



Construction terre – Comportement et mise en oeuvre

Arnaud Perrot, Université de Bretagne Sud

Plan de la présentation

- Comportement mécanique de la terre crue
- Comment mesurer la résistance de la terre crue?
- Le rôle du procédé pour acquérir de bonnes résistances
- Comment prédire les résistances mécaniques de la terre crue

Comportement mécanique de la terre crue

Comportement mécanique de la terre crue

- Échelle du matériau étudié
 - Niveau de résistances et de rigidité
 - Dépendance du comportement à l'environnement
 - Question du passage à la structure?

Qu'attendre de la terre crue?

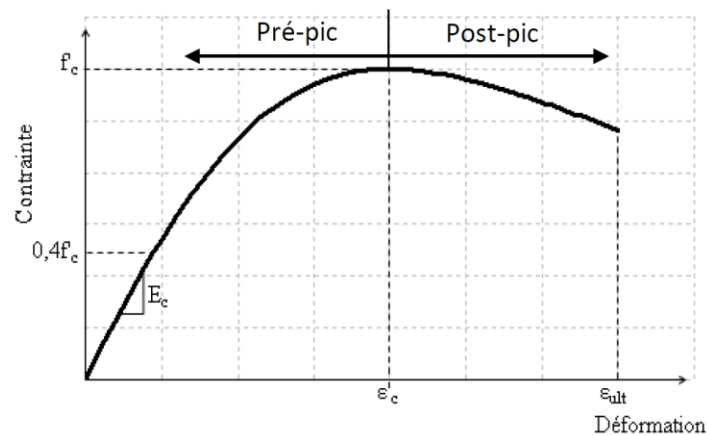
- Niveau de résistance mécanique à la compression R_c :
 - **1 à 8 MPa** (Béton 30 à 200 MPa – Parpaing 4 MPa)
- Niveau de rigidité (module élastique) E :
 - **100 MPa à 1 GPa** (Béton 20 à 100 GPa)
- Rapport R_c/E :
 - **Terre crue : 10^{-2}**
 - **Béton : 10^{-3}**



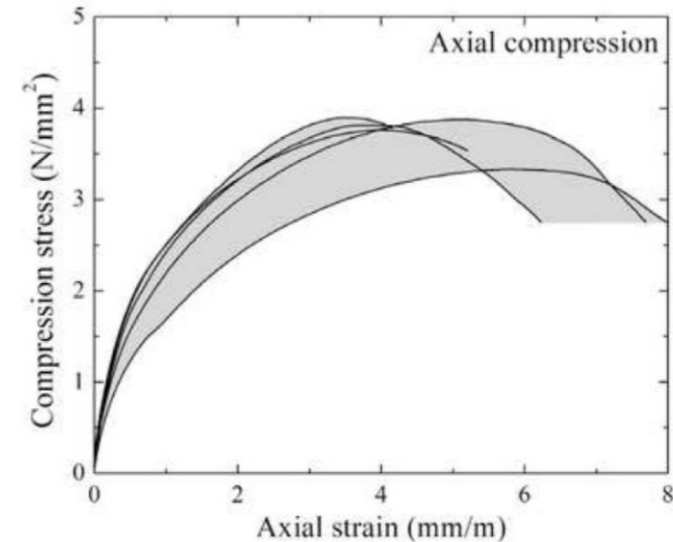
Implication sur l'état limite dimensionnant

Qu'attendre de la terre crue?

- Type de comportement en compression :



Courbe classique pour le béton
Déformation au pic : 10^{-3}

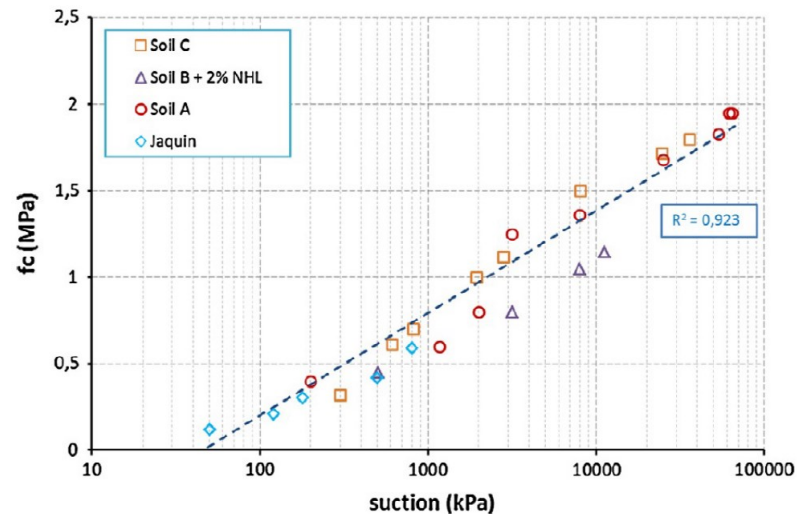


Courbes classiques pour la terre
Déformation au pic : $5 \cdot 10^{-3}$
(Fig: Miccoli et al. 2015)

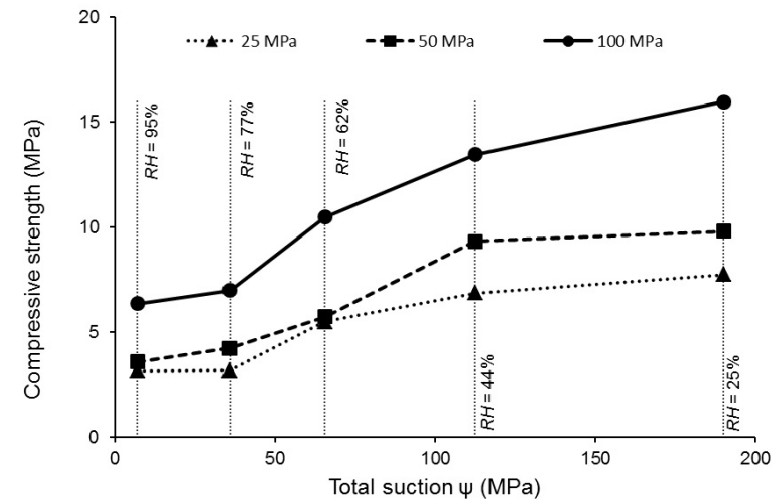
- Comportement fragile (un peu plus ductile que le béton)

Paramètres influents sur le comportement

- Importance de l'environnement et de la teneur en eau du matériau :
 - **Rôle de la succion capillaire** imposée par un équilibre avec les conditions extérieures



Thèse P. Chauhan - 2020

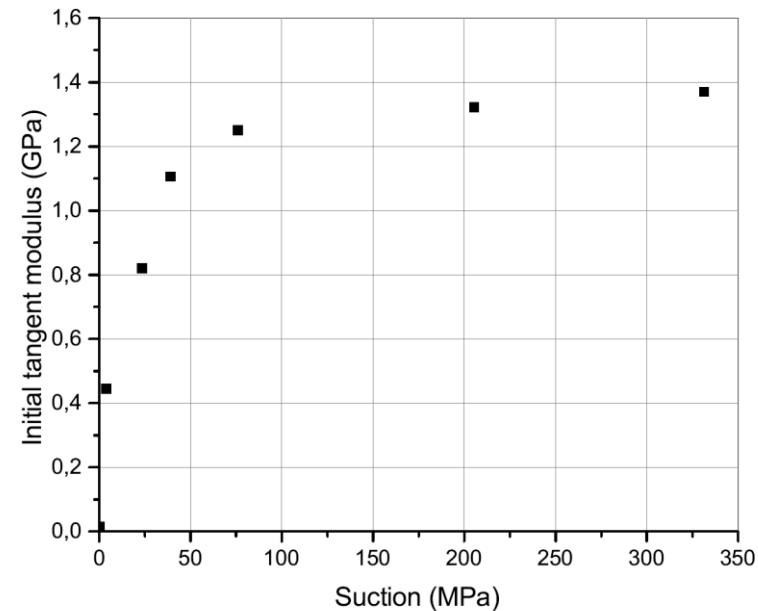
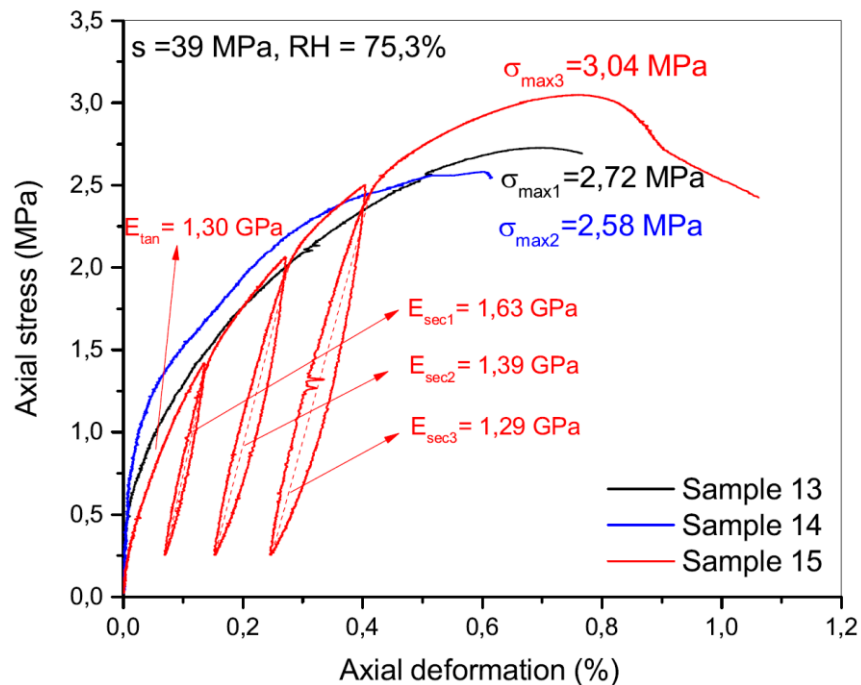


Bruno et al. - 2017

Les résistances peuvent doubler l'été par rapport à l'hiver.

