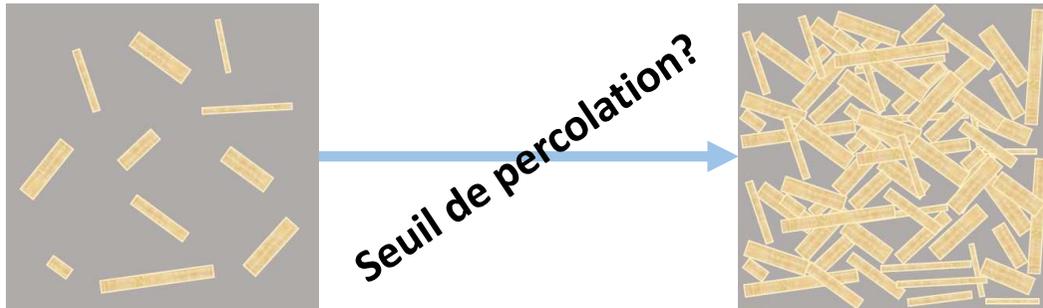
[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{LIANT} + \sigma_{GRANULAT}$$

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_L (\phi_L)^a + \sigma_G (\tilde{\phi}_G)^b$$



$$G > \rho_{vrac} \quad (\text{chènevotte} \sim 110 \text{kg/m}^3)$$

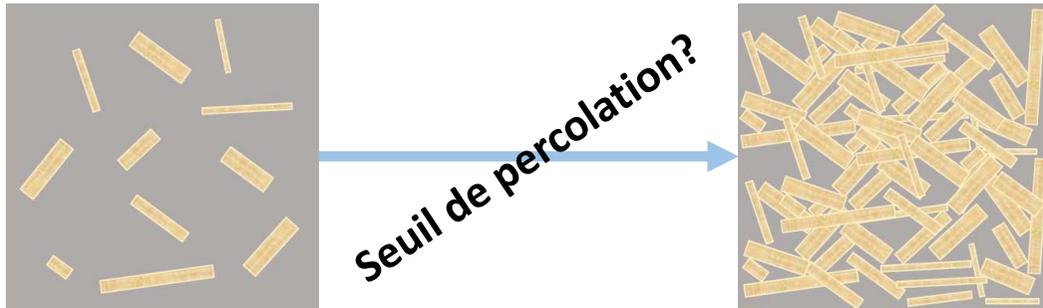
[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{LIANT} + \sigma_{GRANULAT}$$

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_L (\phi_L)^a + \sigma_G (\tilde{\phi}_G)^b$$



$$G > \rho_{vrac} \quad (\text{chènevotte} \sim 110 \text{kg/m}^3)$$
$$V_{E+L} < 1 - G_{vrac} / \rho_{part}$$

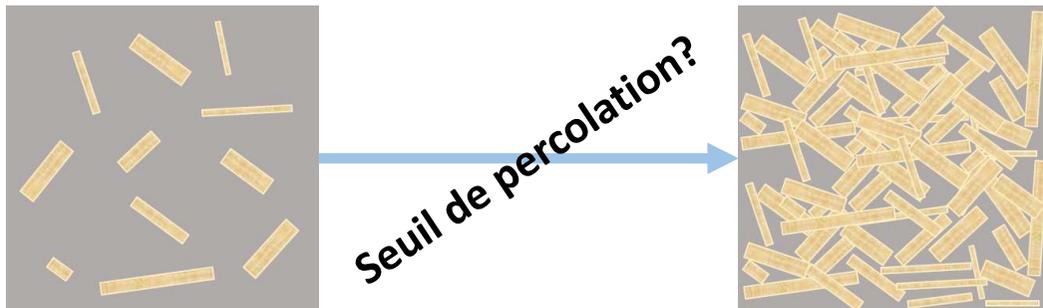
[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{LIANT} + \sigma_{GRANULAT}$$

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_L (\phi_L)^a + \sigma_G (\tilde{\phi}_G)^b$$



$$G > G_{vrac} \text{ (chènevotte } \sim 110 \text{ kg/m}^3\text{)}$$
$$(L/G) < 5.4 \text{ (chènevotte avec } E/L \sim 0,56\text{)}$$

