



**GdR MBS**  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



# ***Terre Crue (Liants géosourcés)***

*École d'automne du GdR « Matériaux de Construction Biosourcés » – 08/11/2022 - Lorient*

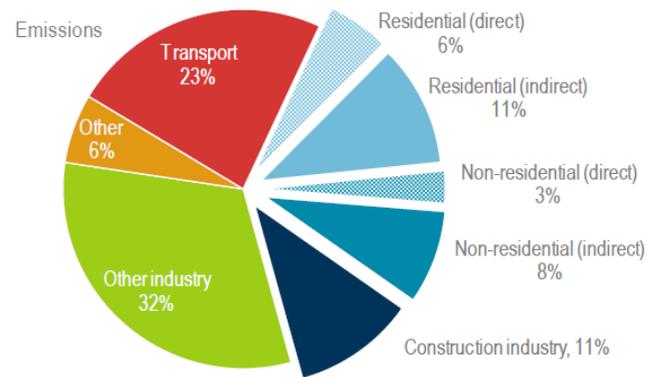
*Simon Guihéneuf – IRDL/UBS – [simon.guiheneuf@univ-ubs.fr](mailto:simon.guiheneuf@univ-ubs.fr)*



## Introduction

1. La terre crue, une ressource variable
2. L'argile, physique de l'effet liant (suction capillaire)
3. Caractéristique de la terre et classification (minéralogie vs. Granulométrie)
4. Caractéristique d'état – effet de la teneur en eau – changement de consistance
5. Ordre de grandeur des performances en service – liens avec classification
6. Quelles applications?

# Introduction

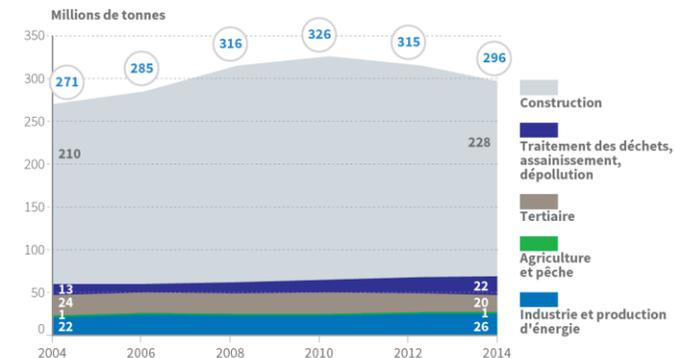


- ⊕ Consommations d'usage : **rénovation** et **réglementations thermiques**
- ⊕ Production de ciment : **5 à 10 % des émissions de CO<sub>2</sub>** à l'échelle mondiale
- ⊕ Pression sur les ressources naturelles - **Raréfaction des matériaux**
- ⊕ Construction : **premier producteur de déchets**
- ⊕ **70% des déchets** du BTP : **déchets minéraux non dangereux**
- ⊕ Objectif UE : **réutiliser et valoriser 70% des déchets du bâtiment** en 2020

➔ **Intérêt de construire en terre crue :**

- **Techniques vernaculaires**
- **Techniques industrielles**

**Part bâtiments et secteur construction dans les émissions de CO<sub>2</sub> en 2017 (39%)**



Source : Eurostat, RSD

**Production déchets par secteurs en France**



## *Un patrimoine millénaire*

- Constructions en terre crue sur tous les continents
- Plus d'1/3 de la population mondiale vivrait dans des bâtiments en terre
- 15 à 20% des œuvres architecturales classées sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont partiellement ou intégralement construites en terre

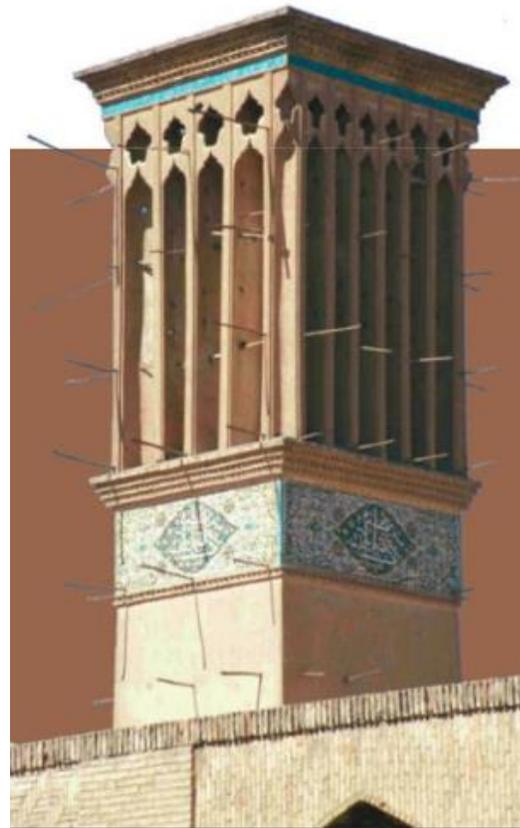


*Sources: L. Fontaine, R. Anger – Bâtir en terre : Du grain de sable à l'architecture (2009) ; R. Anger – Thèse (2011) ; G. Minke - Building with Earth (2006)*



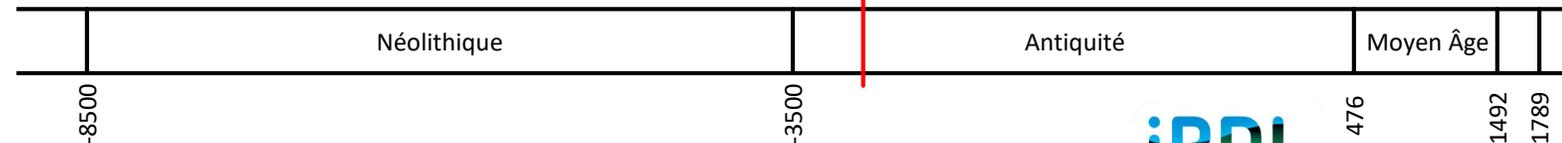
## Exemple de Yazd (Iran), et ses « tours à vent »

- en **Iran**, Une des cités les plus anciennes du monde
- connue avant 3000 av JC – Exemple d'ingéniosité et d'architecture iranienne: Maisons peu élevées, étendues dans les sous sol, approvisionnement en eau par canaux souterrains – Architecture résiliente dans un milieu extrême (désert aride)
- En pisé et en adobes principalement, briques de terre cuite aussi



« Bagdir », Tour à Vent de Yazd, favorisant les courants d'air dans les ruelles de la ville

Sources: R. Anger – *Bâtir en terre : Du grain de sable à l'architecture* (2009)



# Introduction



## Répartition des techniques en France



Sources: D'après Correia, M., Dipasquale, L., & Mecca, S. (2011). *Terra Europae: earthen architecture in the European Union*.



## Techniques de construction traditionnelles en France

### BTC



(crédit photo : Cycle Terre)

- ⊕ **Terre peu humide** non saturée
- ⊕ **Porteuse**

- ⊕ **Terre peu humide** non saturée
- ⊕ **Porteuse**

### Pisé



(crédit photo : PICHLER Ingenieure GmbH)

### Bauge



(crédit photo : Atelier ALP)

- ⊕ **Terre plastique**
- ⊕ **Fibres végétales**
- ⊕ **Porteuse**

- ⊕ **Terre très plastique**
- ⊕ **Non porteuse**
- ⊕ **Fibres végétales**

### Torchis



(crédit photo : Constructions d'Antan)

### Adobe



(crédit photo : Enrique Sevillano)

- ⊕ **Terre « visqueuse »**
- ⊕ **Fibres végétales**
- ⊕ **Porteuse**

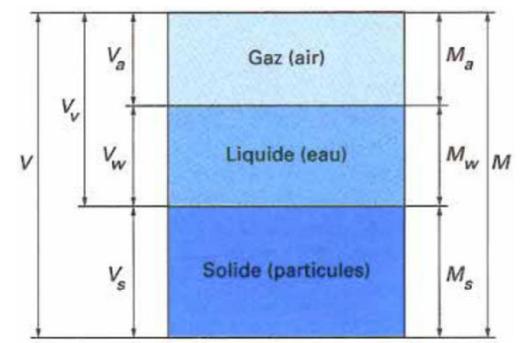
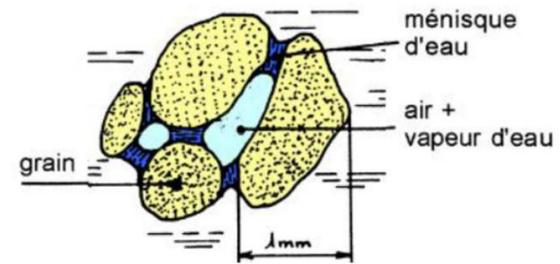
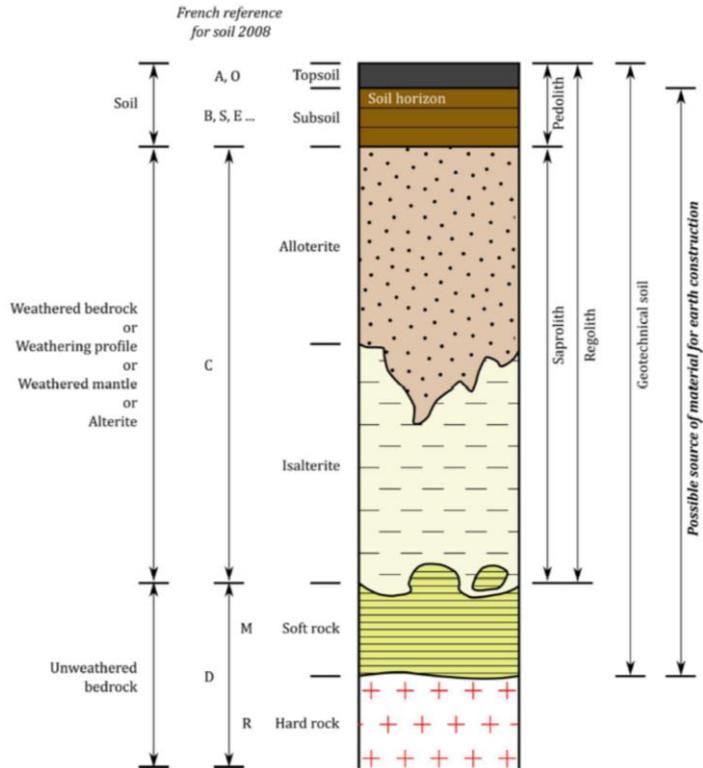
Teneur en eau (W %)

**Modes de mise en œuvre localement adaptés aux caractéristiques variables des terres**

# 1- La terre crue, une ressource variable



## Pourquoi peut-on construire en terre crue? – Quelle terre?



Représentation schématique des phases d'un sol

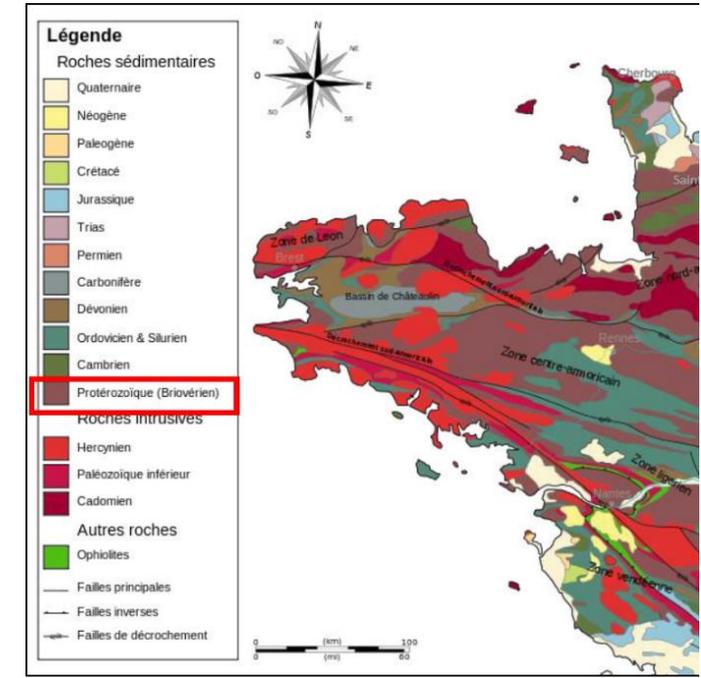


Schéma structural du massif armoricain

Coupe verticale de matériaux altérés de la surface au substratum

Sources : Thèse -Le Cor T. (2014); Thèse – Hamard E. (2017); Magnan J-P., Techniques de l'ingénieur (2017)