Paramètres influents sur le comportement

- Importance de l'environnement et de la teneur en eau du matériau :
 - Prise d'eau par l'échantillon : diminution de la succion capillaire



Passage du matériau à la structure

- Murs monolithiques (bauge, pisé) :
 - Mise en évidence d'un volume élémentaire représentatif
 - Taille maximale des grains
 - Taille des éléments de structure
- Murs Maçonnés (BTC, adobe) :
 - Mise en évidence d'un volume élémentaire représentatif
 - Taille et forme des briques
 - Rôle des interfaces et du système d'assemblage (à sec, avec mortier, ...)

Passage du matériau à la structure



Crédit D. Ardant



Mesure de la résistance et de la rigidité à la compression de la terre crue

Comportement mécanique de la terre crue

- La terre un matériau à 45 MPa de résistance à la compression!
- Influence de l'élançement / Vitesse de chargement
- Préconisations
- Autres caractéristiques mécaniques intéressantes

Impact du protocole de mesure

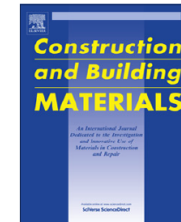
Construction and Building Materials 47 (2013) 366–369



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat



Technical Note

An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa!



J.E. Aubert^{a,*}, A. Fabbri^b, J.C. Morel^b, P. Maillard^c

^a Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135 avenue de Rangueil, F-31 077 Toulouse cedex 4, France

^b Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, UMR 5513 CNRS, Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LGCB), Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Université de Lyon, Rue Maurice Audin, 69518 Vaulx en Velin cedex, France

^c Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC), Service Céramique R&D, Ester Technopole, 87069 Limoges Cedex, France

H I G H L I G H T S

- The compressive strength measured for an earth block was higher than 45 MPa.
- The direct measurement of the compressive strength on adobe plates is aberrant.
- Compressive strength tests on adobe plates are comparable to oedometric tests.

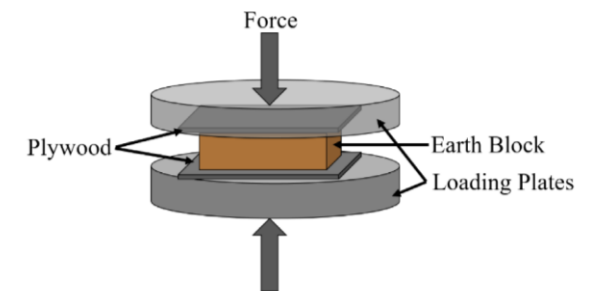
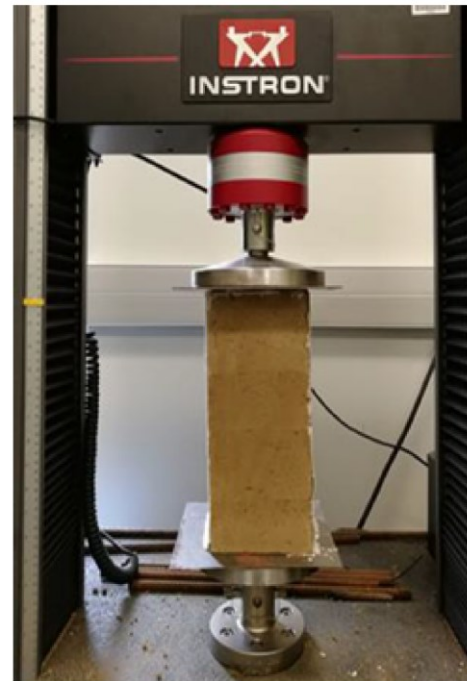
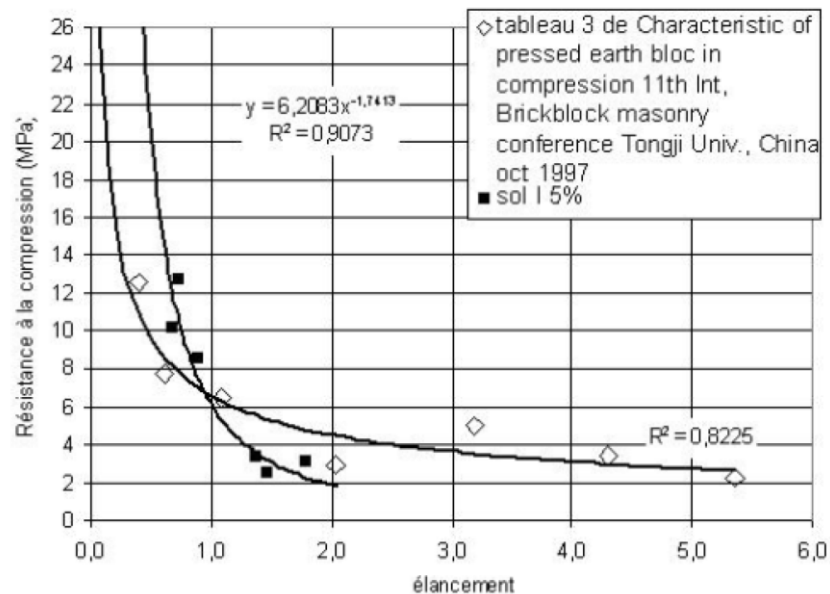
Fabbri, A., Morel, J. C., Aubert, J. E., Bui, Q. B., Gallipoli, D., & Reddy, B. V. (Eds.). (2021). *Testing and Characterisation of Earth-Based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE.*

Influence de l'élançement sur la mesure

- Importance de l'élançement de l'éprouvette
 - Parallèle avec le béton : Classe de résistance C30/37
 - 30 MPa – Essai sur cylindre / élançement 2
 - 37 MPa – Essai sur cub / élançement 1
 - Beaucoup de géométries possibles pour la terre crue
 - Élançement choisi :
 - Éprouvettes coulées / fabriquées : Pisé / Bauge
 - Élançement subi :
 - Essais direct sur géométrie de briques : adobe / BTC

Influence de l'élancement sur la mesure

- Importance de l'élancement de l'éprouvette



Correction de forme Ok pour élancement entre 1 et 2

Influence de la vitesse de chargement

- Afin d'éviter les effets dynamiques ou inertiels ou effectuer un essai de consolidation à vitesse lente, il est nécessaire de choisir une vitesse de chargement adaptée :
 - Vitesse de chargement : 1 à 5 mm/min
 - Vitesse de déplacement : 5 à 10 MPa/min

Documents Australiens et Néo-Zélandais :

Walker P (2002): The Australian earth building handbook, HB 195-2002, Sidney, Australia

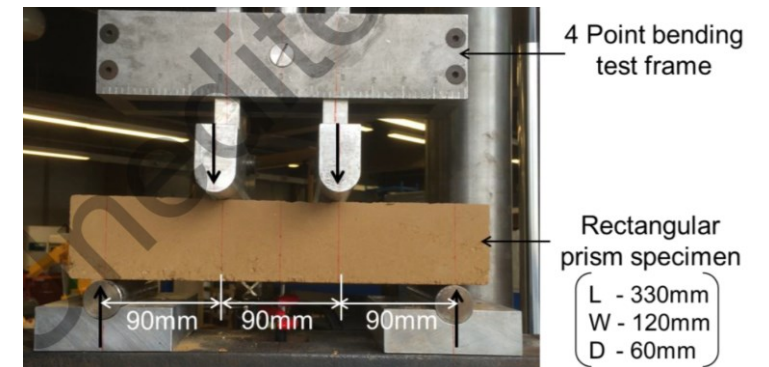
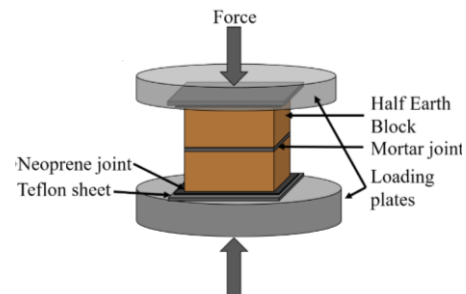
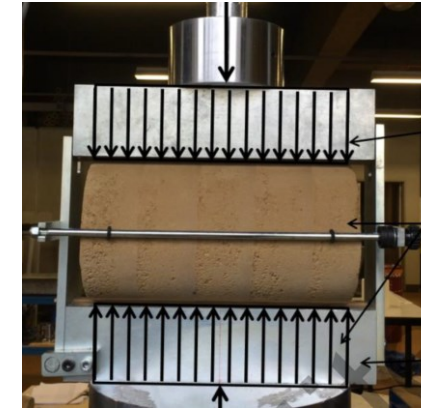
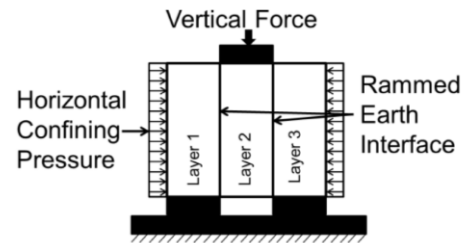
NZS 4298:1998 Materials and workmanship for earth buildings. Standard New Zealand (SNZ), Wellington, New-Zeland