[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal = apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_{LIANT} + \sigma_{GRANULAT}$$

$$\sigma_{TOTAL} = \sigma_L (\phi_L)^a + \sigma_G (\tilde{\phi}_G)^b$$

$$= \sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$

[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$


Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 Mpa
[Nguyen et al., EJECE, 2009]

[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$



Densité spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 2550 kg/m³

Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 MPa [Nguyen et al., EJECE, 2009]

[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$

Taux d'hydratation du liant. ex: Chaux aérienne: $t=1$, Ciment $t=1.25$, Tradical PF70 $t=1.1$

[Tronet et al., CCC, 2016]

Densité spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 2550 kg/m³

Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 MPa [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$

$\alpha=3$ pour de la Tradical PF70 [Nguyen et al., EJECE, 2009]

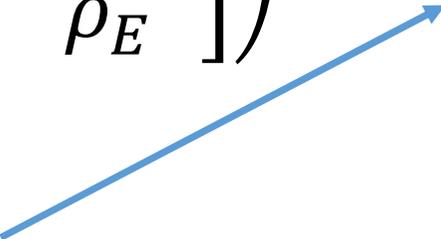
Taux d'hydratation du liant. ex: Chaux aérienne: $t=1$, Ciment $t=1.25$, Tradical PF70 $t=1.1$ [Tronet et al., CCC, 2016]

Densité spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 2450 kg/m^3

Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 MPa [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$


Résistance spécifique le l'empilement granulaire. Ex: Chanvribat : 233 MPa

[Tronet et al., Pow. Tech., 2014]

$\alpha=3$ pour de la Tradical PF70 [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Taux d'hydratation du liant. ex: Chaux aérienne: $t=1$, Ciment $t=1.25$, Tradical PF70 $t=1.1$ [Tronet et al., CCC, 2016]

Densité spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 2450 kg/m³

Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 MPa [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$

Densité spécifique du granulat. En général $\sim 1450 \text{ kg/m}^3$

Résistance spécifique le l'empilement granulaire. Ex: Chanvribat : 233 MPa [Tronet et al., Pow. Tech., 2014]

$\alpha=3$ pour de la Tradical PF70 [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Taux d'hydratation du liant. ex: Chaux aérienne: $t=1$, Ciment $t=1.25$, Tradical PF70 $t=1.1$ [Tronet et al., CCC, 2016]

Densité spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 2450 kg/m^3

Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 MPa [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(L \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(G \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (L/G) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$

$b=5$ pour le Chanvribat [Tronet et al., Pow. Tech., 2014]

Densité spécifique du granulat. En général $\sim 1450 \text{ kg/m}^3$

Résistance spécifique de l'empilement granulaire. Ex: Chanvribat : 233 MPa [Tronet et al., Pow. Tech., 2014]

$a=3$ pour de la Tradical PF70 [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Taux d'hydratation du liant. ex: Chaux aérienne: $t=1$, Ciment $t=1.25$, Tradical PF70 $t=1.1$ [Tronet et al., CCC, 2016]

Densité spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 2450 kg/m^3

Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 MPa [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Synthèse des deux approches

Béton végétal= apport du squelette granulaire + apport du liant

$$\sigma_L \left(\mathbf{L} \left[\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right] \right)^a + \sigma_G \left(\mathbf{G} \left[\frac{1}{\rho_{G_S}} + (\mathbf{L}/\mathbf{G}) \left(\frac{1}{\rho_L} + \frac{t-1}{\rho_E} \right) \right] \right)^b$$

$b=5$ pour le Chanvribat [Tronet et al., Pow. Tech., 2014]

Densité spécifique du granulat. En général $\sim 1450 \text{ kg/m}^3$

Résistance spécifique de l'empilement granulaire. Ex: Chanvribat : 233 MPa [Tronet et al., Pow. Tech., 2014]

