



Du compactage à l'impression 3D de matériaux à base de terre : Approche rhéologique

Arnaud Perrot, Université de Bretagne Sud



Introduction: Contexte

- Projet de recherche Breton : **ÉCOMATERRE** (début en 2016)
 - Construire un bâtiment R+3 en terre crue / Assurance Ok
 - Construire au même **prix** et au même **rythme** que le béton
 - 0% liant hydraulique
 - Utilisation des ressources locales :
 - La **(les) Terre(s)**
 - Ajout biosourcé: fibres et biopolymères

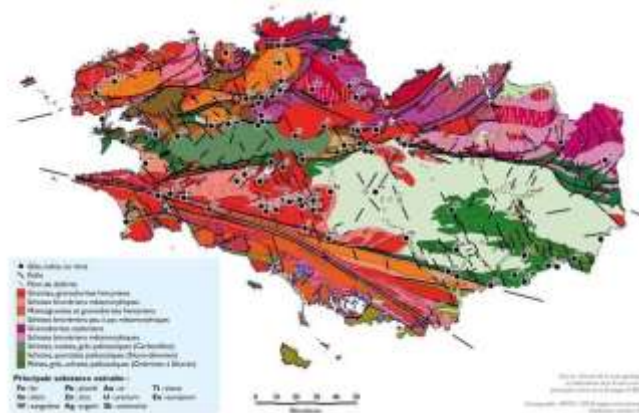


Introduction : Contexte



Introduction: La terre Bretonne, une ressource hétérogène

- Grande variabilité : couleur, granulométrie, sensibilité à l'eau, teneur en argile, comportement gonflant,....



- Paramètres critiques :
 - **Nature minéralogique** des particules fines (argile, limon fin)
 - **Granulométrie**

Introduction: La terre Bretonne, une ressource hétérogène

- Grosse **difficulté** = forte **variabilité** du matériau
- *Étalement* : 27 terres (Bretagne, Basse Normandie), différentes teneurs en eau w%



Picture of Théo Venceslas

Introduction: Philosophie du travail

- Étudier et adapter la **Rhéologie** (consistance) du matériau Terre pour optimiser les **procédés de mise en forme**
- Importer et utiliser des concepts et des techniques de l'industrie du béton et de la céramique
 - Défloculation = Fluidification
 - Optimisation de la distribution granulométrique
- Trouver un langage commun entre toutes les communautés :
 - Communauté « **géotechnique** » (description des ressources)
 - Communauté « **géologie** » (autre description des ressources)
 - Communauté « **béton** » (Savoir-faire « rhéologique »)
 - Communauté « **terre vernaculaire** » (Les gens qui utilisent déjà la terre)

**Facilité la mise en forme /
Obtenir des densités plus fortes**

Introduction : Philosophie de travail



Solutions de construction de logements

Construction Terre vernaculaire (bauge, pisée, adobes...)

Faible impact environnement
Relativement cher (main d'œuvre)
Performances mécaniques limitées
Confort thermo-hydrique

Savoir empirique

Construction conventionnelle (béton, terre cuite...)

Impact environnemental plus élevé
Très compétitif économiquement
Performances mécaniques garanties

Approche scientifique

Introduction : Philosophie de travail



Solutions de construction de logements

Construction Terre vernaculaire
(bauge, pisée, adobes...)

Faible impact environnement

Relativement cher (main d'œuvre)

Performances mécaniques limitées

Confort thermo-hydrigue

Savoir empirique

Construction conventionnelle
(béton, terre cuite...)

Impact environnemental plus élevé

Très compétitif économiquement

Performances mécaniques garanties

Pas ou peu de régulation hydrique

Approche scientifique

Introduction : Philosophy of work



Solutions de construction de logements

Construction Terre vernaculaire
(bauge, pisée, adobes...)

Faible impact environnement

Relativement cher (main d'œuvre)

Performances mécaniques limitées

Confort thermo-hydrique

Savoir empirique

**Troisième voie :
Matériau Terre optimisée**

Construction conventionnelle
(béton, terre cuite...)

Impact environnemental plus élevé

Très compétitif économiquement

Performances mécaniques garanties

Pas ou peu de régulation hydrique

Approche scientifique

Introduction: Sommaire

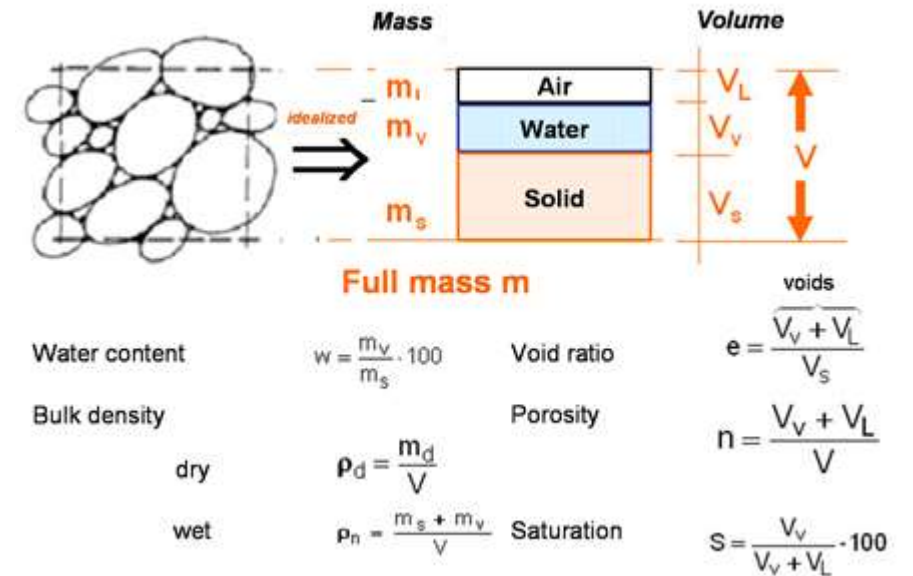
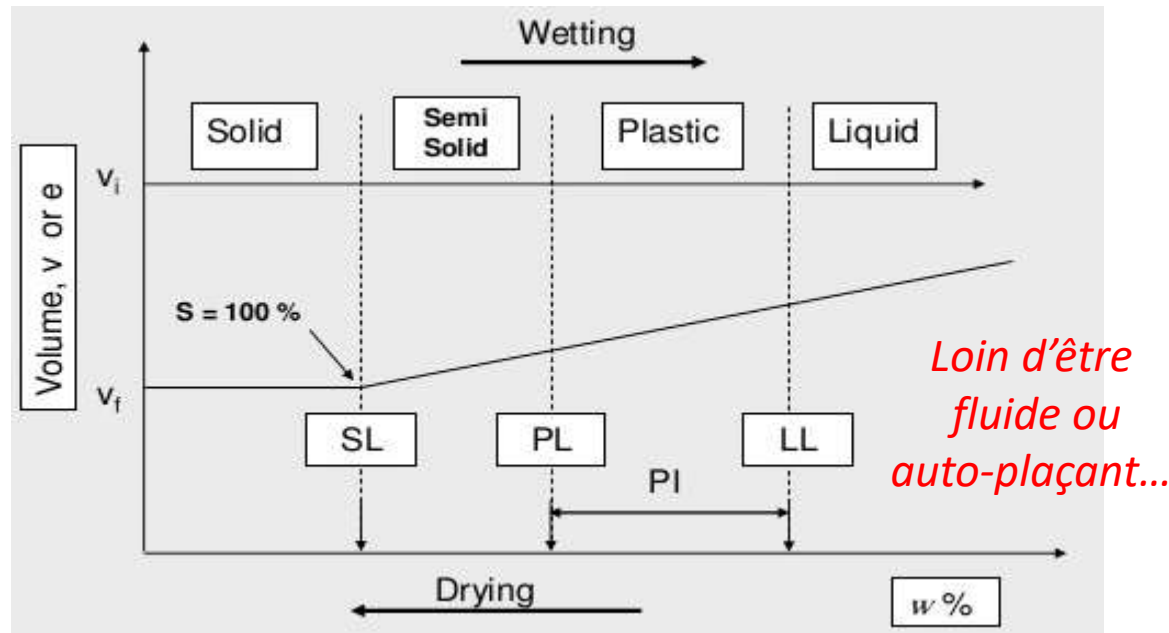
- Procédés de mise en œuvre du matériau Terre
 - Qu'est-ce qu'une mise en œuvre efficace?
 - Optimisation du couple matériau/procédé
 - Impact sur la résistance à la compression