Préconisations pour études mécaniques

- Forme des éprouvettes = Cylindriques ou prismatiques
- Surfaces des éprouvettes = rectifiées ou mises en place d'une couche de matériaux souples pour récupérer les défauts de planéité et parallélisme
- Élancement entre 1 et 2
- Vitesse de chargement entre 1 et 5 mm/min
- Maîtriser les conditions de stockage et l'environnement

Autres paramètres mécaniques

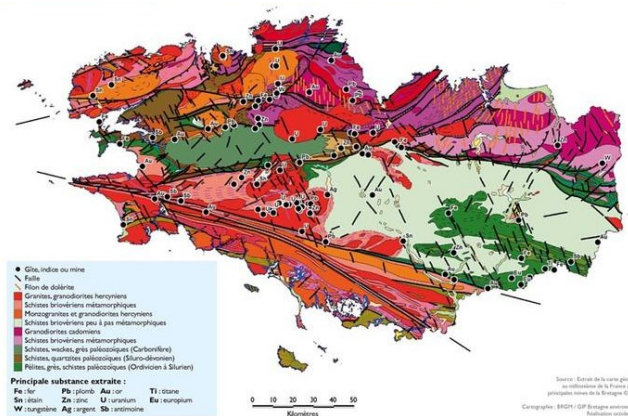
- Résistance à la traction
- Résistance au cisaillement
- Résistance à la flexion
- Essai sur assemblage



Optimisation du procédé pour
viser des résistances maximales

Contexte construire avec 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 : *Applications en structure?*

- *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**

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 praticiens de la terre)

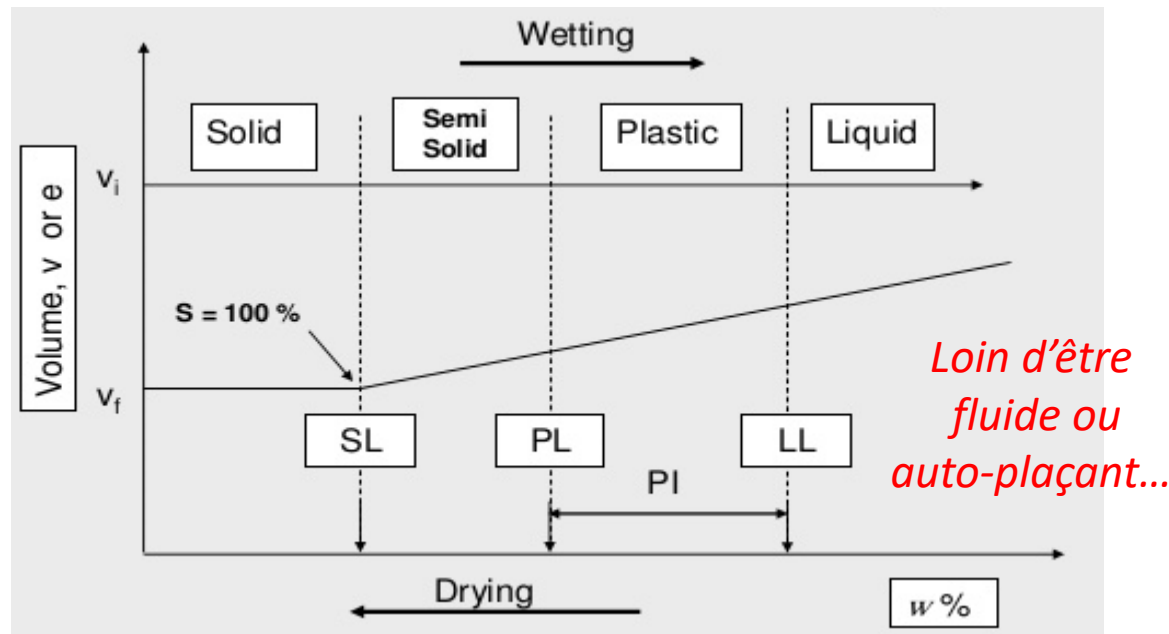
**Facilité la mise en forme /
Obtenir des densités plus fortes**

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



Comportement granulaire

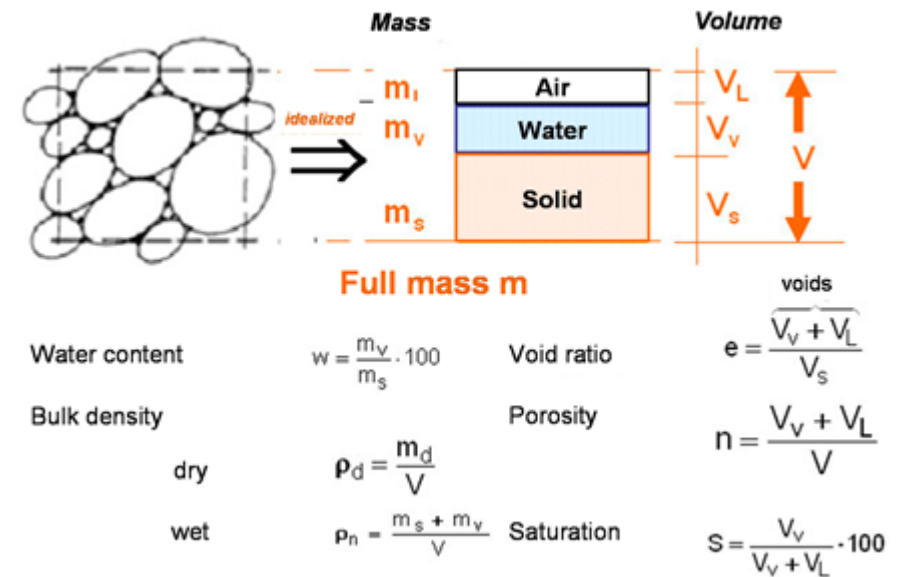
Comportement pâteux

Comportement de Suspensions concentrées

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

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

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

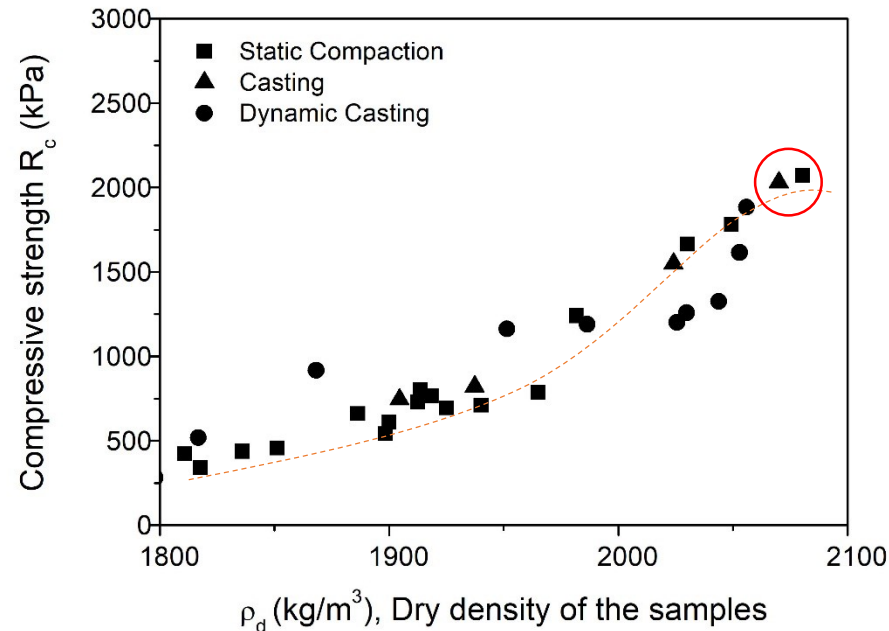


Fraction volumique solide = $1 - n$

Définition « argile »??