# 1- La terre crue, une ressource variable



*Pourquoi peut-on construire en terre crue? – Une grande variabilité granulométrique*



*Matrice de consistance inspirée du "test Carazas" réalisée sur 28 terres bretonnes et normandes différentes (Crédit photo : Théo Vinceslas)*

Type de grain	Argiles	Limons	Sables fins	Sables Grossiers	Graviers
Dimensions	< 2 µm	2-63 µm	63-200 µm	0,2-2 mm	2-20 mm
Forme	Plate ou en bâtonnet		Sphérique		
Minéraux	Smectites, illites, kaolinites, chlorites, vermiculites, ...		Quartz /quelques Feldspaths et Micas		
Interactions	Colloïdales		Granulaires		

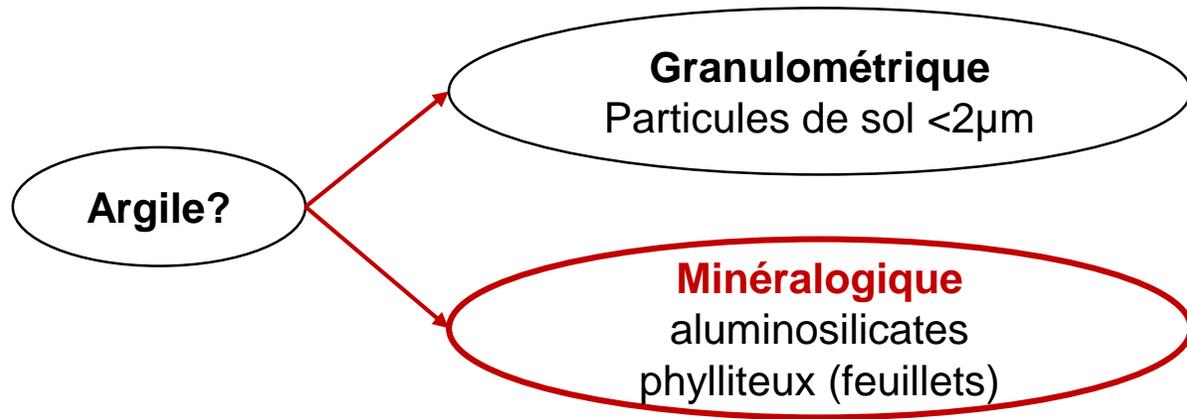
*Classement retenu des différentes particules composant la terre selon la granulométrie et quelques-unes de leurs caractéristiques*

*Sources : Magnan J-P., Techniques de l'ingénieur (2017); Thèse - Vinceslas T. (2019); Briaud J-L. (2013)*

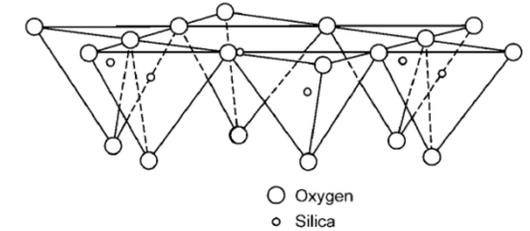
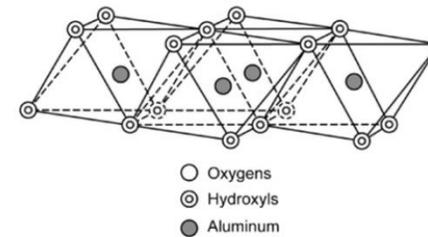
# 1- La terre crue, une ressource variable



*Pourquoi peut-on construire en terre crue? – Les argiles et l'eau*



Feuillet d'argile : au moins 2 unités structurales



Feuillet d'argile : plusieurs structurations possibles (1:1, 2:1 ou 2:1+1)

- ⊕ **Différentes substitutions d'atomes** au sein des couches des feuillets
  - ⊕ **Différentes structurations des feuillets**
- ⊕ **Déficits de charges + ou – importants** selon les types de feuillets
  - ⊕ Déficit comblés par **différents types de cations échangeables**

**Composition et arrangement des couches → grande variété d'argiles**

Sources : Murray H.H. (2006); Brigatti et al. (2006); Van Olphen H. (1977); Hugget J.M. (2015)

# 1- La terre crue, une ressource variable



## Pourquoi peut-on construire en terre crue? – Les argiles et l'eau

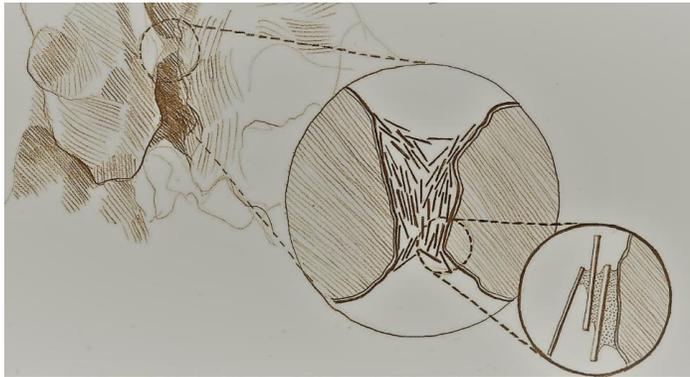
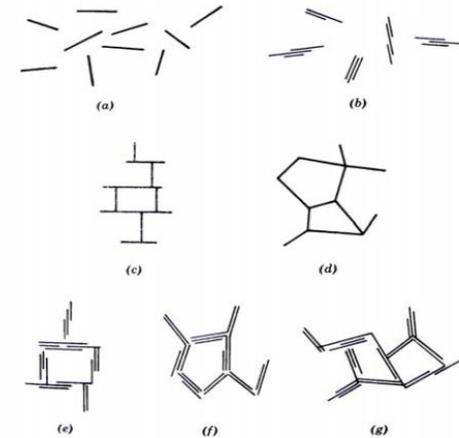


Schéma des ponts capillaires se formant entre les argiles, (faible teneur en eau)



Différents modes d'associations des particules argileuses en suspension (forte teneur en eau)

Nature Argile	Kaolinite	Chlorite // Illite	Vermiculite // Smectites
Taille des Grains	Gros Grains		Grains Fins



Dimensions stables  
Peu sensibles à l'eau  
Peu cohésives

Argiles Gonflantes  
Sensibles à l'eau  
Très cohésives

Sources : Van Olphen H. (1977); Gelard D. (2005); Van Damme H. (2013); Gelard et al. (2008)

# 2- L'argile, physique de l'effet liant



*La cohésion de la terre crue → Différentes contributions*

## Le potentiel hydrique (Succion)

La terre est composée de trois phase : Solide, liquide et gazeuse.

**Le liant n'est pas seulement l'eau, mais la combinaison de l'eau et de l'air.**

Définition : Le potentiel hydrique (succion) correspond énergie de liaison de l'eau à l'intérieur de l'élément considéré (ici la particule de sol). C'est globalement la pression nécessaire pour l'en faire sortir.

Cette succion présente des valeurs négatives (liant)

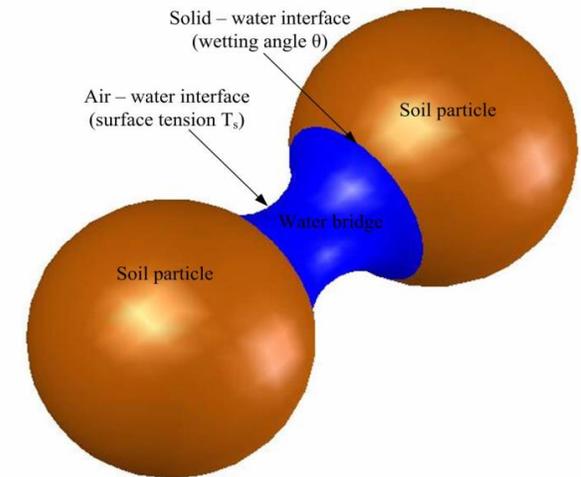
$$\Psi_{Total} = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_p \quad \text{avec:}$$

$\Psi_m$  = **Succion matricielle, adsorption aux surfaces, effet capillaire**

$\Psi_o$  = Succion osmotique, solutés présents dans l'eau

$\Psi_p$  = Succion de pression,

Sources: Jaquin (2008); Van Damme H. (2013); Gelard et al. (2008)



Ménisque d'eau entre deux particules sphériques  
(Jaquin, 2008)

# 2- L'argile, physique de l'effet liant



*La cohésion de la terre crue → Différentes contributions*

$\Psi_m$  = **Succion matricielle**

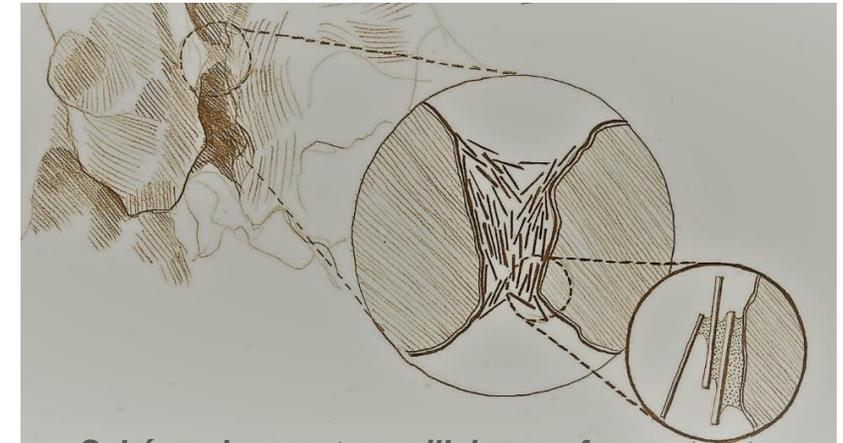
Liaison hydrogène de l'eau aux surfaces des particules du sol (tension entre eau et air) :

- **Composante principale** du potentiel hydrique dans la terre
- Dépend principalement de la **surface spécifique** du sol

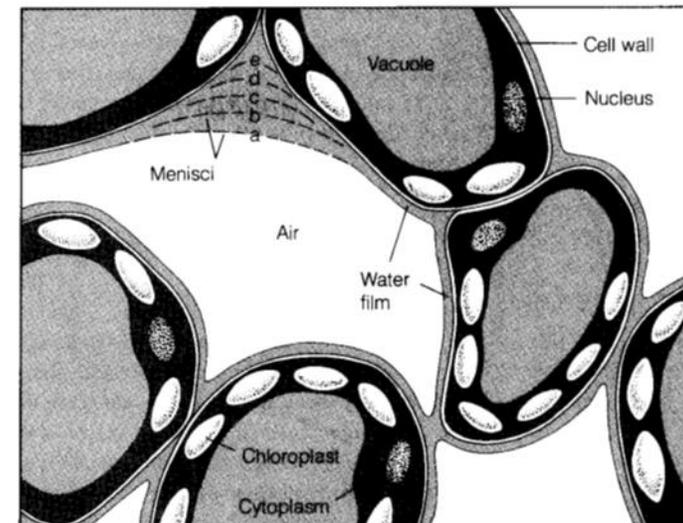
**Plus il y a de ponts capillaires par unité de volume dans un sol et plus sa cohésion est importante :**