- Études rhéologiques
 - Développement d'essais de consistance adaptés
 - Effets de différentes additions

- Impression 3D d'un matériau Terre

Procédés de mise en œuvre de la Terre

- Préambule : lien entre géotechnique et rhéologie



Fraction volumique solide = 1-n

Définition « argile »??

Comportement granulaire

Comportement pâteux

Comportement de Suspensions concentrées

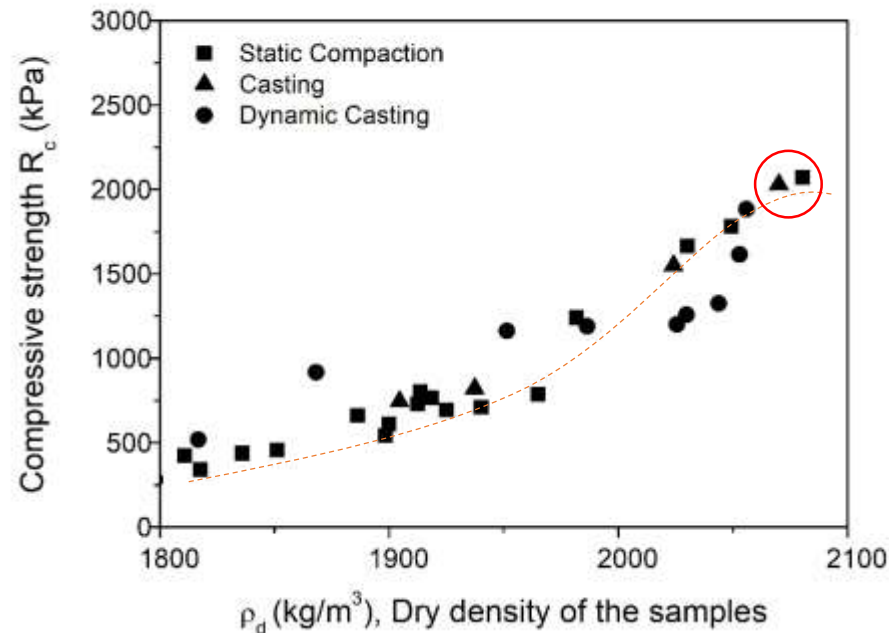
w_{PL}
 $\tau_0 \approx 100 \text{ kPa}$

w_{LL}
 $\tau_0 \approx 2 \text{ kPa}$

Auto-plaçant
 $\tau_0 \approx 50 \text{ Pa}$

Procédés de mise en œuvre de la Terre

- Procédé efficace = forte densité = forte résistance mécanique
- Résistance à la compression = f (densité sèche)



Procédé efficace :

Procédé permettant d'obtenir les plus fortes densités sèches

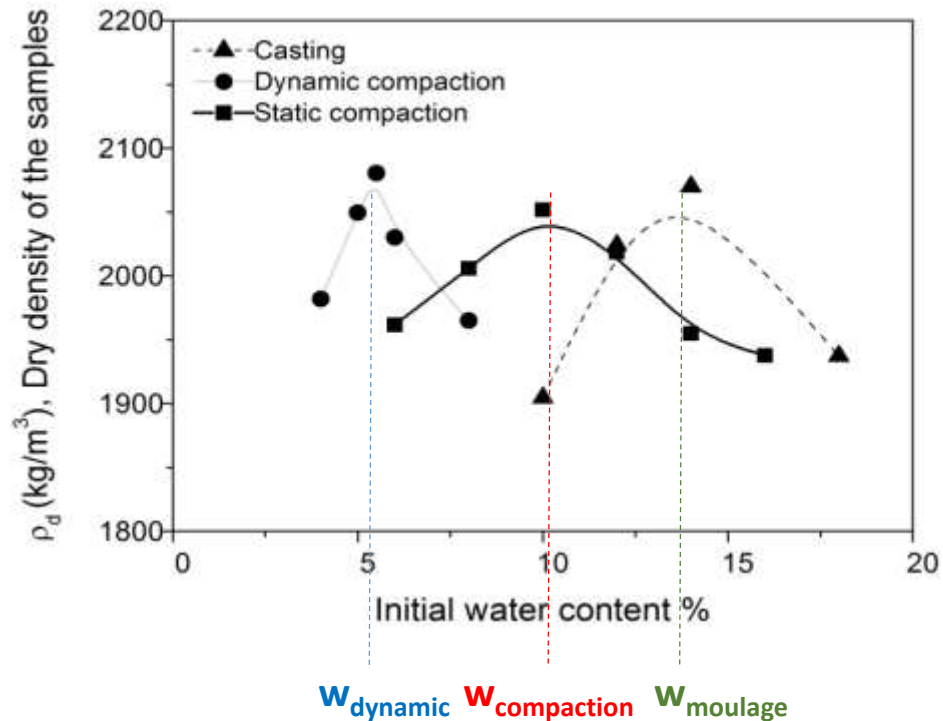
Procédés de mise en œuvre de la Terre

- 4 techniques : compaction, vibro-compaction, moulage et extrusion
- Identifier les techniques permettant d'obtenir les plus fortes densités