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

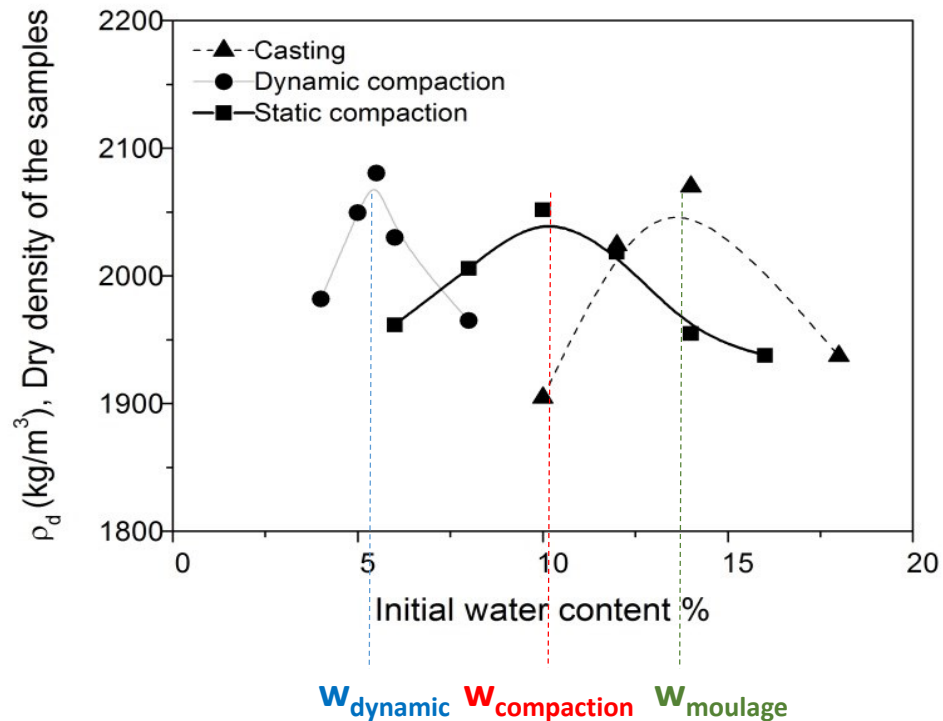


Thèse : S. Guihéneuf



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

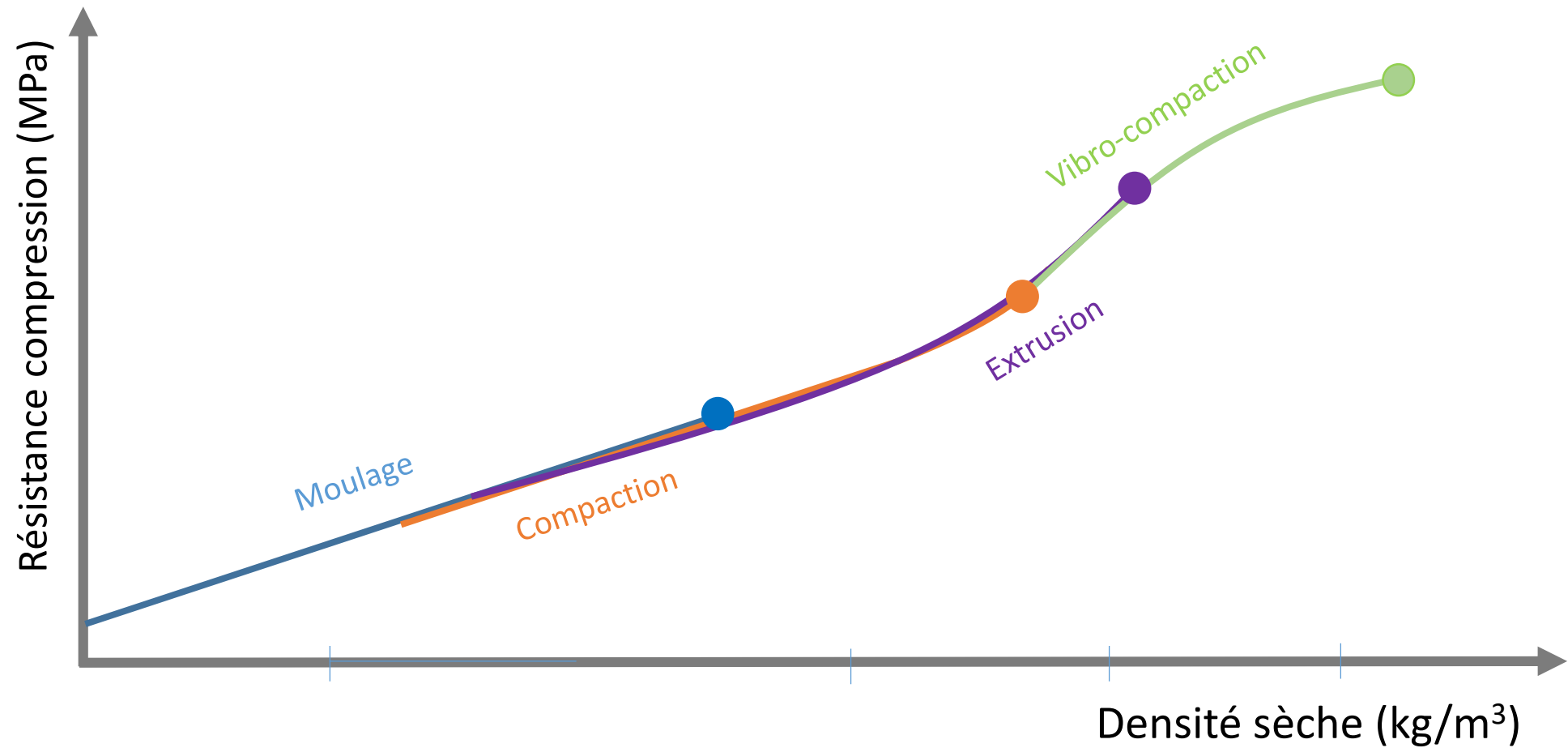
Pour des rhéologues du béton :