**Les plus petites particules (argiles) favorisent la cohésion par succion**

*Sources: Jaquin (2008); Van Damme H. (2013); Gelard et al. (2008); Jensen and Salisbury (1984)*



*Schéma des ponts capillaires se formant entre les argiles, à très faible teneur en eau, assurant la cohésion de la terre*



# 2- L'argile, physique de l'effet liant

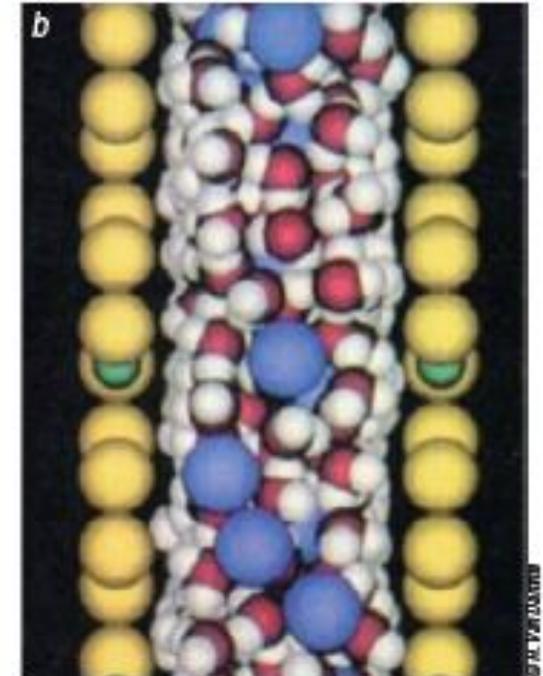
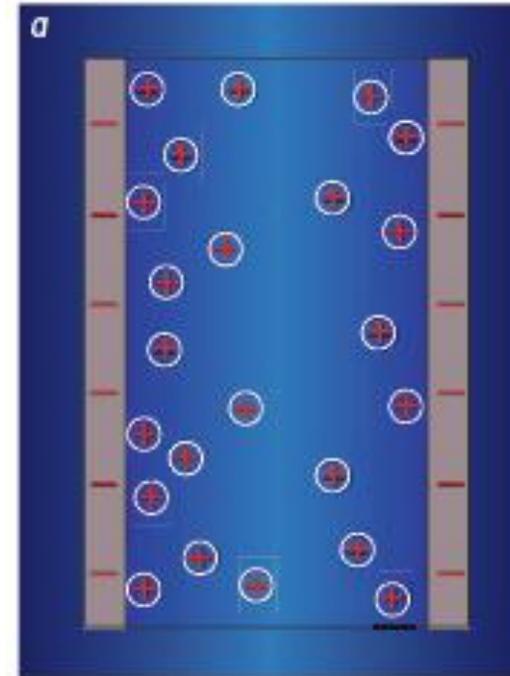


*La cohésion de la terre crue → Différentes contributions*

$\Psi_m$  = Succion osmotique

Forces de Van der Waals induites par les cations en solution présent entre les feuillets d'argile (dépendent de la nature des argiles):

- Dans le cas le plus favorable (smectite calcique), la contribution des forces de van der Waals à la cohésion du sol est 10 fois plus importante que celle de la succion
- Des indicateurs permettent d'avoir des indices sur le potentiel d'une terre à présenter de grandes valeurs de succion osmotique (VBS et CEC)



*Sources: Van Damme H. (2013)*

# 2- L'argile, physique de l'effet liant



## Quelques données

Caractéristiques	Kaolinite	Illite	Smectites (exemple de la Montmorillonite)	Chlorites	Vermiculites
Formule générale	$[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$	$[(Si_{3,4}Al_{0,6})(Al_2)O_{10}(OH)_2K_{0,6}]$	$[(Al_{2-x}Mg_x)Si_4(O_{10})(OH)_2(CEC)_x]$	$[(R^{2+}, R^{2+})_3(Si_{4-x}R_y^{2+})O_{10}(OH)_2]^- + [(R^{2+}, R^{3+})_3(OH)_6]^+$	$[(MgFe_3)(Si_{4-x}Al_x)(O_{10})(OH)_2Mg_x]$
Type de feuillet/distance interfoliaire	Feuillet 1 :1 Distance interfoliaire : 7 Å	Feuillet 2 :1 Distance interfoliaire : 10 Å	Feuillet 2 :1 Distance interfoliaire $\geq 14$ Å	Feuillet 2 :1 +1 Distance interfoliaire : 14.2 Å	Feuillet 2 :1 Distance interfoliaire : 14 Å
Dimensions d'une plaquette d'argile	Epaisseur : quelques dizaines de nm Longueur : 1 µm	Epaisseur : 10nm Longueur : 100nm	Epaisseur : 1 nm Longueur : 1 µm	Proche des illites	Proche des illites
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	<b>8-30</b>	<b>67-150</b>	<b>600-800</b>	<b>26-130</b>	<b>275-700</b>
CEC (cmol+/kg)	<b>1-15</b>	<b>10-40</b>	<b>70-120</b>	<b>10-40</b>	<b>130-210</b>
Charge électrique du feuillet (C.m <sup>2</sup> )	0	0,6-1	0,2-0,6	-	0,6-0,9
Comportement gonflant	Non	Non	Oui	Non	Oui

Sources: S. Guihéneuf – Thèse (2020)

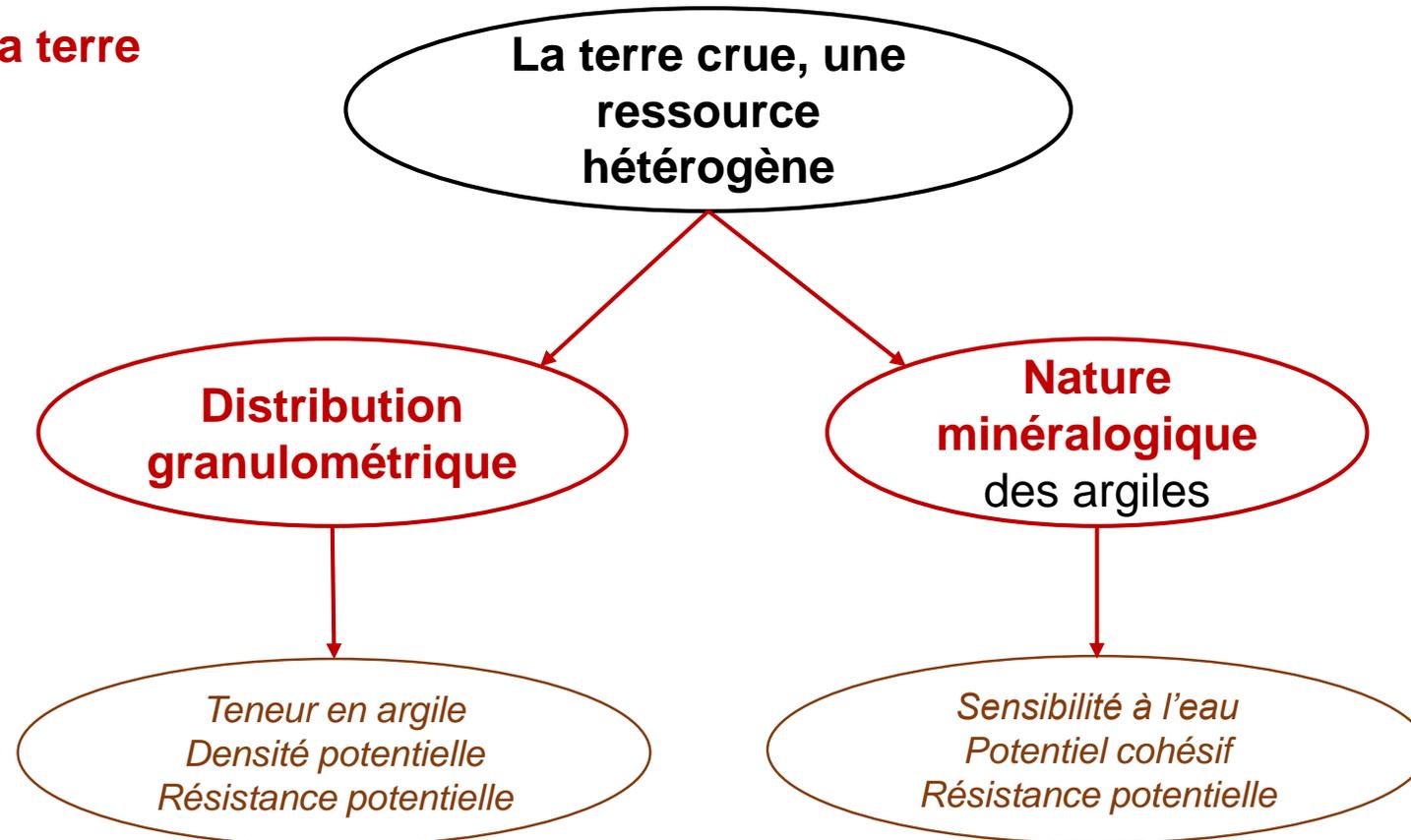


# 3- Caractéristiques de la terre et classification



*Pourquoi peut-on construire en terre crue? – Une variabilité à prendre en compte*

## Nature de la terre



*Sources :* Houben H., Guillaud H., CRAterre (2006); AFNOR (2017) XP P 13-901; Jiménez Delgado et Guerrero (2007); Thèse - Anger R. (2011)

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



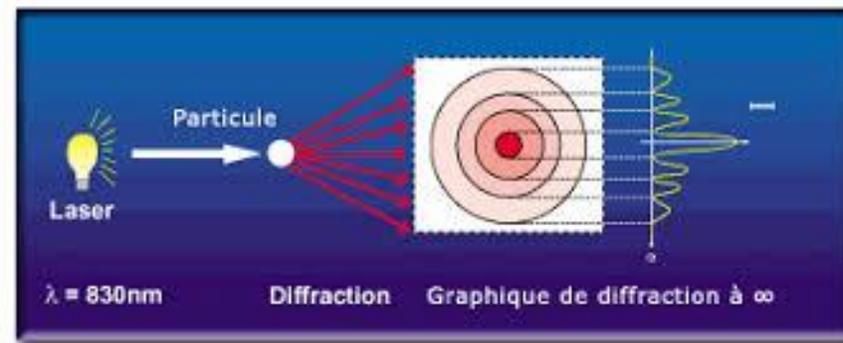
## Caractérisation de la distribution granulométrique

### ⊕ Méthodes d'étude de la distribution granulométrique :

- ⊕ Tamissage par voie humide : distribution granulométrique des plus gros grains
  - Norme ISO 17892-4
- ⊕ Granulométrie par sédimentation : distribution granulométrique des fines (< 80  $\mu\text{m}$ )
  - Normes ISO 17892-4 et NF P94-057
- ⊕ Granulométrie Laser : distribution granulométrique des fines (< 80  $\mu\text{m}$ )
  - Norme ISO 13320:2020



Mesure de granulométrie par sédimentométrie



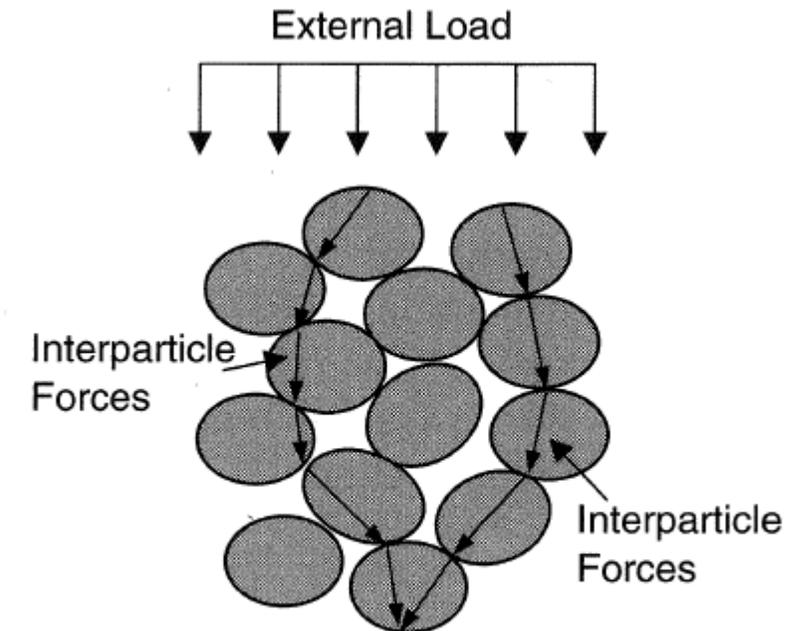
Principe granulométrie laser

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## *Distribution granulométrique – contribution du squelette granulaire à la résistance du matériau*

- Les grains entrant en contact au sein du matériau terre assurent en partie sa résistance
- Contribution de l'angularité des grains et de la distribution granulométrique
- Plus la porosité est limitée, plus le matériau terre est résistant en compression
- Plus les contacts entre les grains sont rugueux, plus le matériau terre est résistant en compression
- La microstructure du matériau peut être influencée par le mode de mise en œuvre : Teneur en eau limitée, énergie de compactage augmentée, adjuvants.