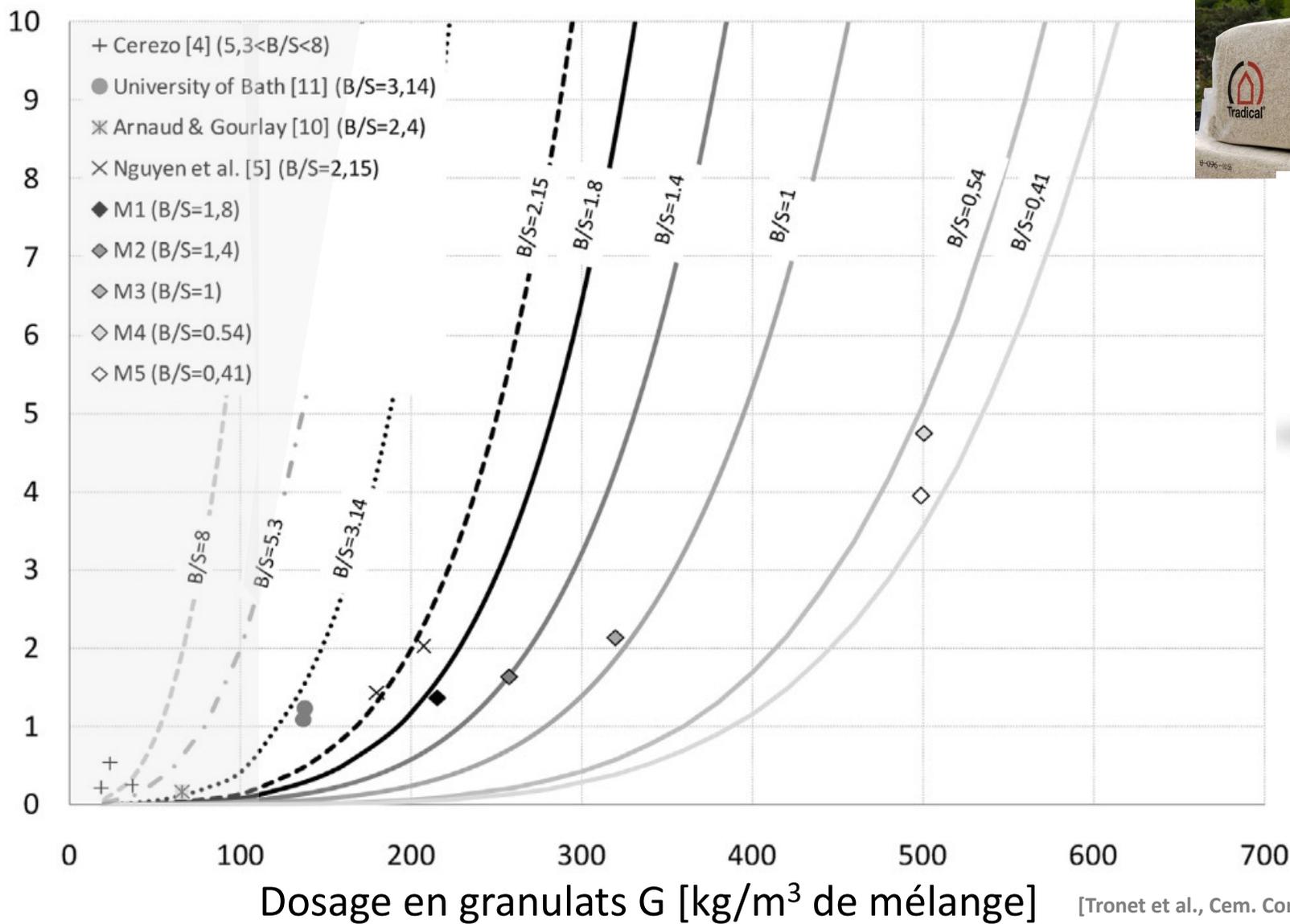
$a=3$ pour de la Tradical PF70 [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Taux d'hydratation du liant. ex: Chaux aérienne: $t=1$, Ciment $t=1.25$, Tradical PF70 $t=1.1$ [Tronet et al., CCC, 2016]