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

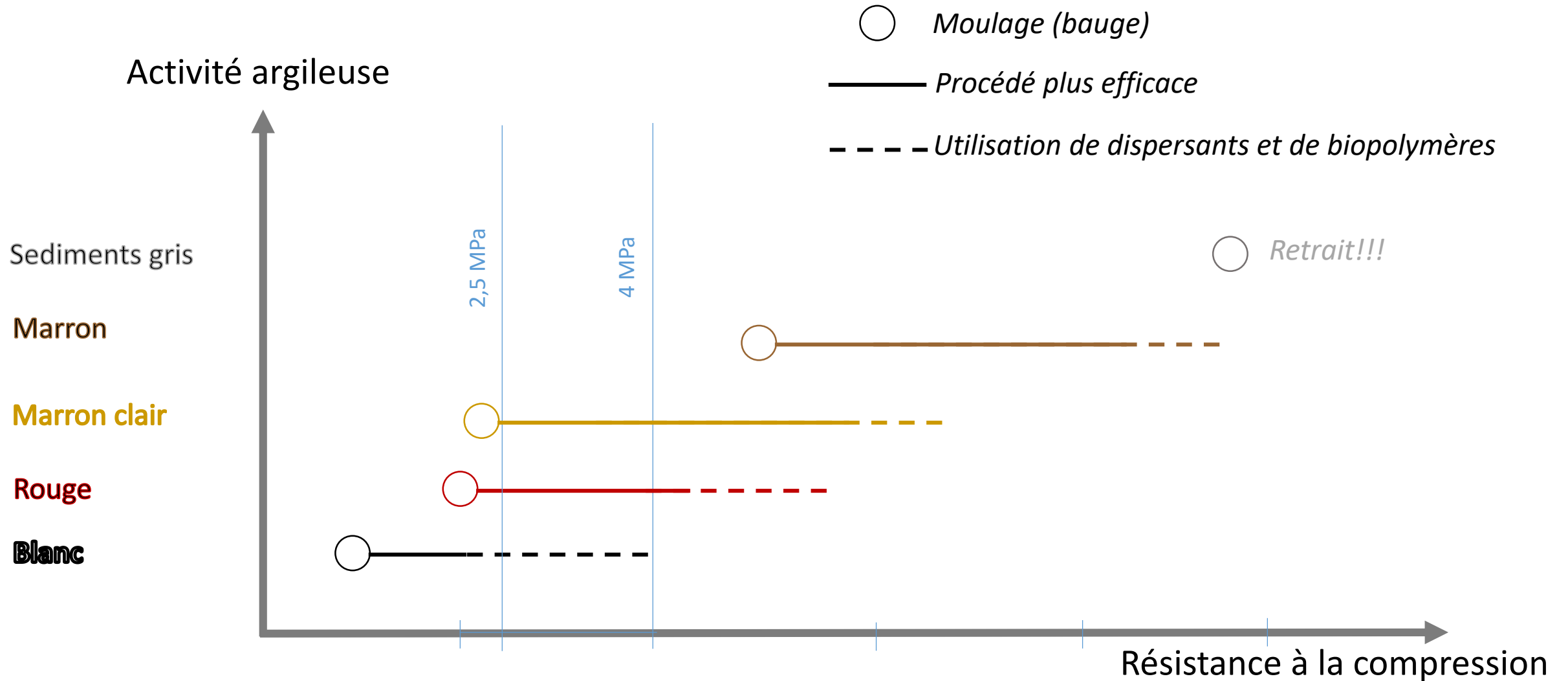
Limites d'Atterberg

	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

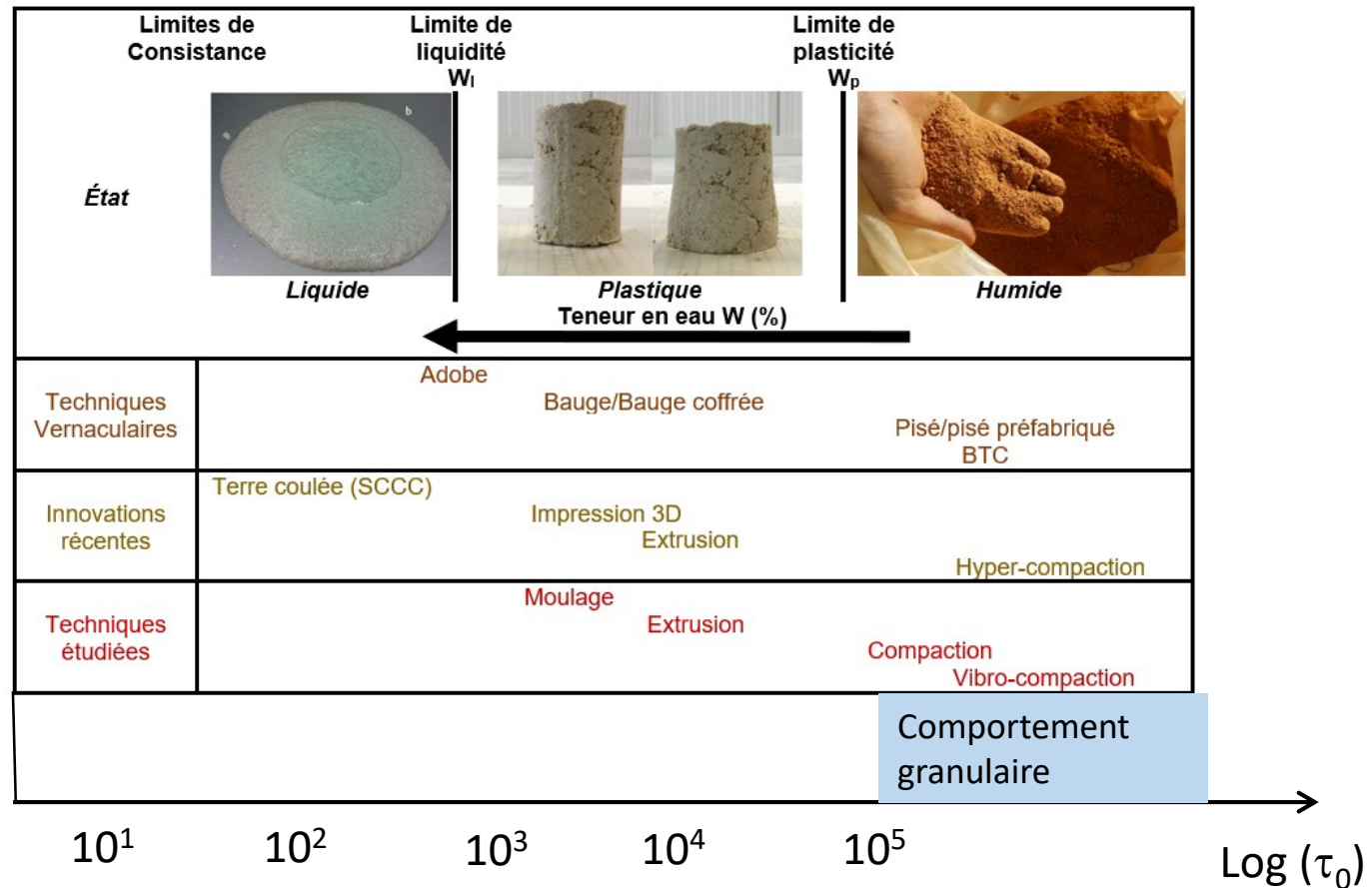


Procédés de mise en œuvre de la Terre



Procédés de mise en œuvre de la Terre

- Lien entre procédés et rhéologie :

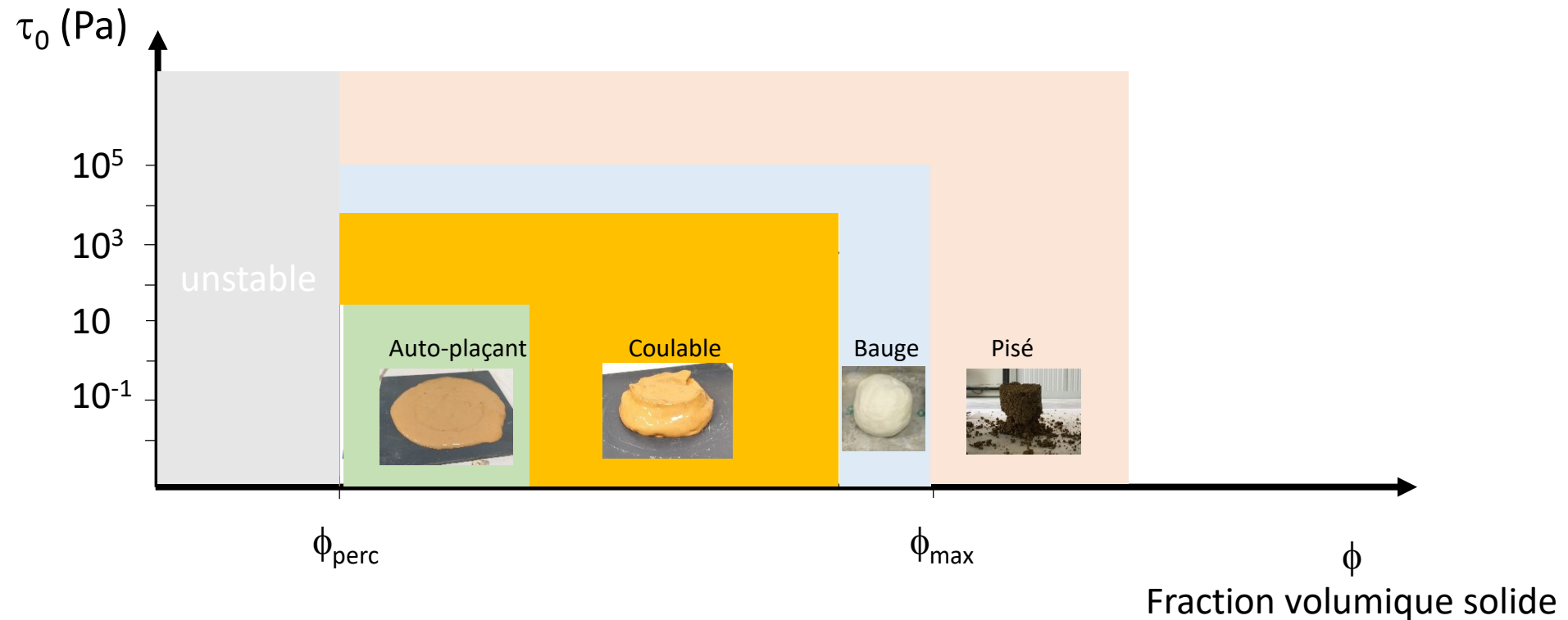


Procédés de mise en œuvre de la Terre

Lien entre formulation et seuil de cisaillement

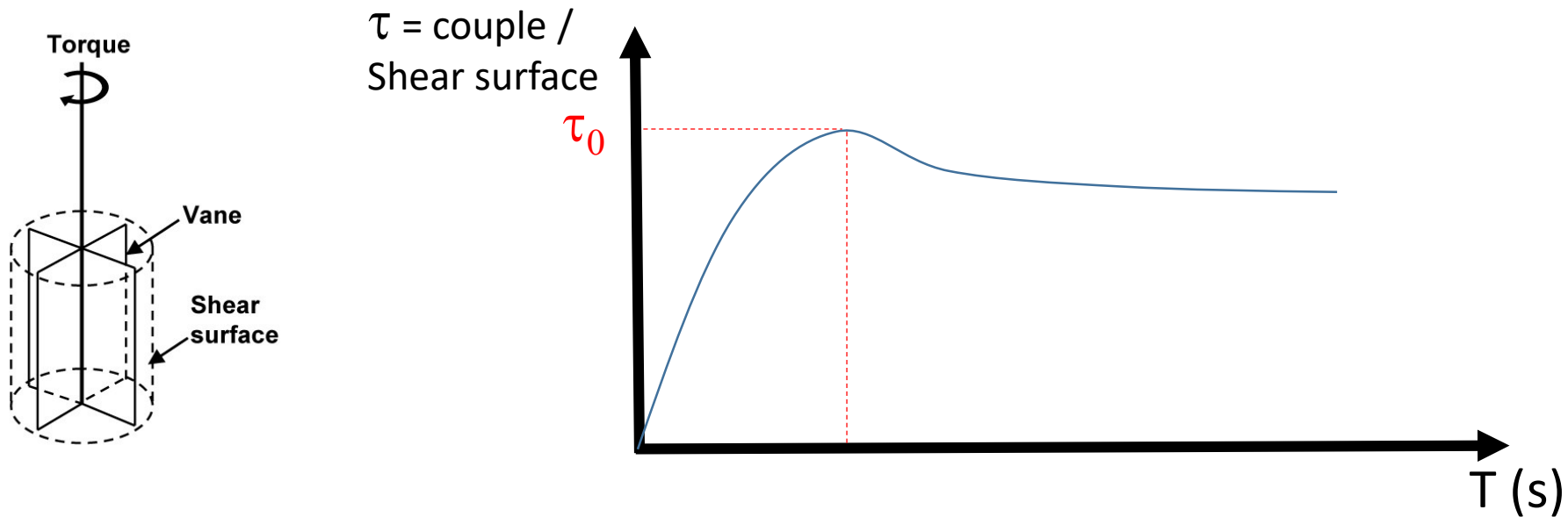
$$w = m_w/m_s$$

$$\phi = V_s/V_{\text{sample}}$$



Étude rhéologique : *Mesurer la rhéologie*

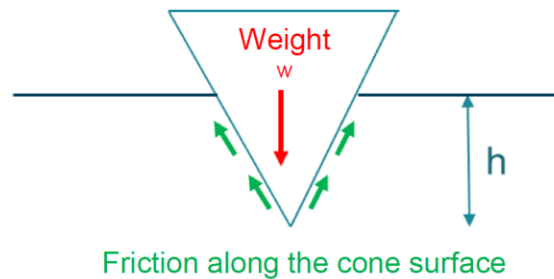
- Les mesures se focalisent sur le seuil de cisaillement
- Mesure de référence : Cisaillement à vitesse lente et constante