Procédés de mise en œuvre de la Terre

- Adapter la consistance du matériau (rhéologie) au procédé
 - Approche empirique : Essai type «Proctor»



En termes d'ingénierie géotechnique :

Moulage : $w\%$ plus faible que la limite de liquidité

Compaction statique : $w\%$ proche de la limite de liquidité

Compaction dynamique : $w\%$ proche de l'optimum proctor

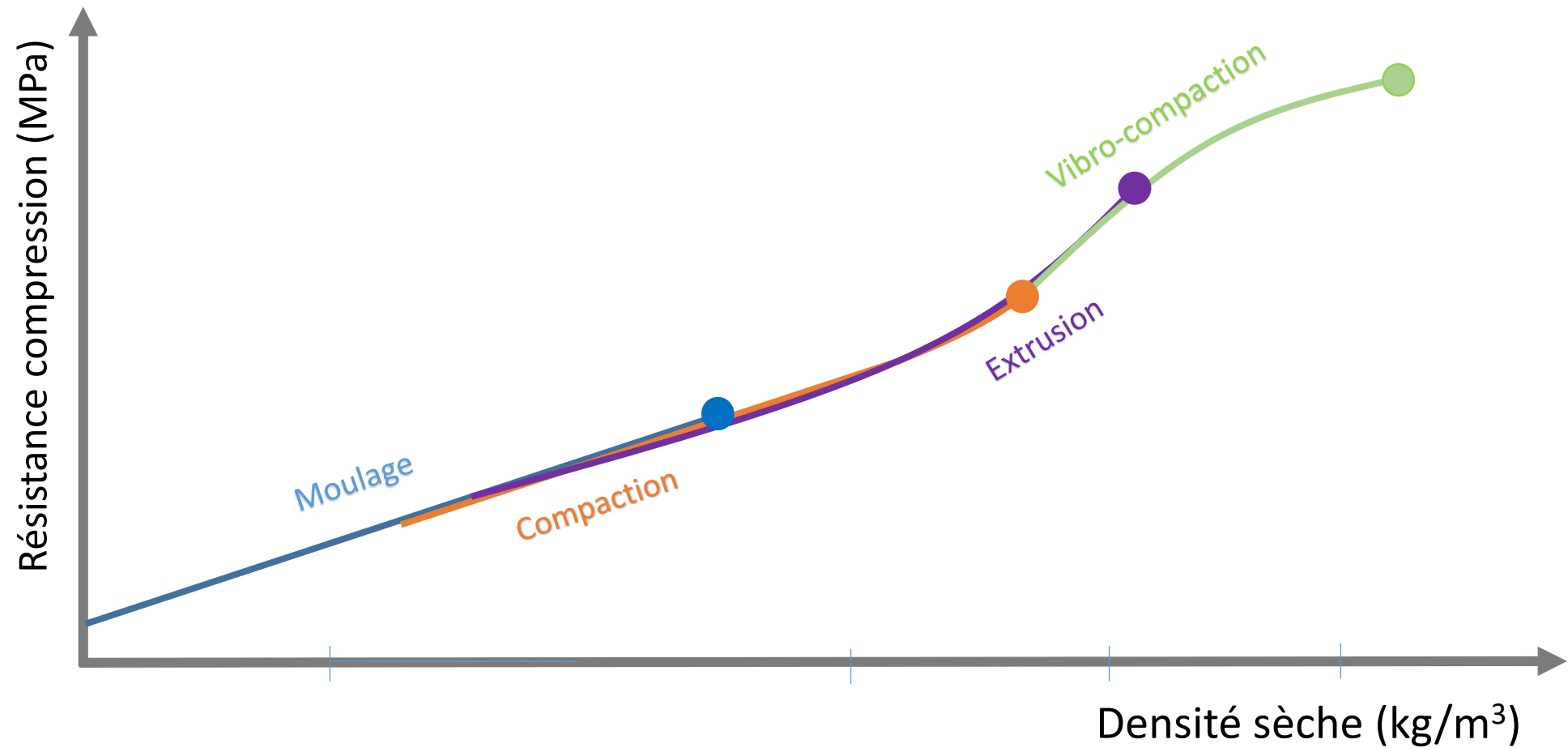
Pour des rhéologues du béton :

Moulage : Seuil de cisaillement proche de 500 Pa

Compaction statique : Seuil de cisaillement supérieur à 10 kPa

Compaction dynamique : Comportement granulaire

Procédés de mise en œuvre de la Terre



Procédés de mise en œuvre de la Terre

- Avantages et inconvénients des procédés
 - Moulage – *béton de terre*
 - ++ très simple
 - - forte teneur en eau: retrait, temps de séchage
 - - résistance limitée
 - Compaction - *BTC*
 - + assez simple (machine de compaction Ok)
 - - résistance assez limitée
 - Vibro-compaction et extrusion
 - - moins facile – (unité de production mobile?)
 - + faible teneur en eau : pas de retrait, faible teneur en eau

Diminuer la teneur en eau initiale
Augmenter la densité sèche

Modifions la rhéologie!