*Reprise de charge par les grains du squelette granulaire (Mitchell et Soga, 2005)*

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Caractérisation de la distribution granulométrique

### ⊕ Distributions granulométriques de terres à pisé de Rhône-Alpes (ENTPE/UGE):



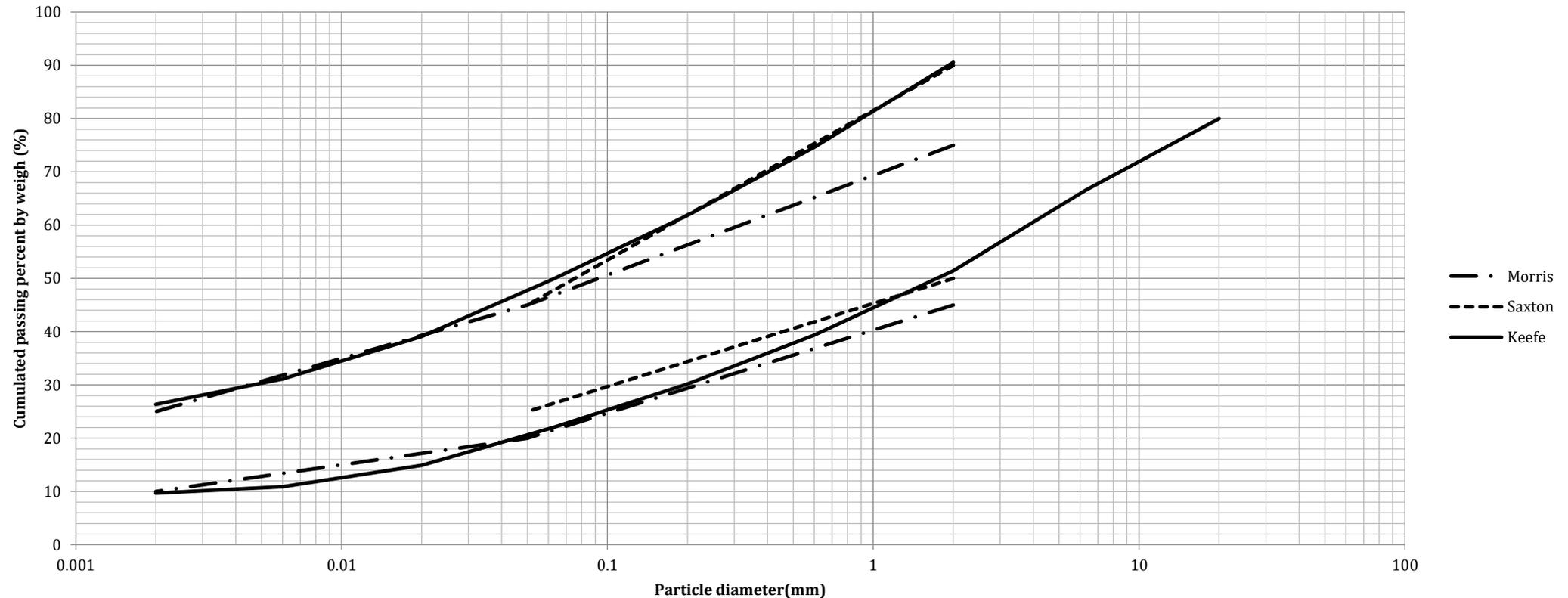
Données E.  
Hamard (Cours  
IUT St Nazaire  
2017)

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Caractérisation de la distribution granulométrique

⊕ Distributions granulométriques de terres à bauge (fuseaux généralement observés):



# 3- Caractéristiques de la terre et classification



*Caractérisation de la distribution granulométrique:*

⊕ **Exemple de terres bretonnes aux potentiels variés (Thèse S. Guihéneuf):**

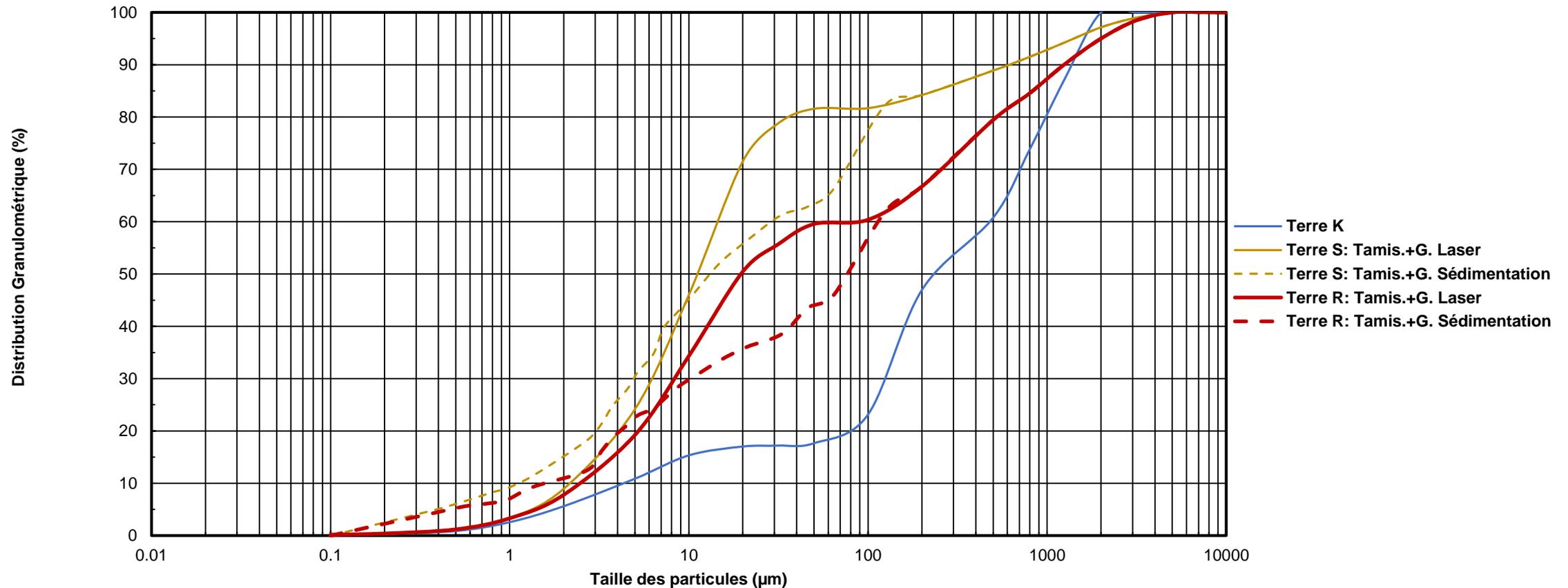
Terre	Localisation	Utilisation	Potentiel de résistance	Aspect
Terre K	Proche Lorient (56)	Laboratoire Kaolin industriel	Faible	
Terre R	Redon (35)	Enduits	Intermédiaire	
Terre S	Nord Rennes (35)	Bauge	« Optimal »	

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Caractérisation de la distribution granulométrique:

### ⊕ Exemple de terres bretonnes aux potentiels variés (Thèse S. Guihéneuf):



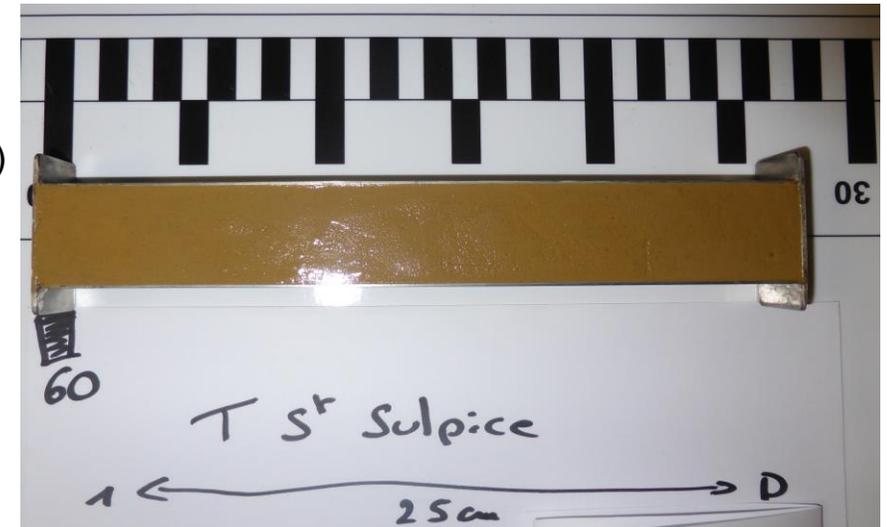
# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Caractérisation géotechnique des interactions de la terre avec l'eau:

### ⊕ Interactions avec l'eau :

- ⊕ Teneur en eau → Détermination de l'eau présente dans la terre dans un état donné (NF EN ISO 17892-1)
- ⊕ Limites d'Atterberg → Détermination de limites de consistance et d'état pour chaque terre (ISO 17892-12) –Teneurs en eau caractéristiques de la terre (Limite de liquidité  $W_l$ , Limite de plasticité  $W_p$  et Indice de plasticité  $I_p$ )
- ⊕ Limites de retrait → Détermination de limites de retrait conventionnelle (XP P 94-060-1) et linéique (BS 1277:2) . (Teneur en eau de la terre sous laquelle il n'y a plus de retrait fort)
- ⊕ Optimum Proctor caractéristiques de compactage normalisé optimales (NF P 94-093)