- 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 : $h = 2 \text{ mm}$ ($\tau_0 = 200 \text{ kPa}$)

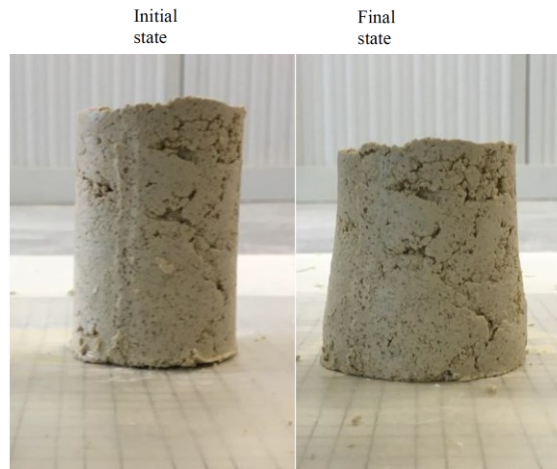
- Affaissement / Étalement

Roussel, N., & Coussot, P. (2005). "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow. *Journal of rheology*, 49(3), 705-718.



Étude rhéologique : *Mesurer la rhéologie*

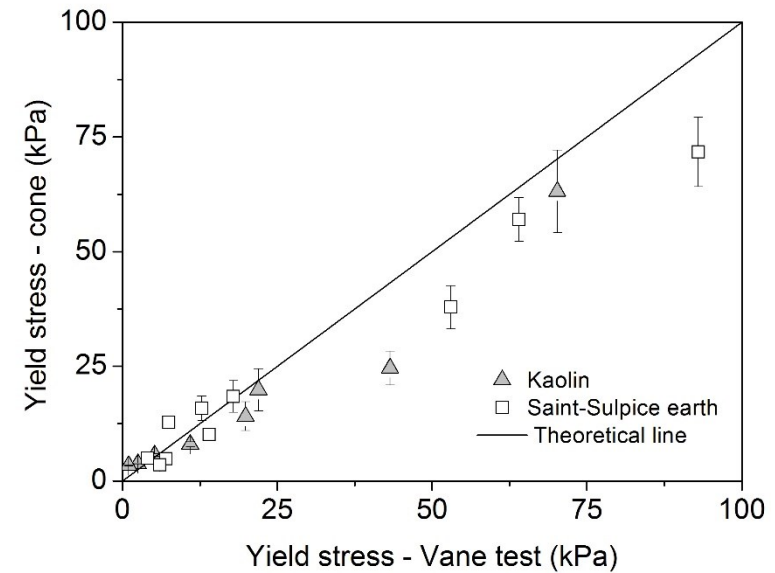
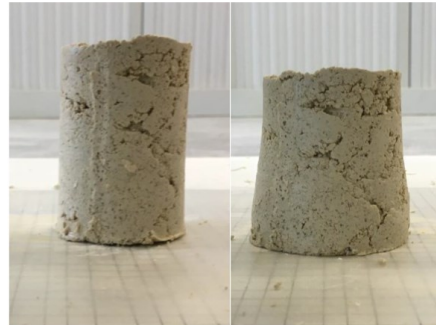
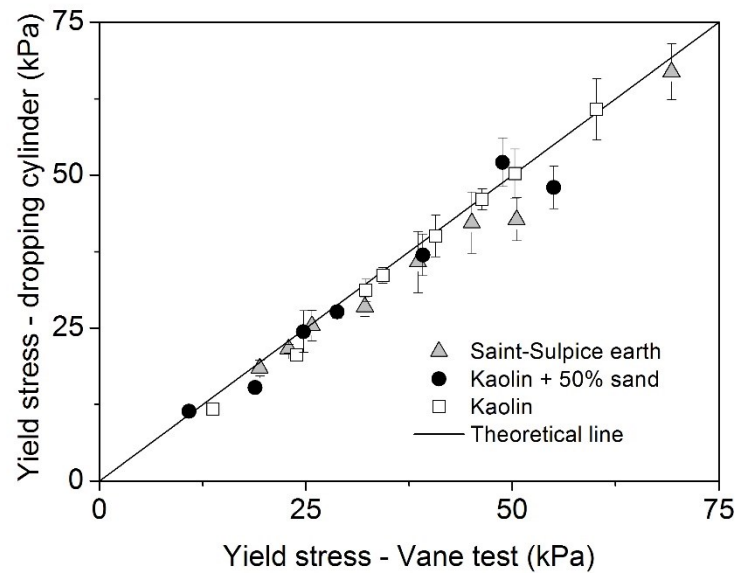
- Développement d'essais rapides de mesures de seuil de cisaillement
- Essais de chute de cylindre (Mélange entre un cône d'Abrams – béton et l'essai à la boule - bauge)



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

Étude rhéologique : *Mesurer la rhéologie*

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

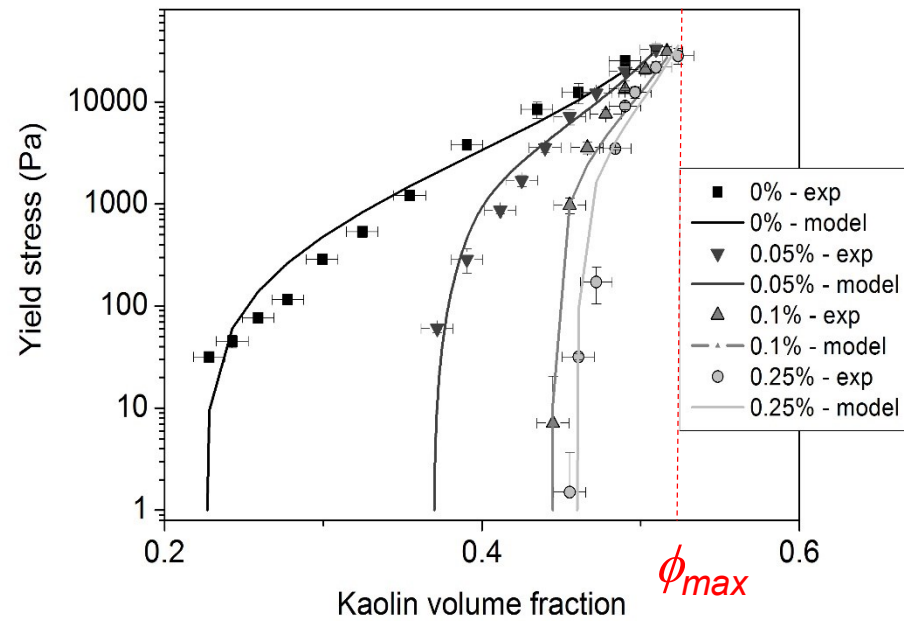


Améliorer la mise en œuvre de la Terre

- 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 : Maîtriser les interactions entre ajout et argile**
 - Influence des ajouts sur la résistance mécanique
 - **Influence des ajouts sur la rhéologie**