Procédés de mise en œuvre de la Terre

Applications

- Nature minéralogique de **5 terres bretonnes étudiées** :
 - Kaolinite + Chlorite + Illite +/- Smectite (Nord de Rennes) – Terre marron
 - Kaolinite + Illite + Quartz (Ouest de Rennes) – Terre marron clair
 - Kaolinite + Mica + Quartz (Ouest de Lorient) – Terre blanche
 - Kaolinite + Chlorite + Illite + Oxyde de fer (Redon) – Terre rouge
 - Kaolinite + Illite + Quartz (sédiments de la Rance) – Sédiment gris
- Classification géotechnique des sols très différentes :
 - D'une terre « **très active** » : granulométrie fine, grande surface spécifique, valeur au bleu élevée, indice de plasticité élevé... (A₃)
 - A une terre « **insensible** »: teneur en argile faible, faible surface spécifique, faible valeur au bleu, faible indice de plasticité... (B₄)
- **Trouver des stratégies de mise en œuvre les plus efficaces pour chaque type de terre**

Procédés de mise en œuvre de la Terre

Applications

- Cinq matériaux testés

Activité argileuse

Limites d'Atterberg

	W_{LL} (%)	W_{PL} (%)
◦ Terre blanche	32	18
• Terre rouge	36.5	21.8
• Terre marron clair	36.7	20.2
• Terre marron	46.2	29.7
• Sédiments gris	56	36

- Terre blanche
- Terre rouge
- Terre marron clair
- Terre marron
- Sédiments gris

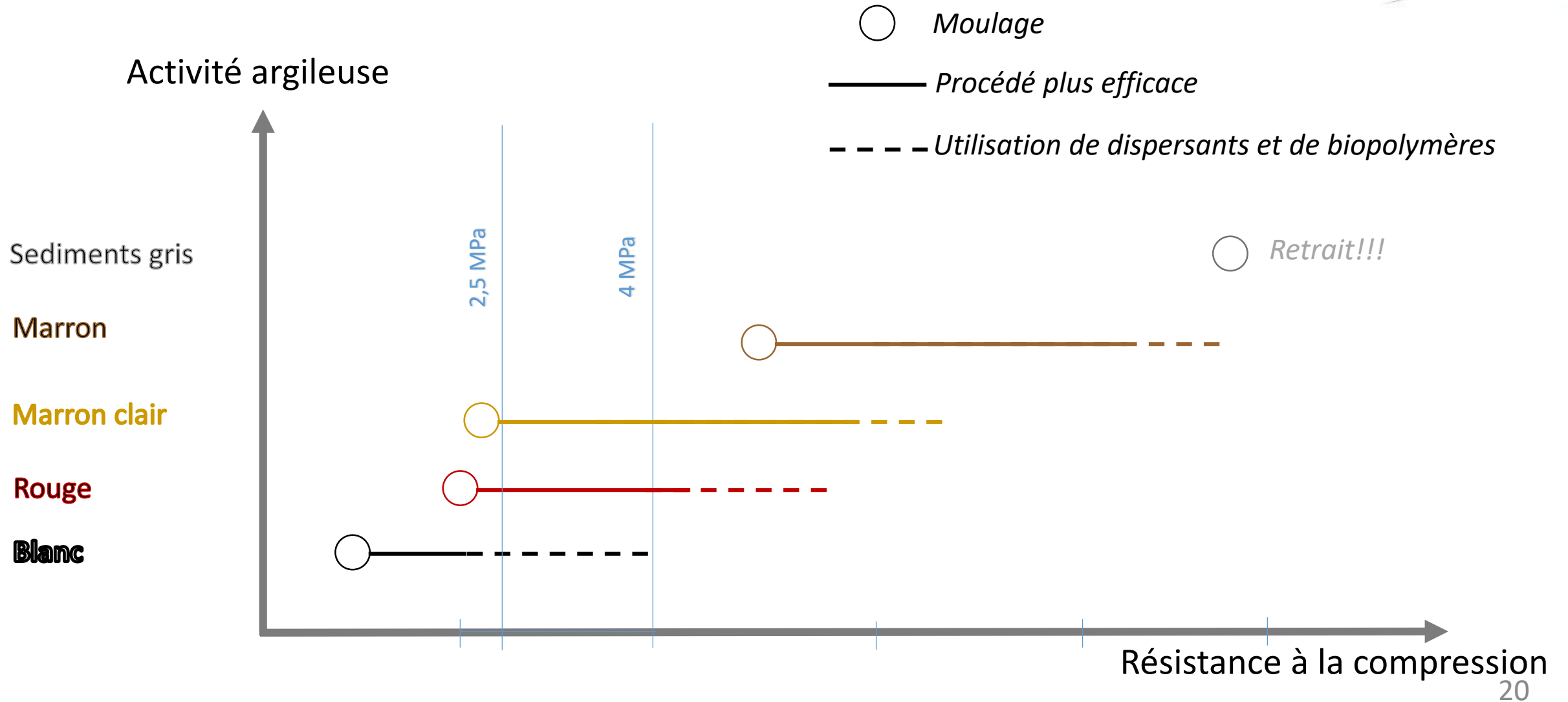


Procédés de mise en œuvre de la Terre

Applications

- *Quelle est la résistance à viser?*
- Résultats d'une descente de charges effectuée
 - Choix d'une résistance minimale à la compression
 - Hypothèses de calcul
 - R+3
 - Plancher bois/mur en terre (20 cm d'épaisseur)
 - Combinaison : Neige + Vent + Exploitation + Poids propre (charges permanentes)
 - Coefficient « matériau » de sécurité : 2
 - Résultats obtenus
 - **Résistance à la compression de 2,5 MPa à viser**