Dispositif de mesure du retrait linéique sur une terre

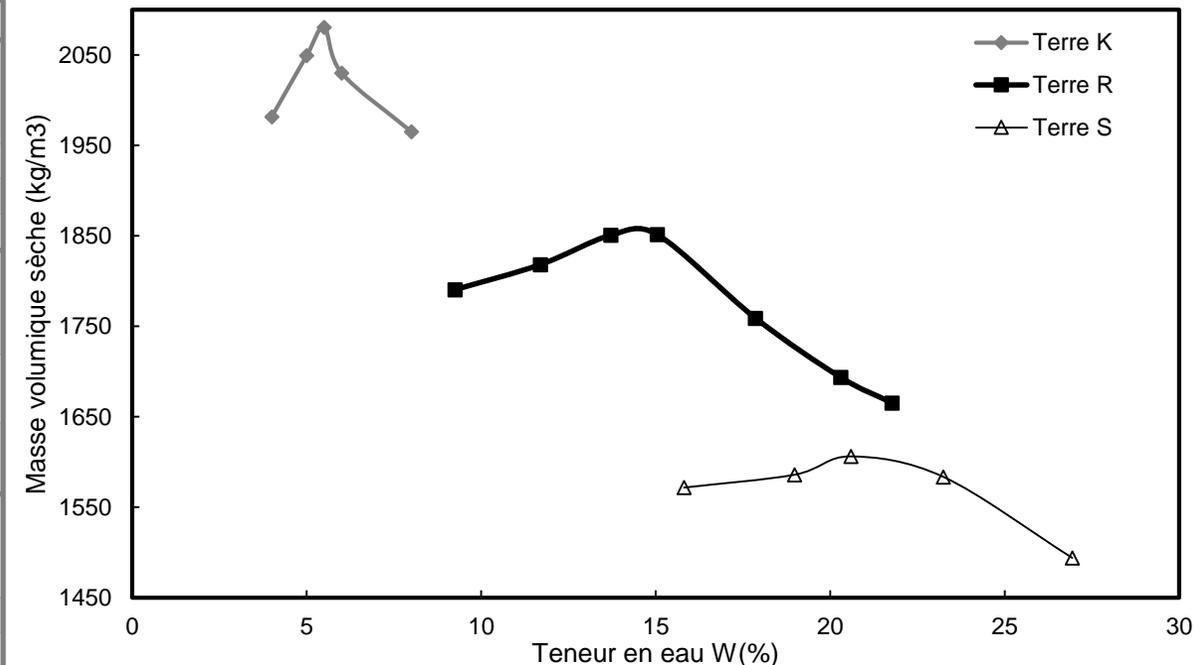
# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Caractérisation géotechnique des interactions de la terre avec l'eau:

### ⊕ Interactions avec l'eau – Quelques résultats pour des terres bretonnes :

Études	Paramètre	Terre K	Terre R	Terre S
Limites d'Atterberg	Fraction granulométrique étudiée	42.5% Kaolin - 57.5% Sable Fin (<200 μm)	<400 μm	<400 μm
	$W_p$ (%)	18,6 %	21,8 %	29,7 %
	$W_l$ (%)	32 %	36,5 %	46,2 %
	$I_p$ (%)	13,4 %	14,7 %	16,5 %
Limites de retrait	Fraction granulométrique étudiée	50% Kaolin - 50% Sable Fin (<200 μm)	<400 μm	<400 μm
	Limite de retrait $W_R$	19,1 %	20,4 %	23,7 %
	Retrait linéique LS	6,2 %	3,2 %	7,1 %
Optimum Proctor Normal	Fraction granulométrique étudiée	Tout	Tout	Tout
	$W_{OPN}$ (%)	5,5%	14,5 %	20,6 %
	$\rho_{OPN}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2080	1858	1606



Mesures d'optimum Proctor pour 3 terres bretonnes

# 3- Caractéristiques de la terre et classification

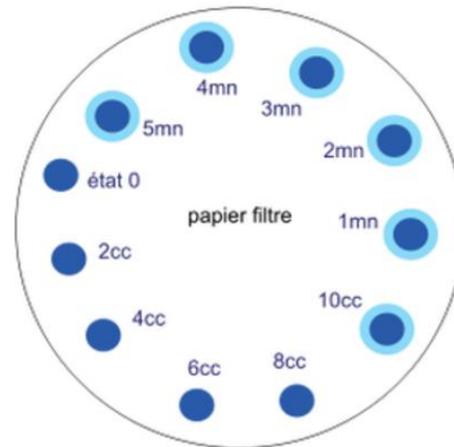


## Propriétés de surface des terres :

### ⊕ Propriétés de surface:

- ⊕ VBS valeur au bleu de méthylène d'un sol (NF P 94-068 et NF EN 933-9+A1 ): estimation de la surface spécifique d'une terre donnée et de son potentiel cohésif – degré d'activité de ses argiles
- ⊕ CEC, capacité d'échange cationique d'un sol (NF X 31-130) : estimation de la surface spécifique d'une terre donnée et de son potentiel cohésif – degré d'activité de ses argiles

$$VBS = \frac{B}{\frac{m_h}{1+w}} \times 100$$



Détermination de la valeur au bleu de méthylène du sol théorie(a), taches de bleu de méthylène sur papier filtre(b)

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Propriétés de surface des terres :

⊕ Propriétés de surface – quelques résultats pour des terres bretonnes:

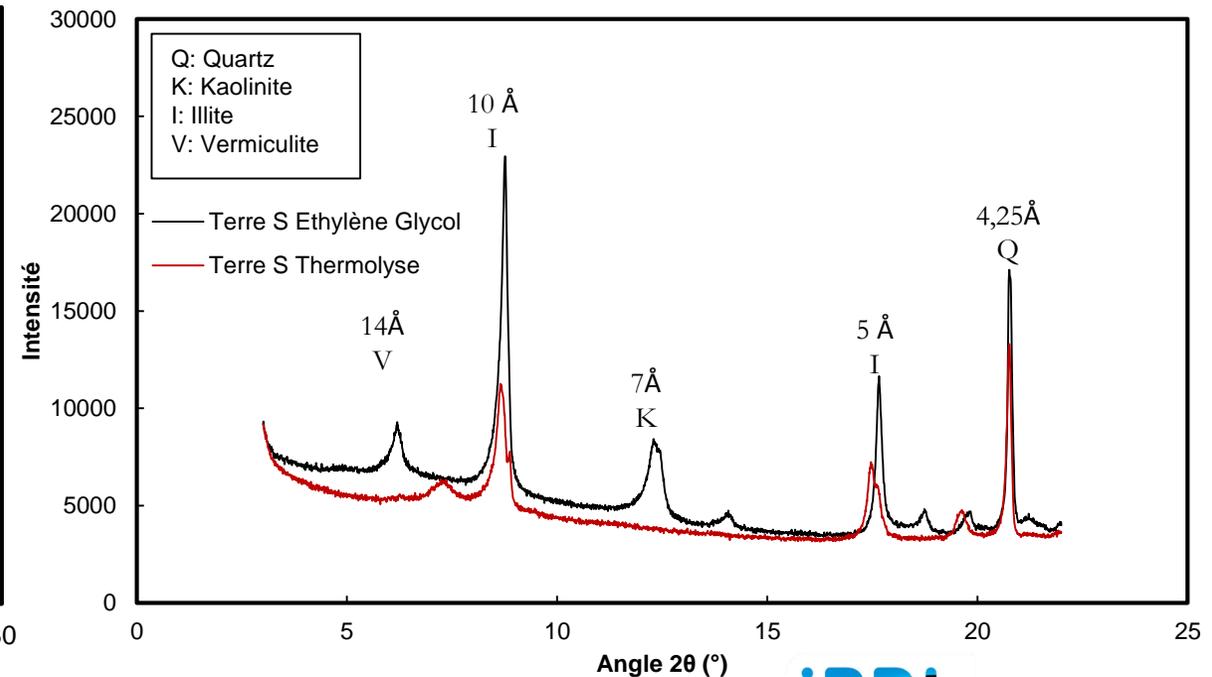
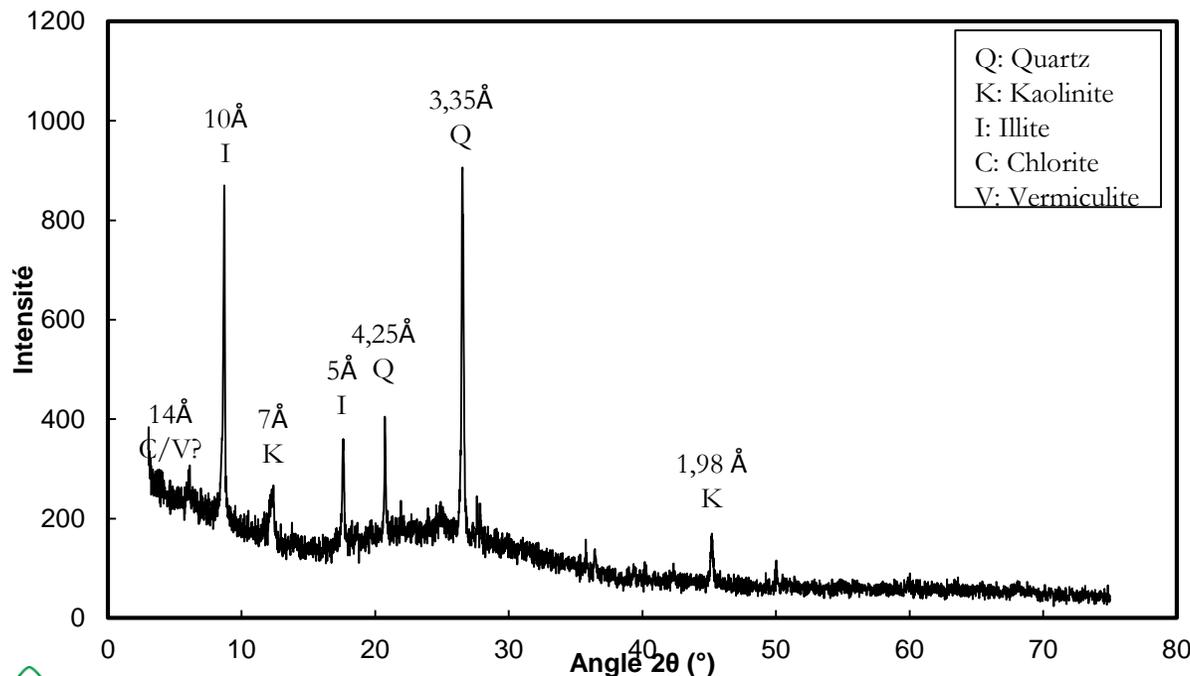
Étude	Fraction granulométrique considérée	Terre K	Terre R	Terre S
VBS (g/100g)	Tout	0,17	0,7	1,1
	Argiles	1	6,5<VBS<9,0	7,5<VBS<12,2
CEC (mEq/100g ou Cmol <sup>+</sup> /kg)	Tout	0,9	3,0	7,9
	Argiles	5,3	27,8<CEC<38,5	54,1<CEC<87,8

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Caractérisation minéralogique / physico chimique des terres :

- ⊕ Diffraction de rayons X (DRX) (NF EN 13925) : Étude DRX sur Lames orientées traitées de 3 manières différentes : naturel, éthylène Glycol, séchage 550°C
- ⊕ Analyses thermiques différentielles – thermogravimétriques (ATD-TG)
- ⊕ Spectrométrie d'émission atomique avec plasma induit par haute fréquence (ICP-AES) (NF ISO 22036)
- ⊕ Microscope électronique à balayage (MEB) – Analyse EDS



Exemple de résultats obtenus après analyse DRX de la terre S

S. Guihéneuf – IRDL/UBS – École d'automne GdR MBS – Lorient - Novembre 2022

# 3- Caractéristiques de la terre et classification



## Caractérisation minéralogique / physico chimique des terres :

⊕ **Nature de quelques terres bretonnes : Compositions minéralogiques (estimées à l'aide des données DRX, ATD-TG, ICP-AES, Analyse EDS):**