Étude rhéologique : *Effet des dispersants*

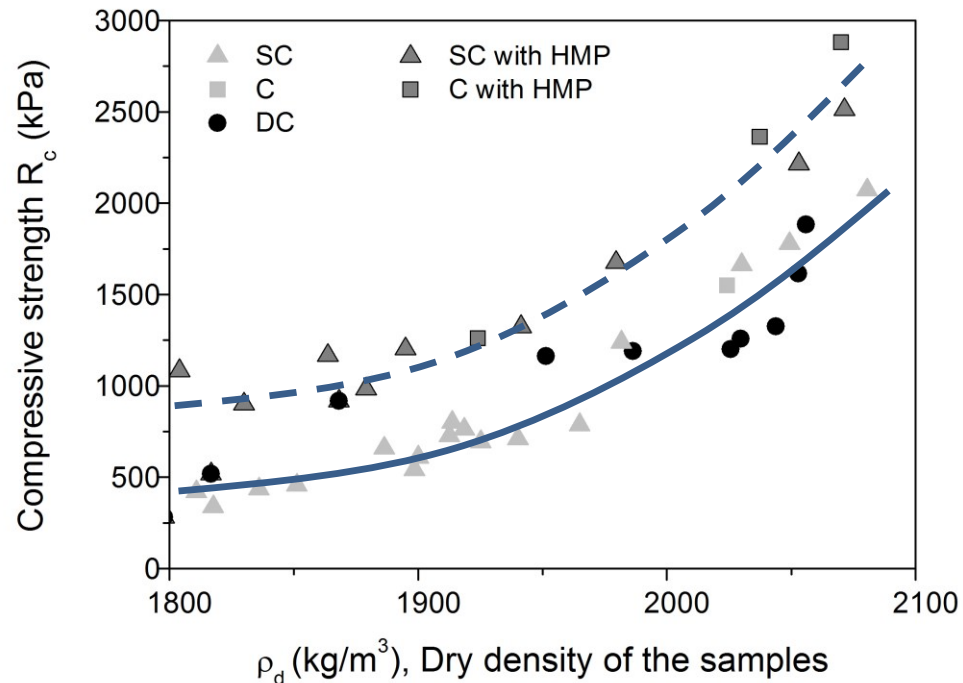
- Dispersant référence : *Hexametaphosphate de sodium NaHMP*
 - Effets sur le seuil du cisaillement



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

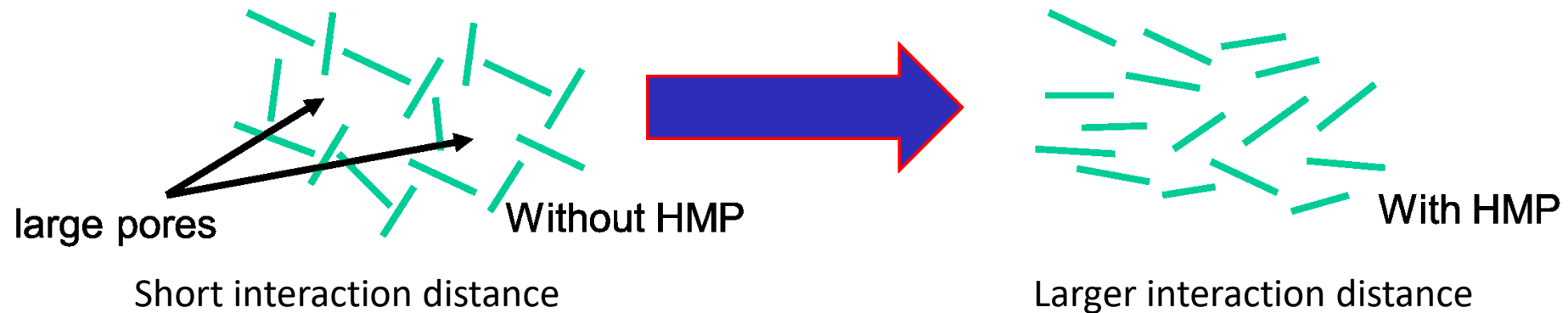
Étude rhéologique – Effet des dispersants

- Effet du NaHMP sur la résistance à la compression :



Étude rhéologique – Effet des dispersants

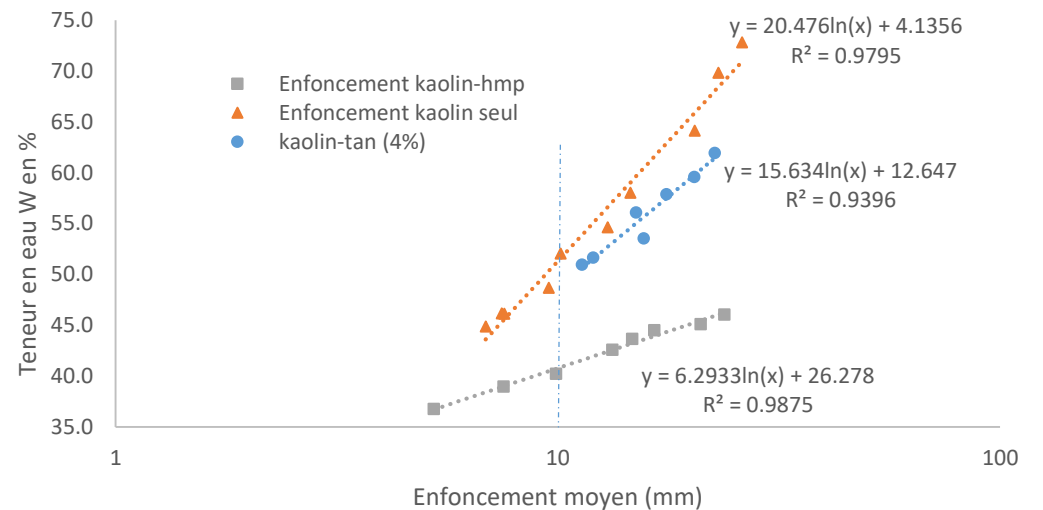
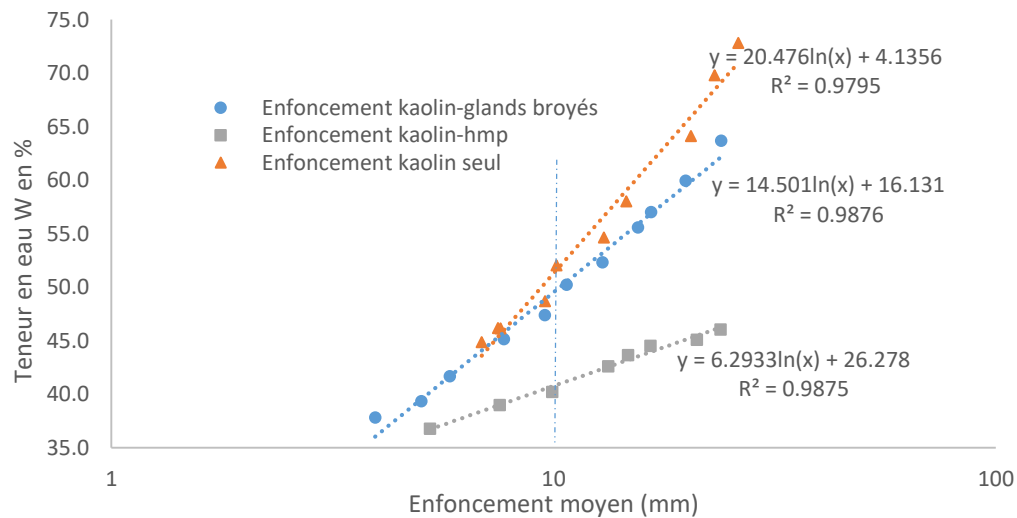
- Effet du NaHMP sur le seuil de cisaillement
 - Mécanismes : Répulsion électrostatique (changement de la charge positive sur les bords des plaquettes d'argile)



- 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

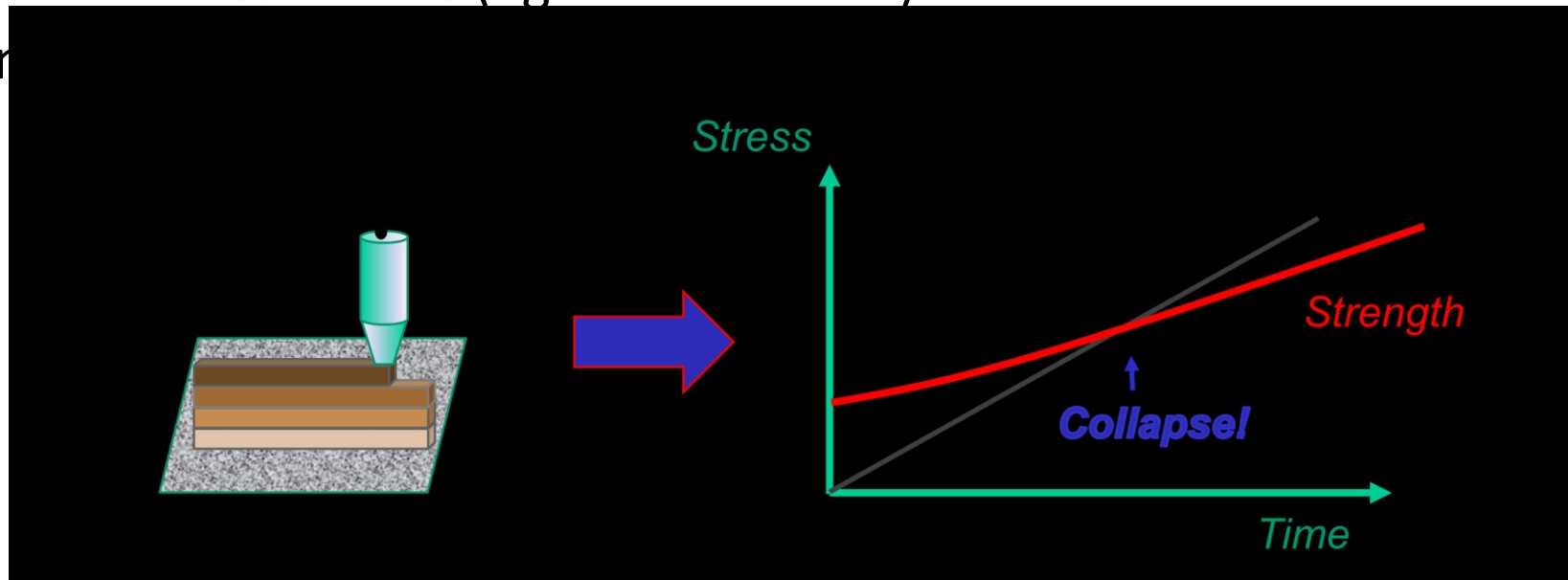
Formulation	Limite de liquidité estimée W_{LL} (%)
Kaolin-paille	66,4
kaolin seul	65,5
Kaolin-alg	62,7
kaolin-foin	61,6
kaolin-tanins	59,5
kaolin NaHMP	45,1

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

- Identifier et quantifier le rôle des ajouts
 - Fluidifiant? Résistances à courts termes (prise)? Résistances à longs termes?
 - Formuler pour l'impression 3D?