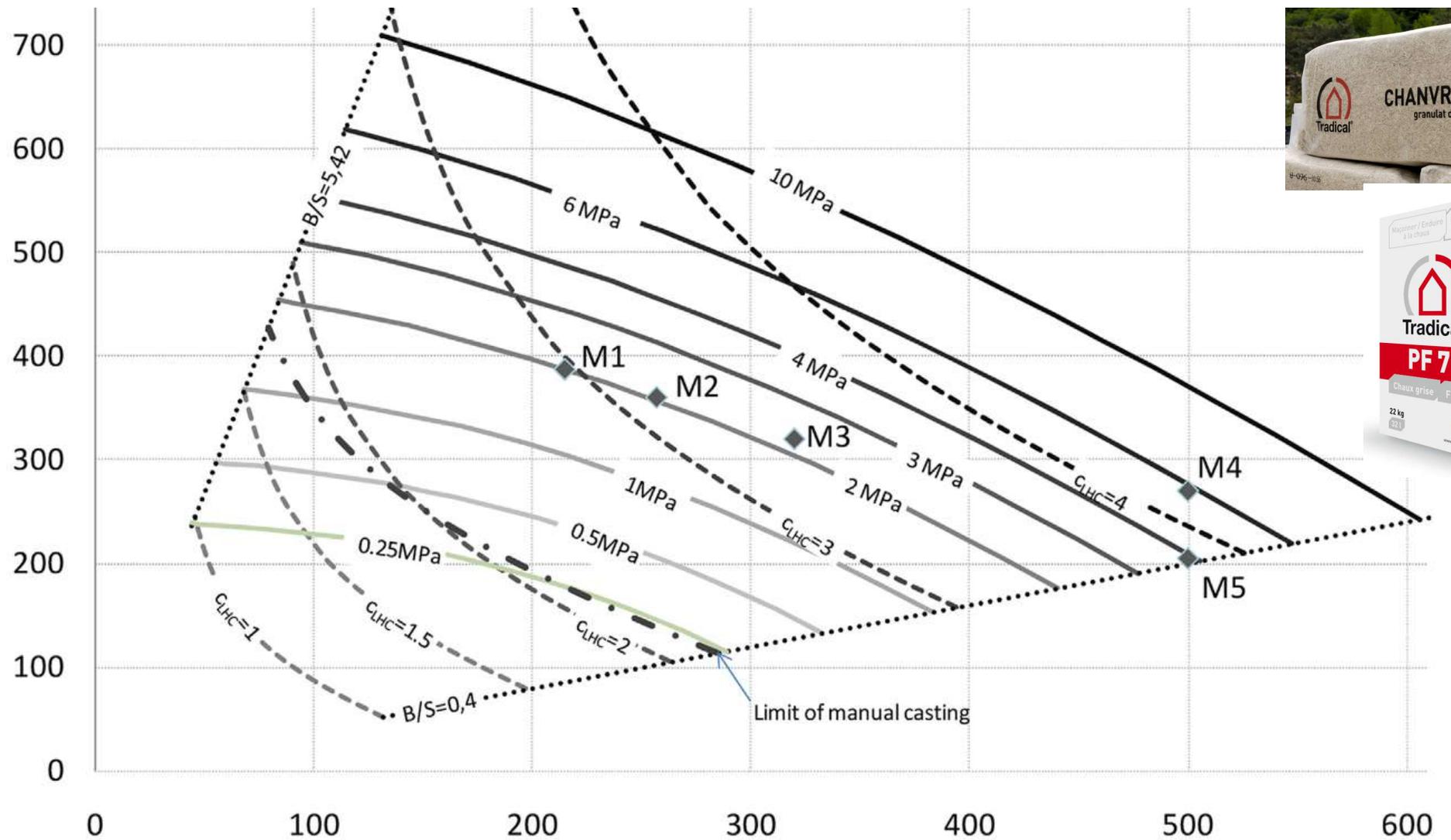
Densité spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 2450 kg/m^3

Résistance spécifique du liant. ex: Tradical PF70 : 126 MPa [Nguyen et al., EJECE, 2009]

Résistance à l'état durci [MPa]