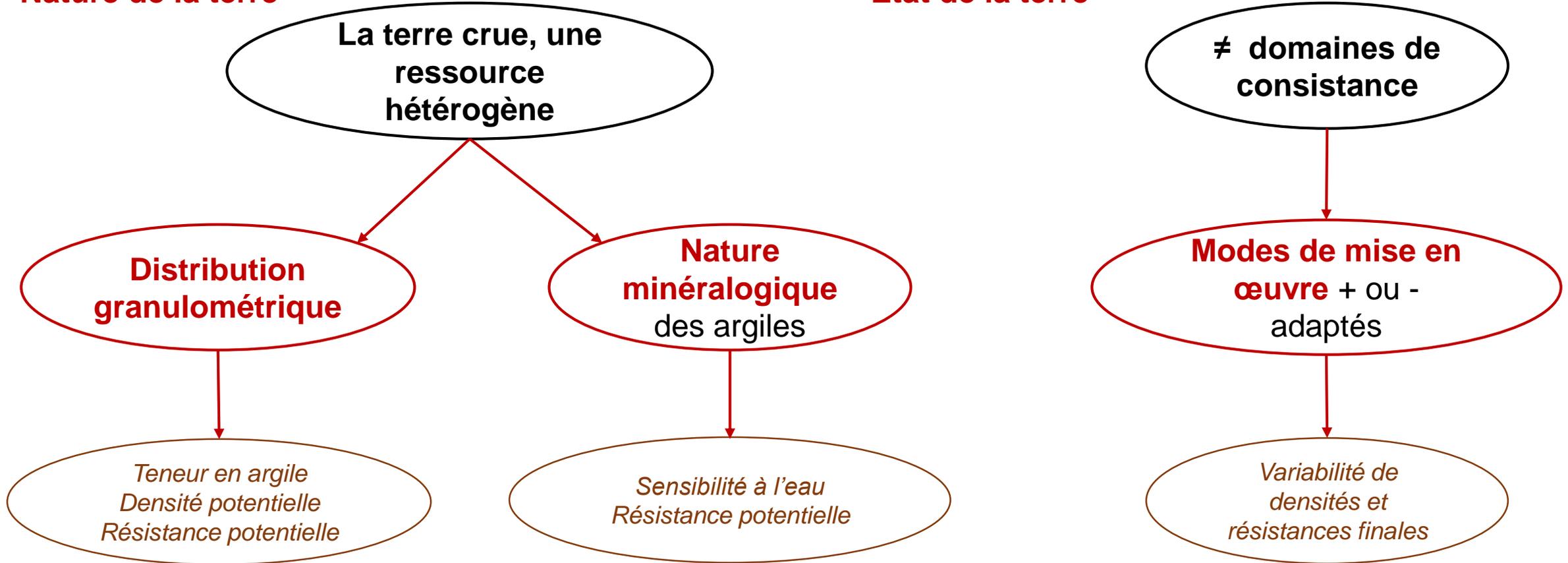
Terre	Composition minéralogique
Terre K	<u>Argiles</u> : Kaolinite <u>Autres minéraux</u> : Quartz, Micas
Terre R	<u>Argiles</u> : Kaolinite, Illite, Chlorite <u>Autres minéraux</u> : Quartz, Micas
Terre S	<u>Argiles</u> : Kaolinite, Illite, Vermiculite <u>Autres minéraux</u> : Quartz Micas

# 4- Caractéristiques d'état –teneur en eau –consistance



## Nature de la terre

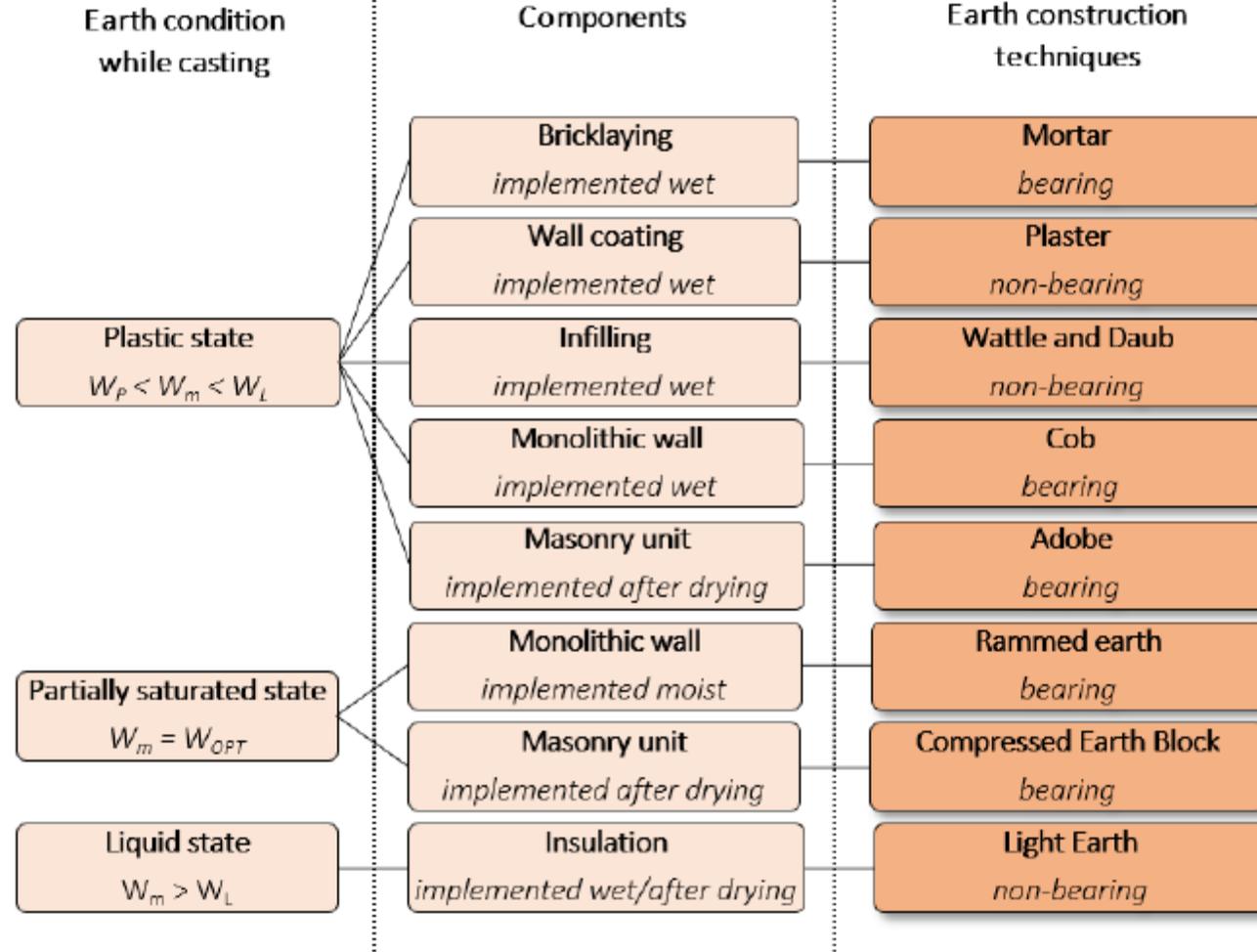
## État de la terre



# 4- Caractéristiques d'état –teneur en eau –consistance



*Des consistances très variables adaptées à différents modes de mise en œuvre*



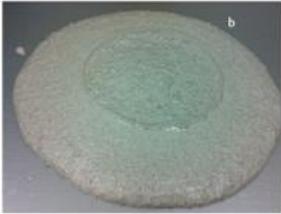
*Synthèse des teneurs en eau et consistances visées pour la mise en œuvre de la terre crue – techniques vernaculaires*

*Source : Fabbri et al. (2021) – RILEM Technical Letter – TC RILEM 274*

# 4- Caractéristiques d'état –teneur en eau –consistance



Des consistances très variables adaptées à différents modes de mise en œuvre

État	Limites de Consistance	Limite de liquidité $W_l$	Limite de plasticité $W_p$
			
	Liquide	Plastique	Humide
	← Teneur en eau W (%)		
Techniques Vernaculaires		Adobe	Bauge/Bauge coffrée Pisé/pisé préfabriqué BTC
Innovations récentes	Terre coulée (SCCC)	Impression 3D Extrusion	Hyper-compaction
Techniques étudiées		Moulage Extrusion	Compaction Vibro-compaction

⊕ Pour un mélange Terre/Chanvre : Généralement on vise une teneur en eau (rapport E/L) très élevée, au-delà **de la limite de liquidité  $W_l$**  → **consistance de barbotine visqueuse à très fluide** selon les caractéristiques intrinsèques du liant géo-sourcé

⊕ **Granulométrie de la barbotine** : généralement, une terre utilisée pour un mélange terre chanvre est tamisée et ne présente pas d'éléments > 2mm

Représentation schématique des consistances visées des terres mises en œuvre selon différents procédés

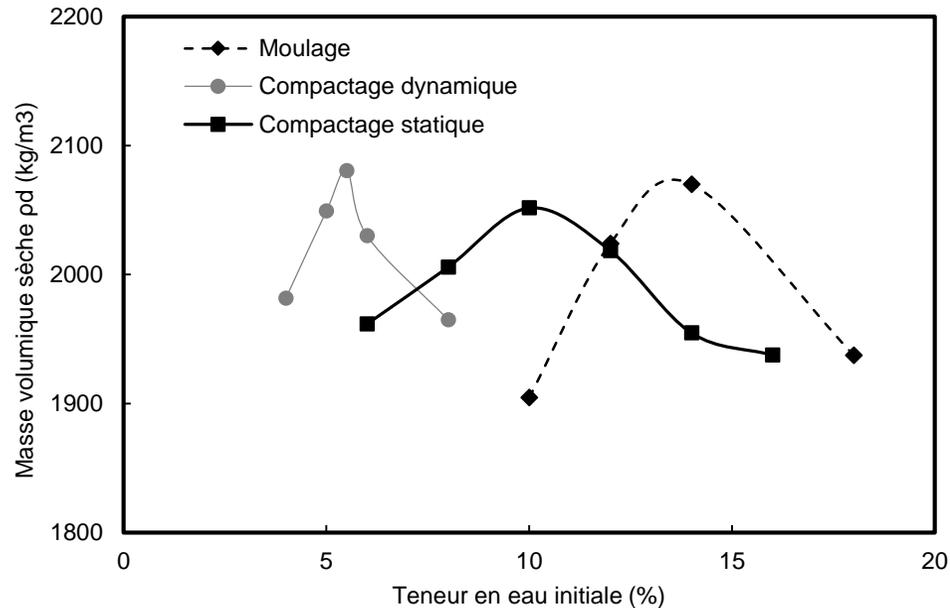
(Crédit photo « état liquide » : Gnanli Landrou, Crédit photo « état plastique » : Arnaud Perrot, Crédit photo « état humide » ECOMATERRE©)

Sources : Thèse – Hamard E. (2017); Houben H., Guillaud H., CRAterre (2006); AFNOR (2017) NF EN ISO 17892-12; Guide des bonnes pratiques (2018); Keefe L. (2005); <http://www.construction-pise.fr/>; Thèse – Landrou G. (2018); Khelifi et al. (2015); Thèse – Bruno A.W. (2016); Perrot et al. (2018); Perrot et al. (2018)

# 4- Caractéristiques d'état –teneur en eau –consistance



*Différentes W% optimales pour différents modes de mise en œuvre*



*Influence de la teneur en eau initiale sur la masse volumique sèche d'échantillons d'une terre donnée*

Terre	Teneur en eau optimale à la mise en œuvre (%)			
	Vibro-compaction	Compaction	Extrusion	Moulage
Terre K	9%	10%	10-14%	14%
Terre R	14%	14,5%	17,5%-25%	22%
Terre S	19,5%	20%	27,5%	30%

*Teneur en eau optimale à la mise en œuvre en fonction du mode de mise en œuvre et de la formulation de la terre*