Procédés de mise en œuvre de la Terre

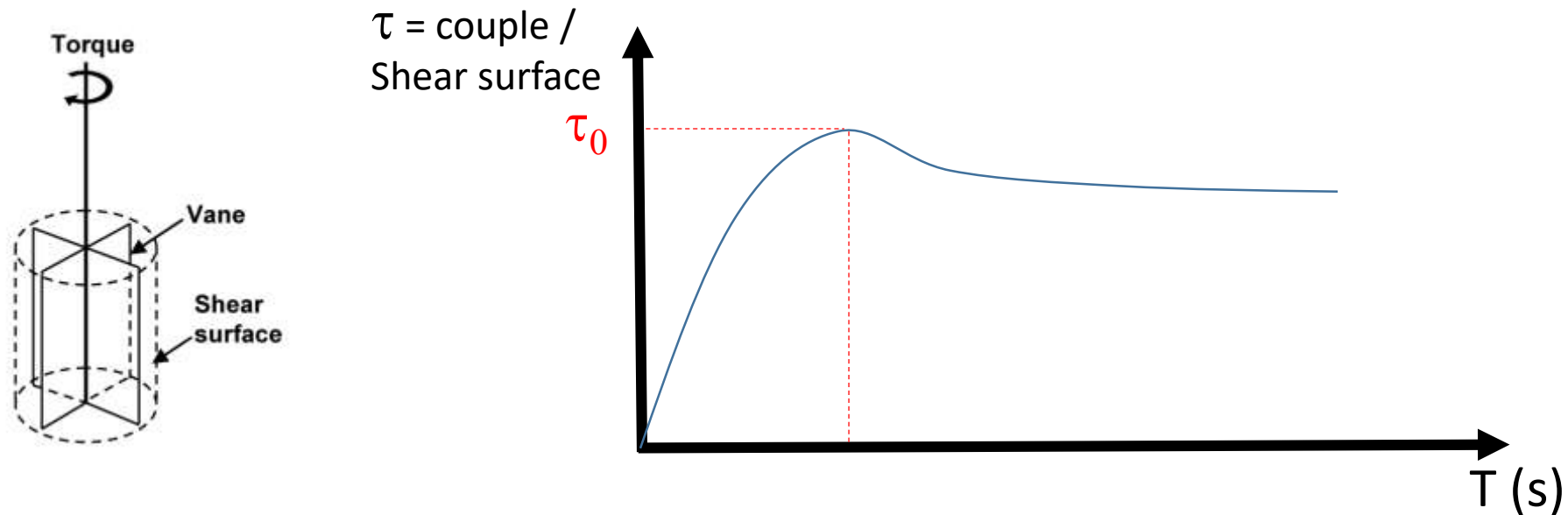


Procédés de mise en œuvre de la Terre

- Stabilisation avec **bio-polymères**
 - Alginate
 - Tanins de châtaigner
 - Extrait de glands de chêne
 - Colle végétale
 - Eaux fermentées de fibres végétales
 - Caséine
 - Huile de Lin
- Ajout de **dispersants** (bio-sourcés ou non) dans la formulation
 - Ajout d'hexamétaphosphate (NaHMP)
 - Ajout de tanins
 - Acide citrique
- **Objectifs : Comprendre les interactions organo-minérales**
 - Influence des ajouts sur la résistance mécanique
 - **Influence des ajouts sur la rhéologie**

Étude rhéologique : *Mesurer la rhéologie*

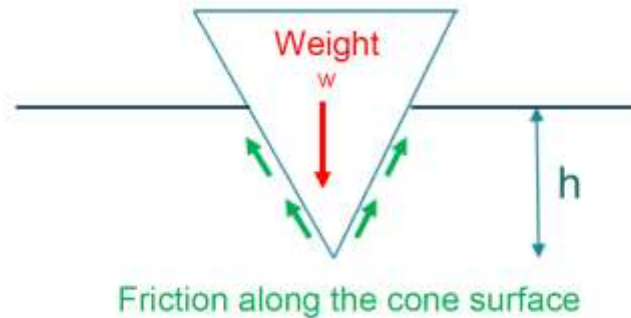
- Les mesures se focalisent sur le seuil de cisaillement
- Mesure de référence : Cisaillement à vitesse lente et constante



- Limites : Portabilité du rhéomètre et couple maximal de mesure.

Étude rhéologique : *Mesurer la rhéologie*

- Développement d'essais rapides de mesure de seuil de cisaillement
- Essai de pénétration au cône



$$\tau_0 = \frac{wg \sin \alpha/2}{\pi \left(h \tan \alpha/2 \right)^2}$$

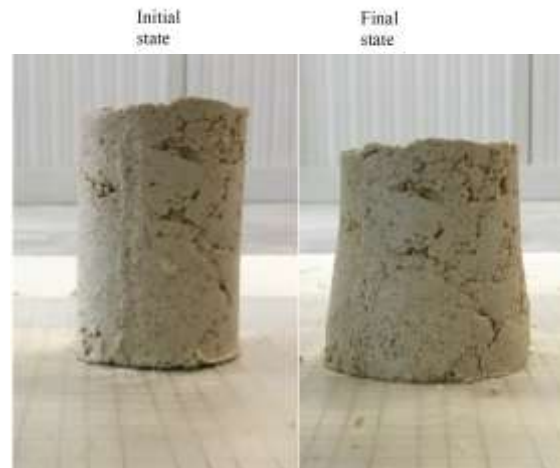
Limite d'Atterberg – détermination au cône

Limite de liquidité : $h = 20 \text{ mm}$ ($\tau_0 = 2 \text{ kPa}$)

Limite de plasticité : $h = 2 \text{ mm}$ ($\tau_0 = 200 \text{ kPa}$)

Étude rhéologique : *Mesurer la rhéologie*

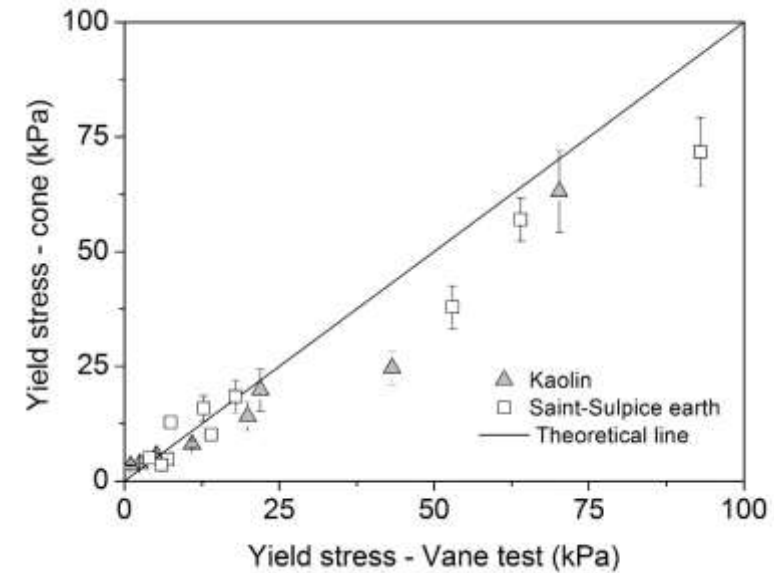
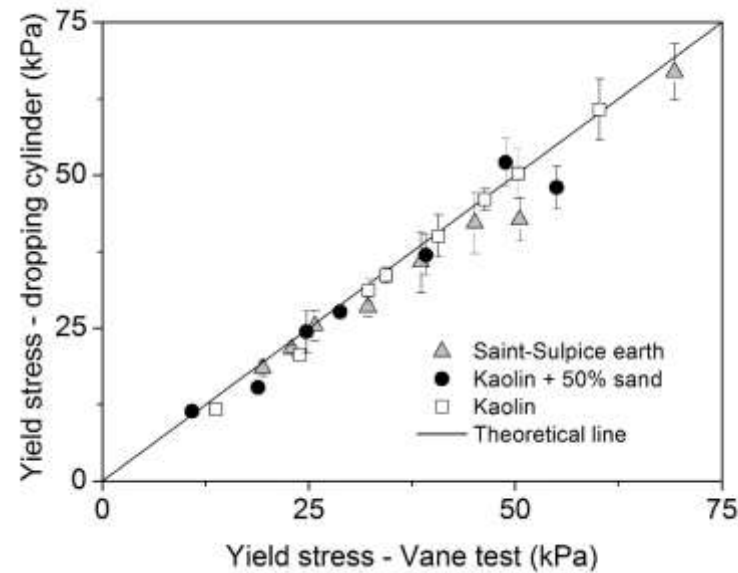
- Développement d'essais rapides de mesures de seuil de cisaillement
- Essais de chute de cylindre (Mélange entre un cône d'Abrams – béton et l'essai à la boule - bauge)