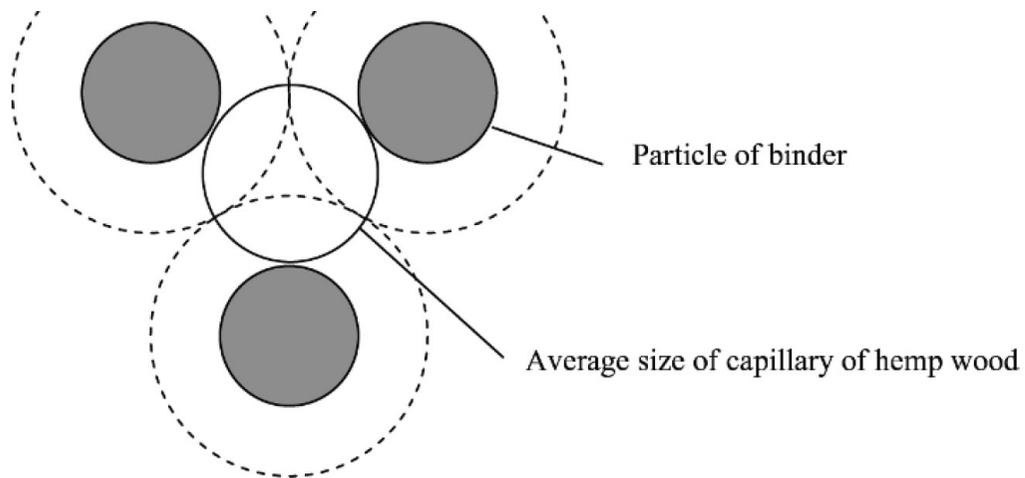
Dosage en Liant L [kg/m³ de mélange]



Dosage en granulats G [kg/m³ de mélange]

[Tronet et al., Cem. Conc. Comp., 2016]

Dosage en eau (mélange Chaux-Chanvre)



$$\frac{E}{L} = 0.56 \text{ (si } \rho_L \approx 2500 \text{ kg/m}^3\text{)}$$

Rapport E/L adapté pour projection,
Vibro-compactage, compression
sous presse

[Lanos et al., In: Bio aggregates based building materials , 2013]

Dosage en eau (mélange Chaux-Chanvre)

$$0.56 < \frac{E}{L} < 0.56 + \frac{G}{L} \cdot \text{absorption max}$$

$$0.56 < \frac{E}{L} < 0.56 + \frac{G}{L} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{G-part}}{\rho_{G-s}} \right) \frac{\rho_E}{\rho_{G-part}}$$

Ex: $G/L=1$; chènevotte : $\rho_{G-part} = 260 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{G-s} = 1450 \text{ kg/m}^3$

$$0.56 < \frac{E}{L} < 3.15$$

Dosage en eau et en liant (mélange Chaux-Chanvre)

Dosages typiques (règles construire en chanvre)

- Mur 400 kg/m³ L/G ≈ 2
- Toiture 250 kg/m³ L/G ≈ 1
- Sol 500 à 600 kg/m³ L/G > 5

$$(0.5) < E/L < 1.5$$

Synthèse : formulation d'un béton végétal

En général, on vise une densité à l'état durci : ρ

⇒ Résistance thermique

⇒ Comportement acoustique

⇒ Équation reliant L et G:

$$\rho = G + Lt$$

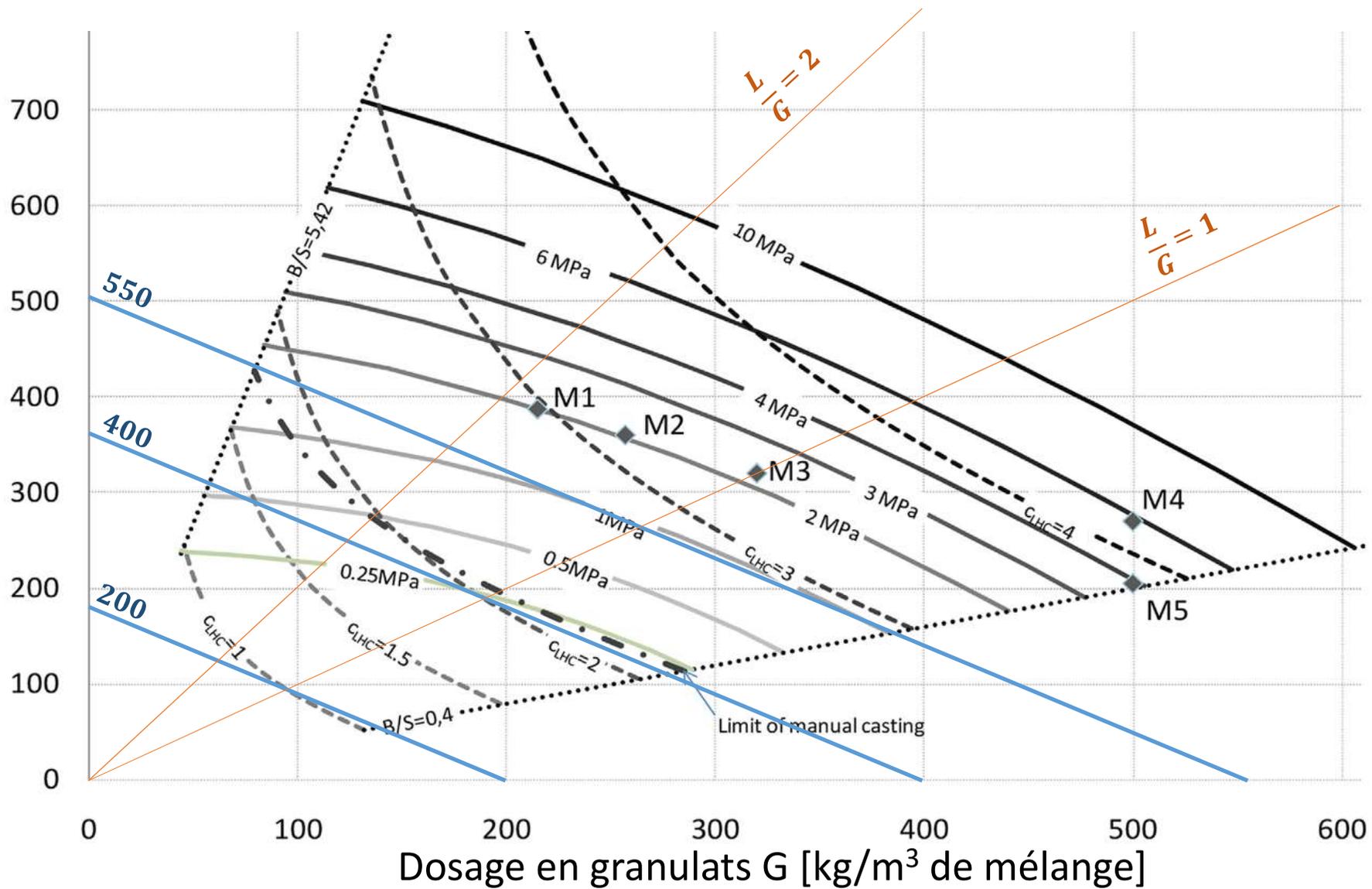
Synthèse : formulation d'un béton végétal

WALL	Elasticity Modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)
Threshold value (minimum) <i>in standard condition</i>	> 15 MPa	> 0.2 MPa

ROOF	Elasticity Modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)
Threshold value (minimum) <i>in standard condition</i>	> 3 MPa	> 0.05 MPa

RENDERING	Elasticity Modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)
Threshold value (minimum) <i>in standard condition</i>	> 20 MPa	

Dosage en Liant L [kg/m³ de mélange]



Substitution du liant minéral par de la barbotine

En recherche : travailler à fraction volumique de « liant durci » constante

$$V_{LD} = \frac{L}{\rho_L} + \frac{Lt}{\rho_E}$$

$$V_{TD} = \frac{T}{\rho_T}$$



Terre-allégée banché
(220 – 500 kg/m³)



Terre-allégée projeté
(220 – 500 kg/m³)



Granulat stabilisé
(<220 kg/m³)

Substitution d'une particule végétale par une autre

Difficulté liée à la déformabilité du végétal de substitution:

- Si matériaux de comportement voisin (ex: Roseau /Ana de lin/ Chènevotte), travail à fraction volumique particulaire constante ou travail à fraction volumique solide constante
- Si matériau très déformable et de forme plus sphérique (moelle de tournesol), travail en cherchant à combler la porosité inter-particulaire

Conclusion

Vers une banque de donnée avec un diagramme de formulation pour chaque binôme Liant/Granulat?

Vers une démarche identique sur les terres allégées?