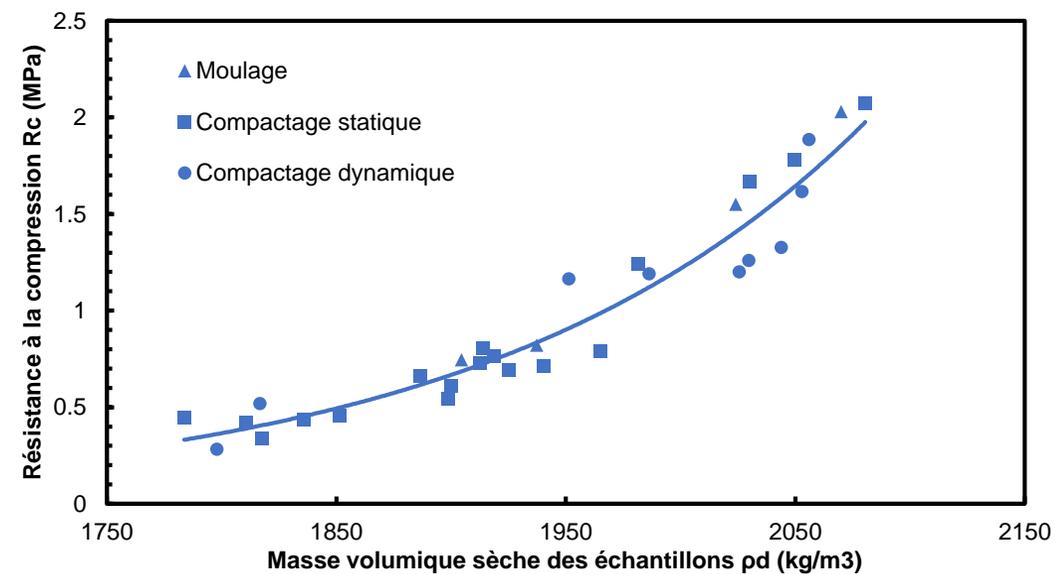
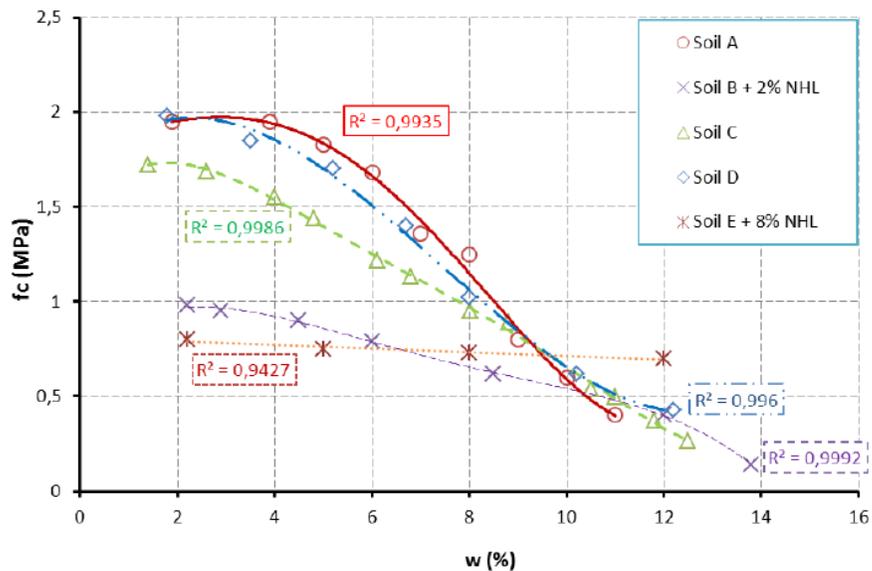
# 5- Ordre de grandeur des performances en service



## Caractéristiques mécaniques de la terre crue

Pour une terre donnée :

- ⊕ Sa résistance finale à la compression varie avec sa **teneur en eau**
- ⊕ Sa résistance finale à la compression varie avec sa **densité sèche**



Évolution de la résistance à la compression avec la teneur en eau

Résistance mécanique d'une terre bretonne en fonction de sa masse volumique sèche

Sources: Bui et al. (2014); Perrot et al. (2018)

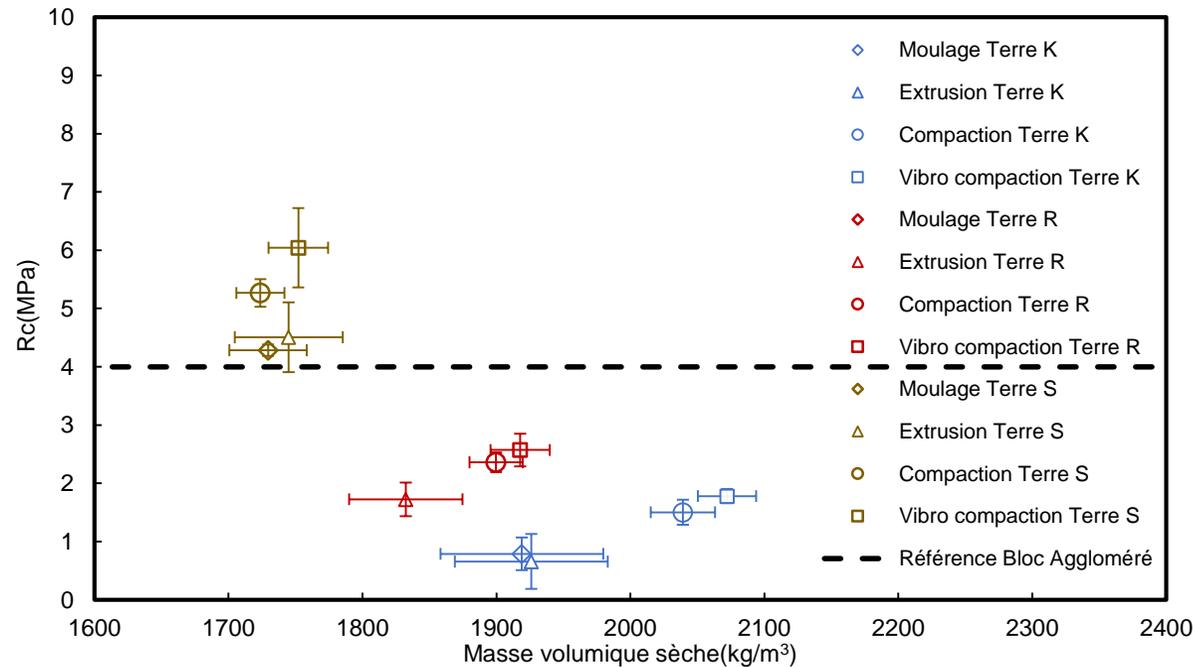


# 5- Ordre de grandeur des performances en service



## Caractéristiques mécaniques de la terre crue

Quelques résultats pour des terres bretonnes



Évolution de la résistance à la compression  $R_c$  (MPa) à l'état sec en fonction de la masse volumique sèche pour les trois terres **K**, **R** et **S**

# 5- Ordre de grandeur des performances en service



## Caractéristiques mécaniques de la terre crue

Méthode de mise en œuvre	<u>R<sub>c</sub></u> (MPa)	Variations W%	E (MPa)	Densités sèches (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Pisé</b>	0,3 – 7 MPa – généralement 1-2 MPa	0% - 15%	500-5300	1700-2150 kg/m <sup>3</sup>
<b>Bauge</b>	0,6-1,3 MPa	-	250-300 MPa	1500-1600 kg/m <sup>3</sup>
<b>BTC</b>	0,3 – 5 MPa	-	1000-2000 MPa – échelle du mur 100-800 MPa	1800-2000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Adobe</b>	0,3 – 4,5	-	1000-2000 MPa – échelle du mur 100-800 MPa	

*Données tirées de l'étude bibliographique du TC RILEM 274 - Testing and characterisation of Earth-based Building Materials and Elements*

# 5- Ordre de grandeur des performances en service

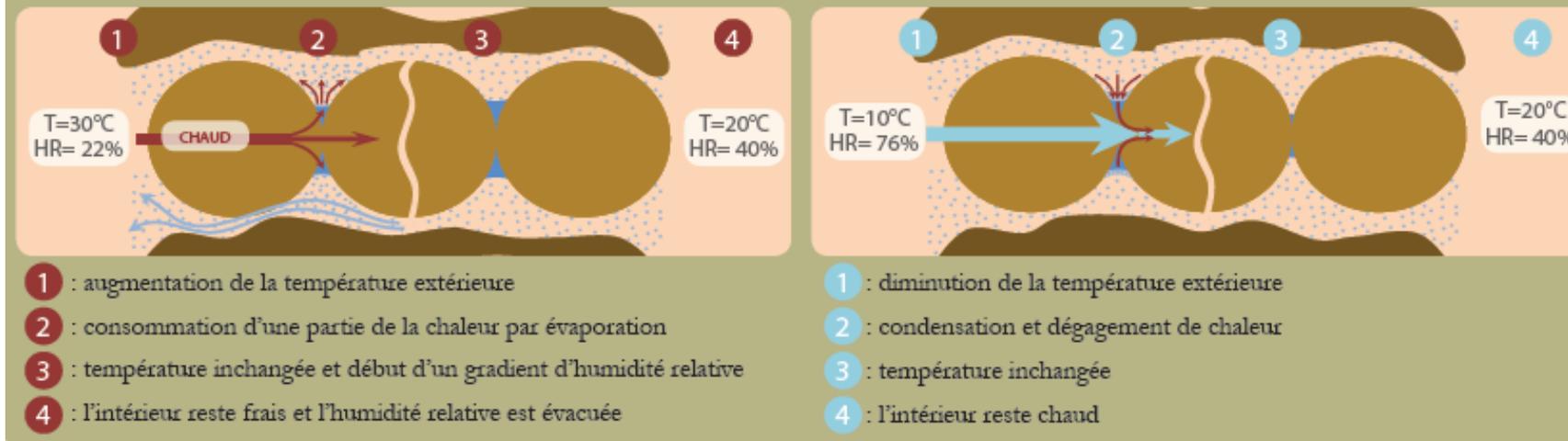


## Caractéristiques hygrothermiques de la terre crue

Méthode de mise en œuvre	Conductivité Thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	Capacité thermique massique ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	Masse Volumique ( $kg/m^3$ )	Résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu$
Pisé/BTC	0,15-2,4	750-1800	1200-2140	15-20
Adobe/Bauge/Torchis	0,15-1,7	545-1030	1000-2000	3-9
Terre allégée	0,065-0,47	1000-1300	300-1200	1-7

Données tirées de l'étude bibliographique :  
« *Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review* » Giada et al. 2019

### Climatisation et chauffage naturels



Effet des changements de phases de l'eau dans un mur en pisé (Champiré et al., 2014)