$$\tau_0 = \frac{\rho gh(L - X)}{\sqrt{3}(L - L_1)\ln(L/X)}$$

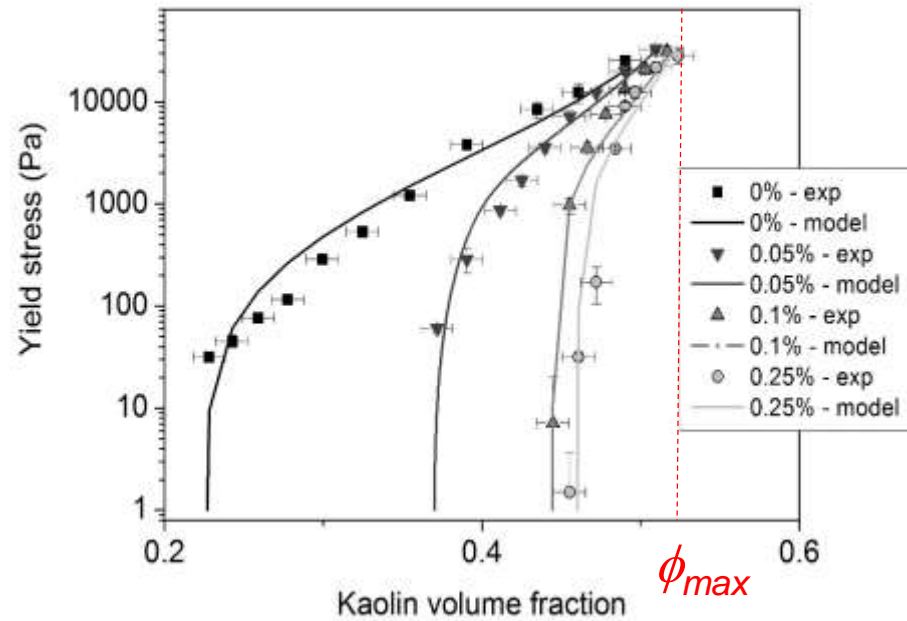
Étude rhéologique : *Mesurer la rhéologie*

- Développement d'essais rapides de mesures de seuil de cisaillement



Étude rhéologique : *Effet des dispersants*

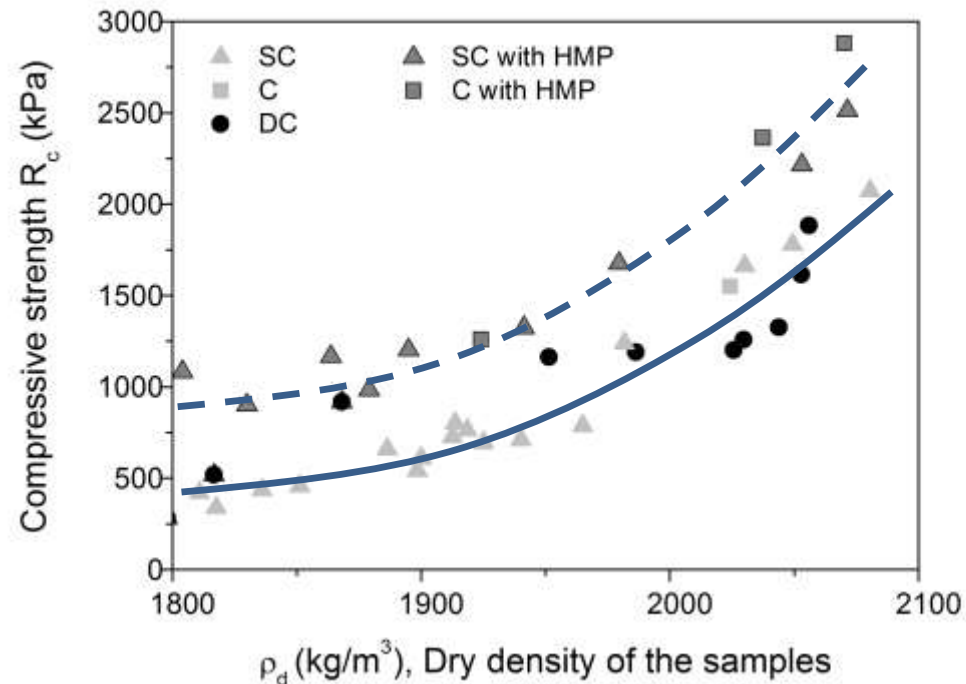
- Dispersant référence : *Hexametaphosphate de sodium NaHMP*
 - Effets sur le seuil du cisaillement



HMP dosage (%)	0	0.05	0.1	0.25	0.5
W_{LL} (%)	65.1	55.4	50.9	43.0	40.3
W_{pL} (%)	28.3	25.9	28.4	35.5	34.9
I_p (%)	39.7	29.5	22.5	7.5	5.4