Impression 3D de Terre

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



- **Séchage lent ≠ Impression rapide**

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

Impression 3D de Terre

- Stratégie d'impression de terre crue
 - Utilisation d'un liant cimentaire
 - Utilisation d'un produit gélifiant à température ambiante : alginate
 - Utilisation d'un matériau présentant un comportement thermo-dépendant
 - Cire végétale
 - Collagène / Colle à poisson

Impression 3D de Terre - Exemple

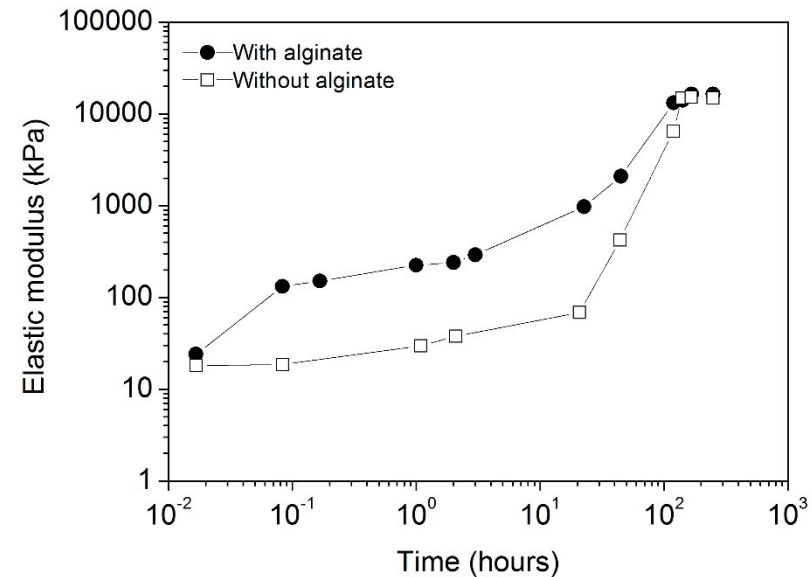
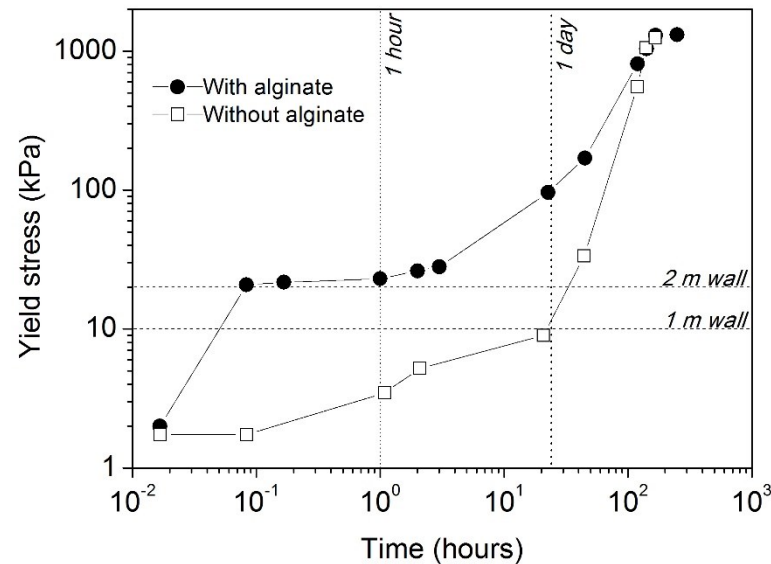
- Terre utilisée
 - Terre marron du nord de Rennes
 - Tamisée à 2 mm (corps de pompe)
- Objectif 1 : assurer la pompabilité
 - Addition de NaHMP: seuil de cisaillement plus faible
 - Pompabilité / Diminution de w%: séchage plus rapide, résistance plus forte
 - $w_{\text{impression}} = 45\%$ - seuil de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

Prédiction de la résistance de la terre crue

Comportement mécanique de la terre crue

- Analogie avec les matériaux cimentaires
- Paramètres influents
- Vérifications expérimentales
- Vers un modèle prédictif complet

Modèle prédictif pour le béton

- Modèle prédictif de résistance à la compression f_{c28} (à 28 jours) :

- Modèle de Féret :

Qualité du liant / granulat \longrightarrow $f_{c28} = K_F \cdot \sigma_{C28} \left[\frac{V_c}{V_c + V_W + V_A} \right]^2$

- Modèle de Bolomey :

$f_{c28} = K_B \cdot \sigma_{C28} \left[\frac{1}{E/C} - 0.5 \right]$

Forme du modèle prédictif :

$$f_c = A_c f(n)$$

Porosité

Modèle pour la terre crue ?

Paramètre influent lié à la porosité

- Influence de la densité sèche sur la résistance à la compression

Dépendance de la résistance à la densité sèche $\gamma_s = m_{\text{solide}}/V_{\text{total}}$

Pour des éprouvettes séchées à 60°C.

Paramètre influent lié à l'activité argileuse

- Indicateurs de l'activité argileuse ?
- Moteur de la résistance de la terre crue : succion capillaire
 - Taille des pores r = microstructure
 - Tension de surface γ
- Paramètres pouvant décrire cette microstructure :
 - Surface spécifique
 - Distribution porale
 - Capacité d'échange cationique

$$P_{cap} = \gamma/r$$

Validation du concept

- Normalisation de la résistance par un paramètre d'argilosité
 - Mise en évidence d'une courbe maîtresse (environnement similaire)

Forme du modèle prédictif :

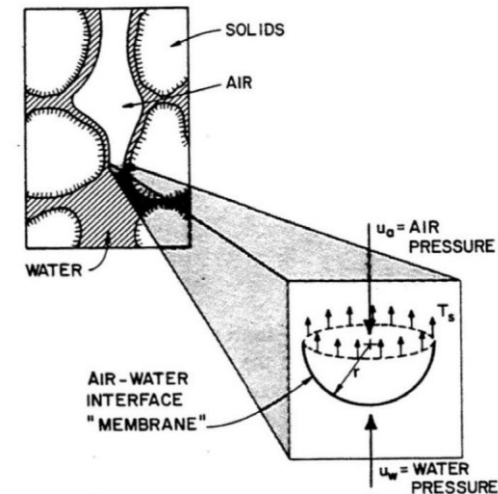
$$f_c = A_a \cdot f(\gamma_d)$$

A_a : paramètre d'activité argileuse

Influence de l'environnement

- Importance de l'environnement et des conditions d'ambiance
 - Humidité relative et Température
 - Variation de la teneur en eau et de la succion capillaire
- Nécessité de prendre en compte l'impact de la succion dans la modélisation de la résistance mécanique de la terre crue

$$P_{cap} = \gamma/r(R_H, T^\circ)$$



Modélisation de l'effet de la succion

- Lien entre environnement et succion capillaire (Travaux de P. Chauhan)

- à l'équilibre, la loi de Kelvin s'applique
- Plus complexe en transitoire

$$s = -\frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M_w} \ln(RH)$$

where, s is the suction at a given temperature T (in Kelvin, K), R is universal gas constant ($R = 8.3143 \text{ J/mol/K}$), M_w is the molar mass of water ($M_w = 0.018 \text{ Kg/mol}$), ρ_w is the bulk density of water ($\rho_w = 1000 \text{ Kg/m}^3$) and RH is the relative humidity, which is defined as the ratio of partial vapor pressure P in the considered atmosphere and the saturation vapor pressure P_o at temperature ($T = 298 \text{ K}$).

- Lien entre succion et résistance à la compression

- Effet de la succion mobilisant l'angle de friction interne du matériau
- Modélisation basée sur une analyse géotechnique du sol

Vers un modèle prédictif global

- A la lumière de ces résultats, une prédiction complète de la résistance à la compression peut s'écrire sous la forme suivante :

Forme du modèle prédictif :

$$f_c = A_a(P_{cap}).f(\gamma_d)$$

$$f_c = A_a(R_H, T^\circ).f(\gamma_d)$$

A_a : paramètre d'activité argileuse

Merci