# 6- Quelles applications?



## Exemple d'étude menée – Lien comportement mécanique avec caractérisation –base de données

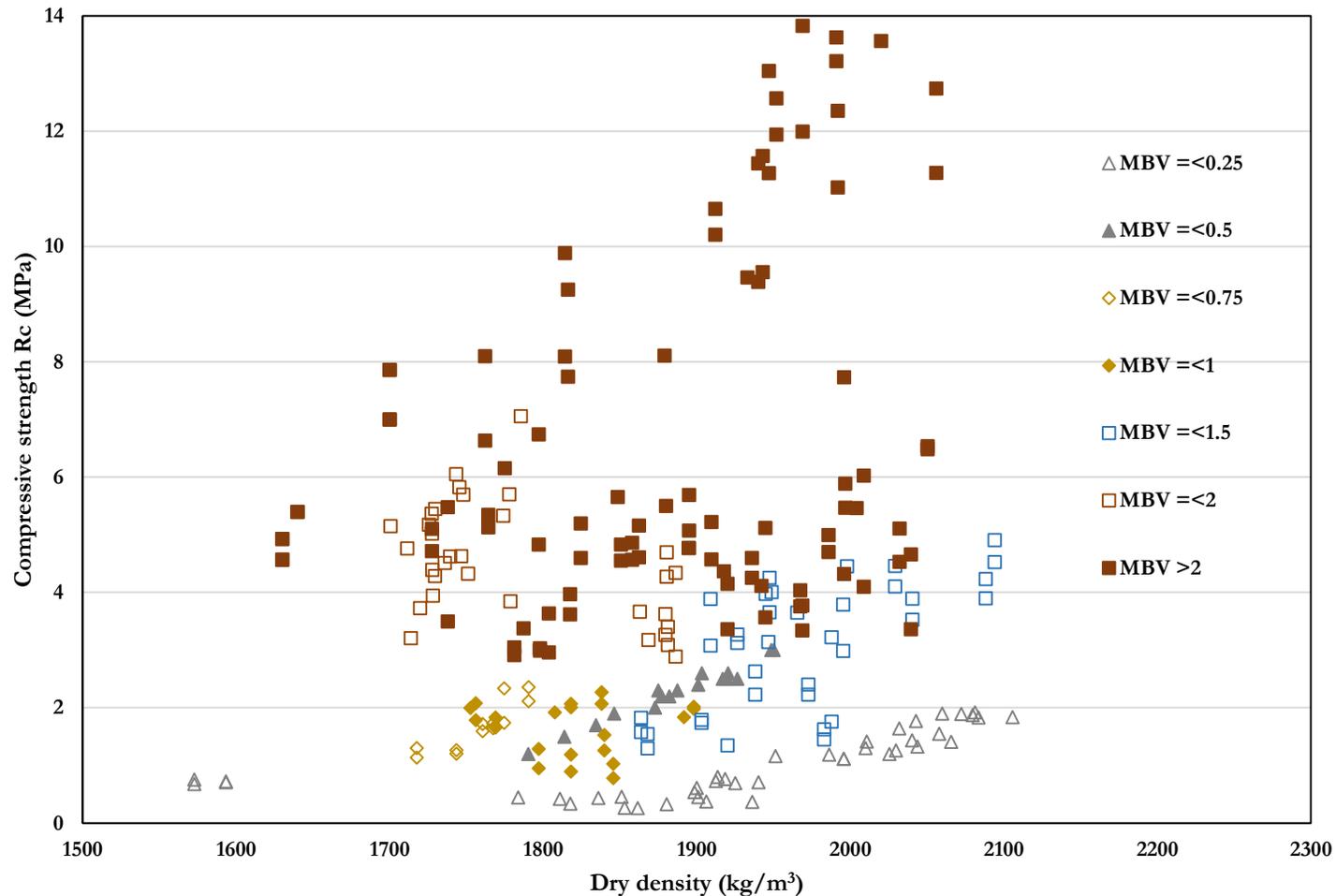
- 260 essais de compression
- 35 terres différentes
- 15 paramètres de caractérisation simples (Distribution granulométrique, Activité argileuse et limites d'Atterberg)
- 4 paramètres pour illustrer les essais de compression (Masse volumique sèche, résistance en compression, W% et élanement)

Earth properties															Compressive test results				
Earth code name	PSD (HA + Sieving) – Cumulative undersized particles mass (%)					PSD (LD + Sieving) - Cumulative undersized particles mass (%)					Clay activity		Atterberg's limits			Dry density (kg/m <sup>3</sup> )	R <sub>c</sub> (MPa)	Aspect Ratio	W %
	Clay (< 2 μm) (%)	Clay + Fine silts (2 - 20 μm) (%)	Clay + Fine silts + Coarse silts (20 - 50 μm) (%)	Clay + Silts + Fine sands (50 - 200 μm) (%)	Clay + Silts + fine sands + Coarse sands (0.2 - 2 mm) (%)	Clay (< 2 μm) (%)	Clay + Fine silts (2 - 20 μm) (%)	Clay + Fine silts + Coarse silts (20 - 50 μm) (%)	Clay + Silts + Fine sands (50 - 200 μm) (%)	Clay + Silts + fine sands + Coarse sands (0.2 - 2 mm) (%)	Methylene Blue Value	CEC (mEq/100g)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)				
35-Redon	10.82	35.59	44.06	66.72	94.99	2.56	54.09	62.64	73.87	96.02	0.5	3	36.5	21.8	14.7	1874.9	2.3	1	0
																1872.9	2	1	0
																1901.1	2.4	1	0
																1903.3	2.6	1	0
																1926.4	2.5	1	0
																1919.6	2.5	1	0
																1887.5	2.3	1	0
																1882.2	2.2	1	0
																1917	2.5	1	0
																1920.5	2.6	1	0
																1948.7	3	1	0
																1950.2	3	1	0
																1877.1	2.2	1	0
																1846.3	1.9	1	0
																1790.3	1.2	1	0
1834.4	1.7	1	0																
1813.9	1.5	1	0																

# 6- Quelles applications?



Exemple d'étude menée – Lien comportement mécanique avec caractérisation



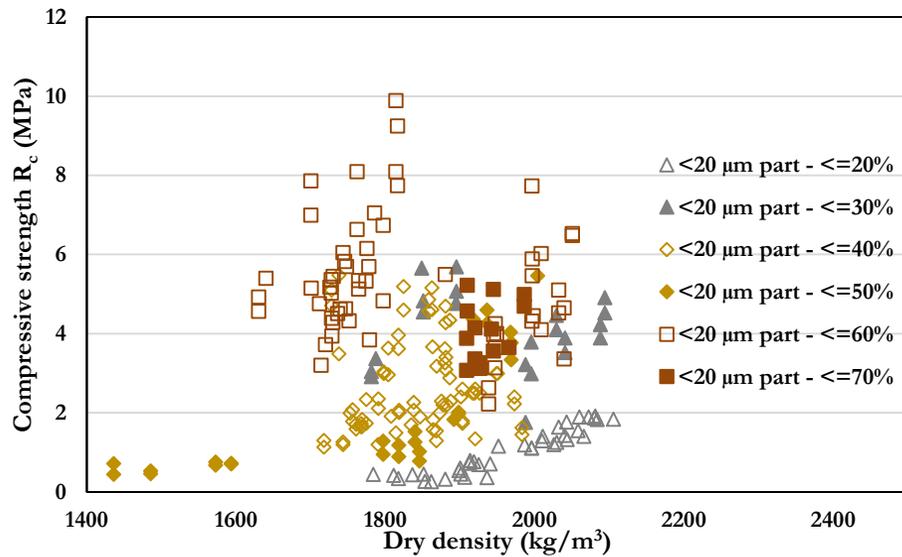
Ici MBV  $\rightarrow$  Methylene Blue Value  $\rightarrow$  VBS en français

# 6- Quelles applications?

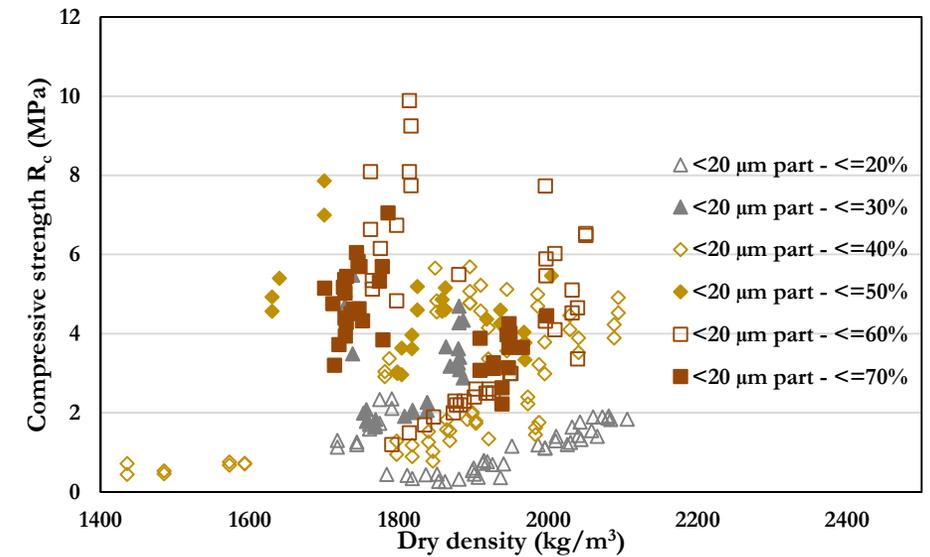


*Exemple d'étude menée – Lien comportement mécanique avec caractérisation*

## Sédimentométrie et tamisage



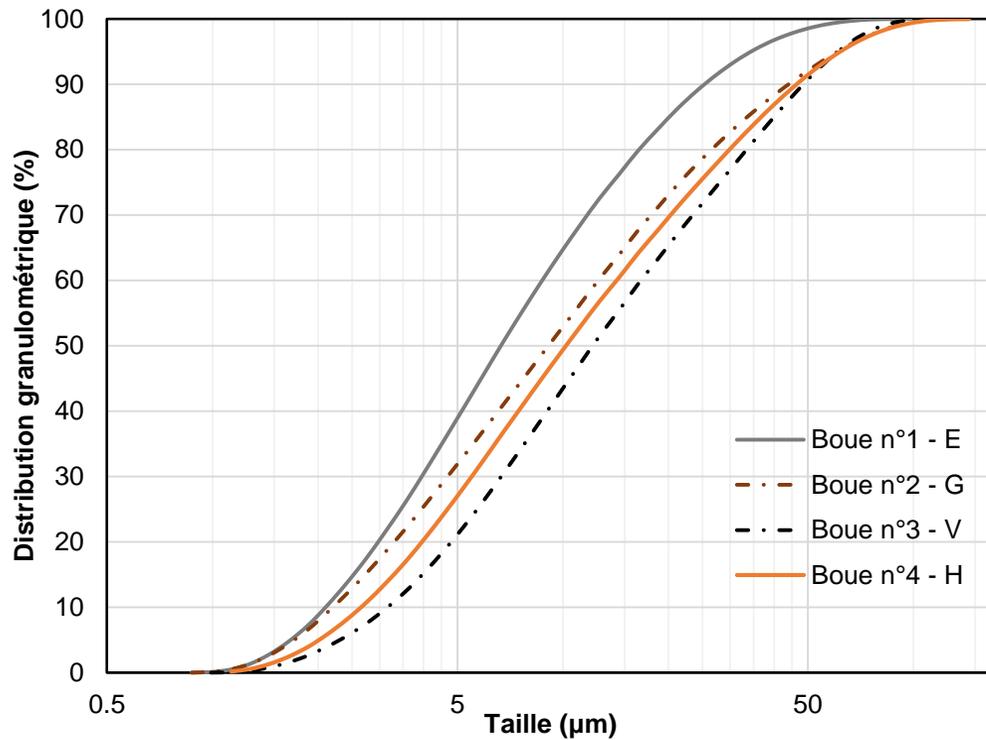
## Granulométrie laser et tamisage



# 6- Quelles applications?



Exemple d'étude menée – Formulation terre-chaux-chanvre – valorisation de boues de lavage



## Interactions avec l'eau

Études Géotechniques	Paramètre	Boue n°1 - E	Boue n°2 - G	Boue n°3 - V	Boue n°4 - H
Limites d'Atterberg	Fraction granulométrique étudiée	Totale	Totale	Totale	Totale
	$W_L$ (%)	30,2 %	29,9 %	22,5 %	27,7 %
	$W_p$ (%)	75,3 %	78,1 %	43,4 %	64,6 %
	$I_p$ (%)	45,1 %	48,2 %	20,9 %	36,9 %

## Propriétés de surface

Propriété	Fraction granulométrique considérée	Boue n°1 - E	Boue n°2 - G	Boue n°3 - V	Boue n°4 - H
VBS (g/100g)	Toute	1	3,96	0,95	2,1

# 6- Quelles applications?



*Exemple d'étude menée – Formulation terre-chaux-chanvre – valorisation de boues de lavage*

**Formulations d'échantillons terre-chanvre (chanvribat), stabilisés avec 10% de chaux PF70**

**Application souhaitée – Terre chanvre projeté**

- *4 Boues étudiées*
- *E/L différent visé pour chaque boue*
- *Iso-consistance visée pour les différentes barbotines – très fluide*
- *G/L constant = 5/9*

→ *Mesures de caractéristiques mécaniques et de conductivités thermiques*

→ *Influence nette de la boue utilisée sur ces propriétés ( $\rho$  et  $\lambda$ )*

→ *Variabilité à prendre en compte et à appréhender*