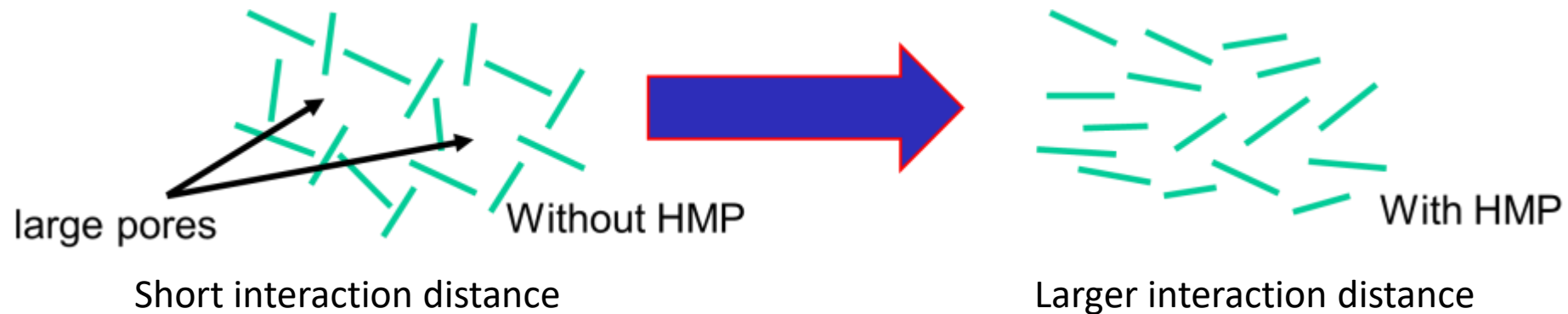
Étude rhéologique – Effet des dispersants

- Effet du NaHMP sur la résistance à la compression :



Étude rhéologique – Effet des dispersants

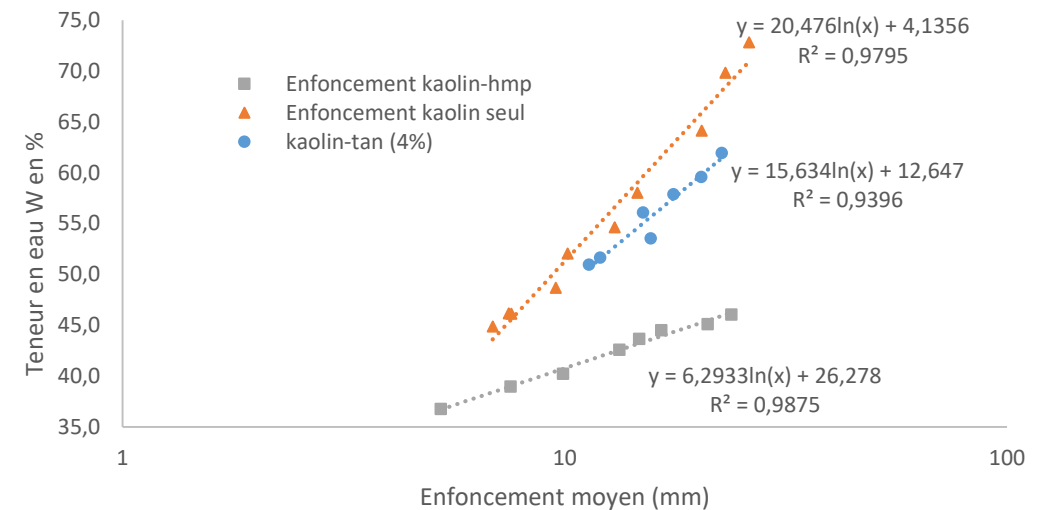
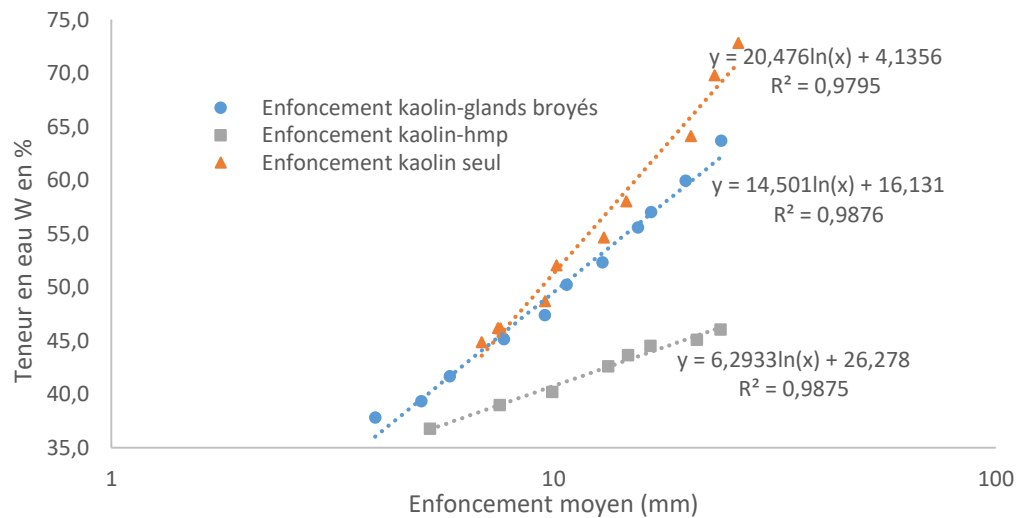
- Effet du NaHMP sur le seuil de cisaillement
 - Mécanismes : Répulsion électrostatique (changement de la charge positive sur les bords des plaquettes d'argile)



- Réaction avec les cations du fluide poral??
 - Peut-être – A étudier de prêt...
- Pas d'effet proche de la fraction volumique solide maximale
 - Mobilité spatiale empêchée par l'encombrement

Étude rhéologique – Effet des dispersants

- Mesures de la profondeur d'enfoncement au cône



Étude rhéologique – Effet des dispersants

- Mesures de la profondeur d'enfoncement au cône

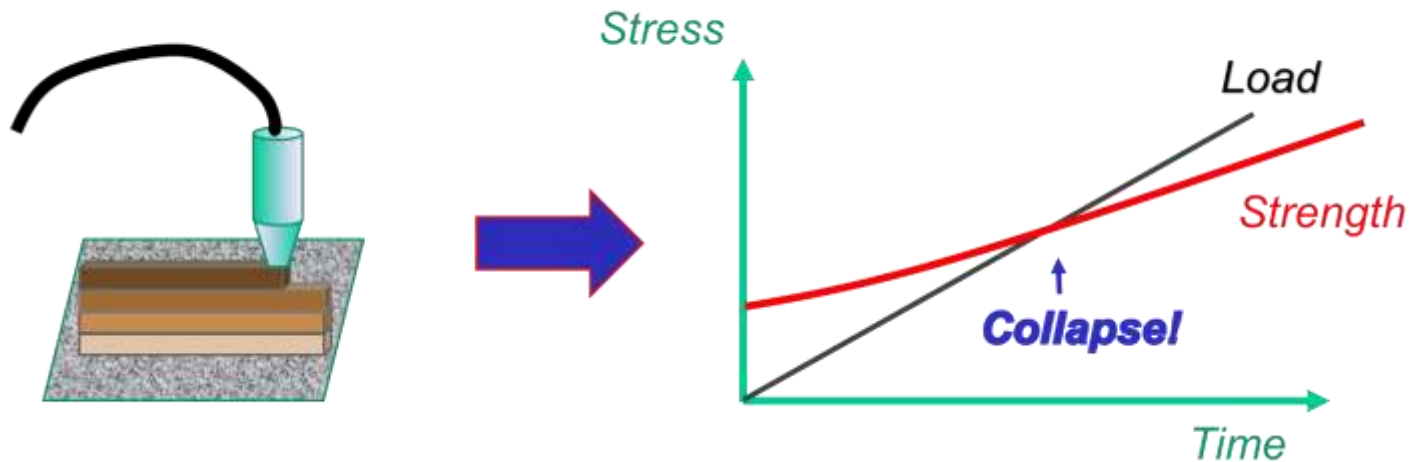
Formulation	Limite de liquidité estimée W_{LL} (%)
kaolin-colle végétale	89,4
Kaolin-paille	66,4
kaolin seul	65,5
Kaolin-alg	62,7
Kaolin-Solution OSE 75g/l	62,4
kaolin-foin	61,6
kaolin glands broyés OSE	59,6
kaolin-tanins	59,5
kaolin NaHMP	45,1

Formulation	Limite de liquidité estimée W_{LL} (%)
Terre rouge seule	36,5
Terre rouge - glands broyés OSE	32,7
Redon-tanins	27,8
Redon hmp	22,2

- Identifier et quantifier le rôle des ajouts
 - Fluidifiant? Résistances à courts termes (prise)? Résistances à longs termes?

Impression 3D de Terre

- Impression 3D de Terre par extrusion/dépôt
 - Gradient de **résistance** (âge des couches)
 - Augmentation de la **charge**



• **Séchage lent ≠ Impression rapide**

- Quel type d'ajout peut aider à accélérer l'augmentation des résistances?

Impression 3D de Terre

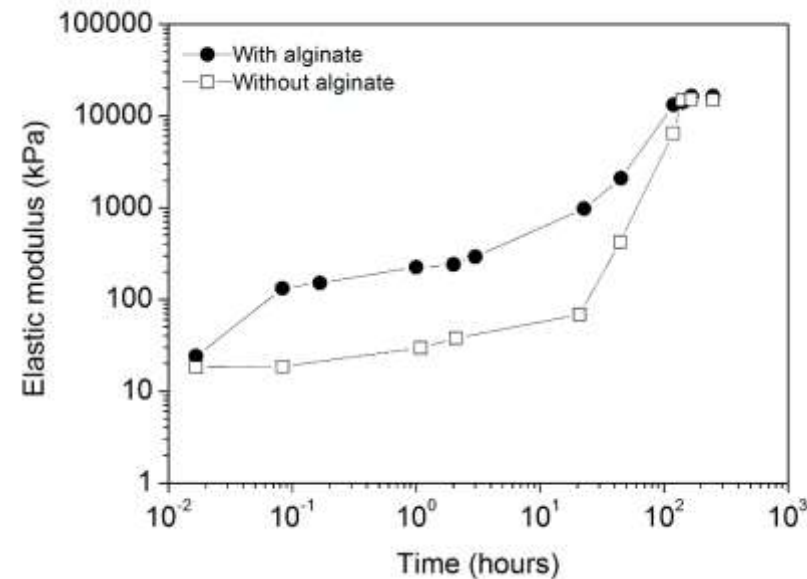
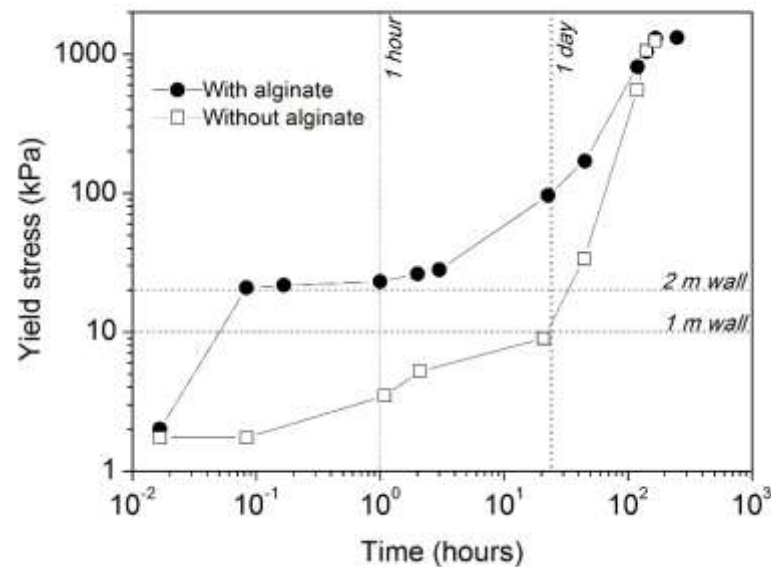
- Terre utilisée
 - Terre marron du nord de Rennes
 - Tamisée à 2 mm (corps de pompe)
- Objectif 1 : assurer la pompabilité
 - Addition de NaHMP: seuil de cisaillement plus faible
 - Pompabilité / Diminution de w%: séchage plus rapide, résistance plus forte
 - $W_{\text{impression}} = 45\%$ - seuil de cisaillement mesuré 1,5 kPa

Impression 3D de Terre

- Objectif 2 : assurer la stabilité / accélérer la vitesse d'impression

Addition d'alginate : simuler un effet de prise

- Formation progressive d'un hydrogel / Accélération de la prise



Impression 3D de Terre



Résistance à la compression : 2 MPa

Merci

