

**« construction en terre »  
focus sur la fabrication et la construction  
en blocs de terre compressée**

**8 – fabrication et caractéristiques  
des BTC  
« Briques de Terre Compressée »**

# Construire en Terre ... est POSSIBLE

- Les conditions du succès :
  - Comprendre la raison de la grande diversité des constructions en terre
    - Variété des matériaux et des techniques
  - Impliquer toute la filière
    - Travailler sur l'intelligence collective
    - Mettre en place un contrôle qualité à toutes les échelles (bâtiment, paroi, matériau)

# Fabriquer des bons BTC ?

- Fabrication de BTC
  - Compactage
  - Identification des sols
  - Fabrication
    - Presse : matériels, optimisation
- Les essais de comportement mécaniques des BTC
  - norme XP13-901
    - compression, traction, capillarité
- Les autres caractéristiques des BTC

# Construire en terre

## 8.1 compactage, optimisation et fabrication des BTC

# Fabriquer des bons BTC ?

- Fabrication de BTC
  - « théorie » du Compactage  
→ pâte de sable
  - Paramètres
    - Teneur en eau
    - Effort de compression



# Fabriquer des bons BTC ?

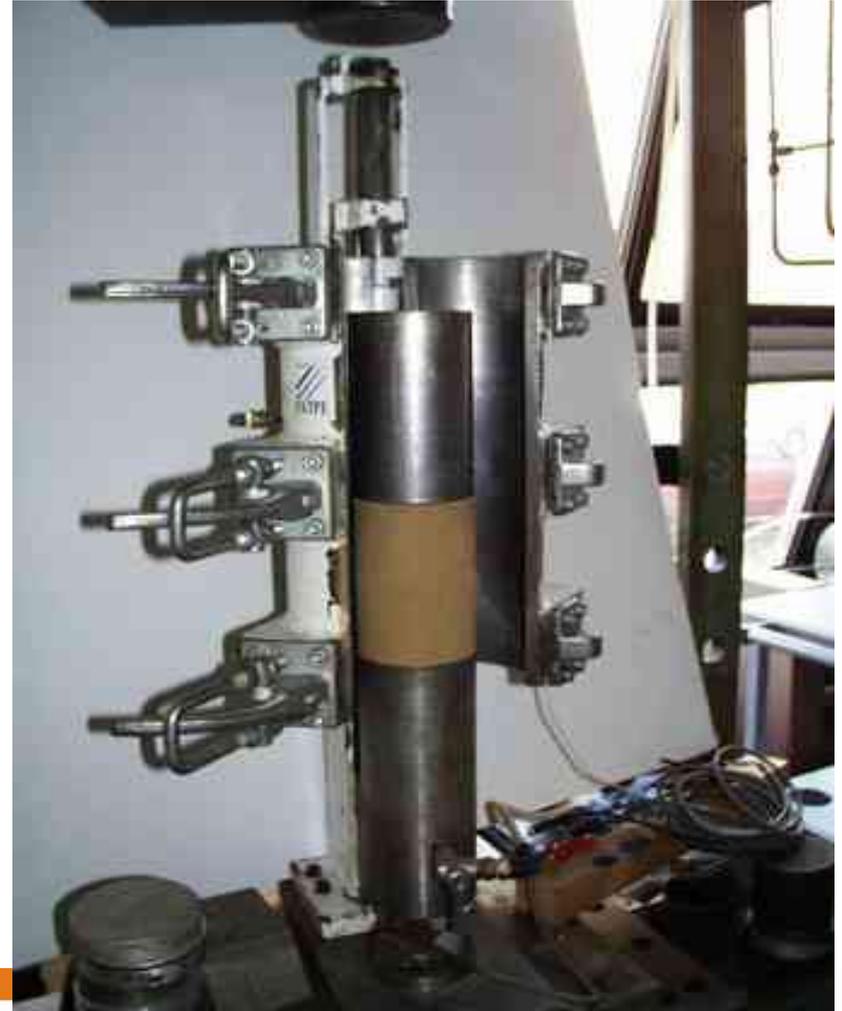
- Fabrication de BTC
  - « théorie » du Compactage
    - pâte de sable
  - Paramètres
    - Teneur en eau
    - Effort de compression
  - Méthode
    - Exercer un effort croissant de compression
    - Pratiquer un compactage dynamique

# Compactage « statique »

- Compactage statique
  - Avec une presse → augmentation pression  
<=> compactage Proctor → dynamique
- Compression pour augmenter
  - la compacité d'un sol
    - Réarranger et resserrer les grains afin de densifier le sol
    - En chassant l'air (pores ouverts)
  - la cohésion, par le séchage complet
    - Améliorer la résistance en compression
- Même mécanisme que pour les sols routiers

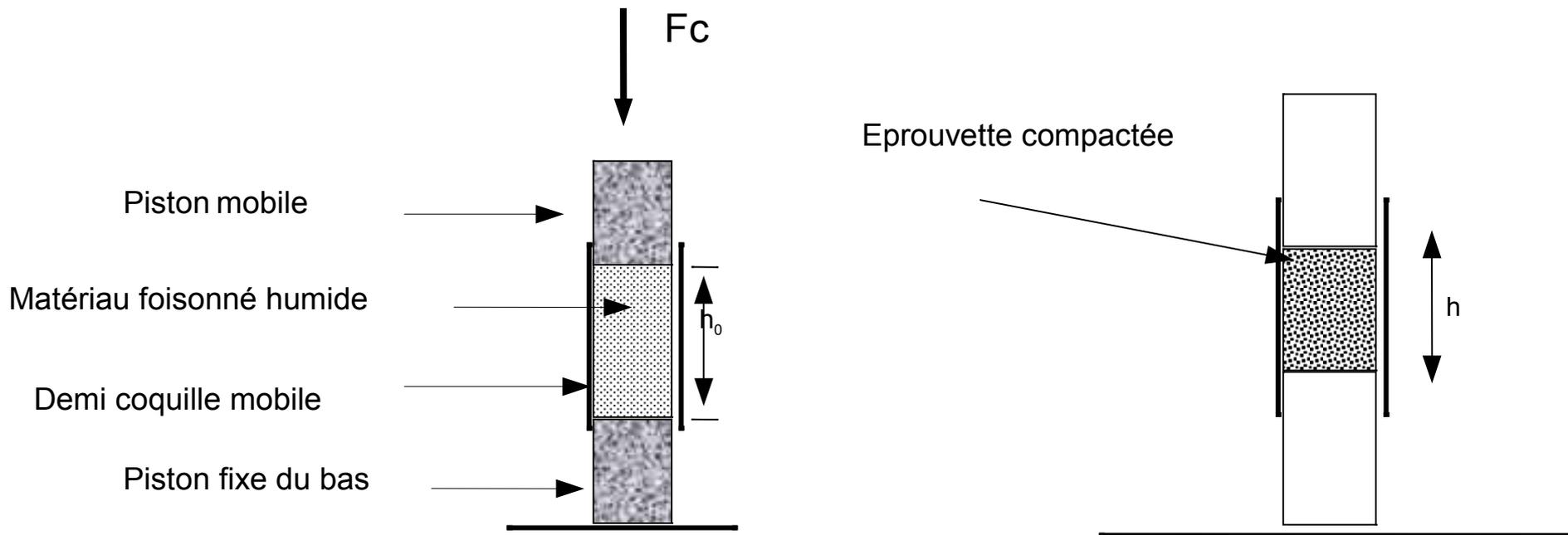
# Compactage « statique »

- Système de fabrication d'éprouvettes
  - Homogènes
    - double compression
  - Élancement  $> 1,5$  à  $2$



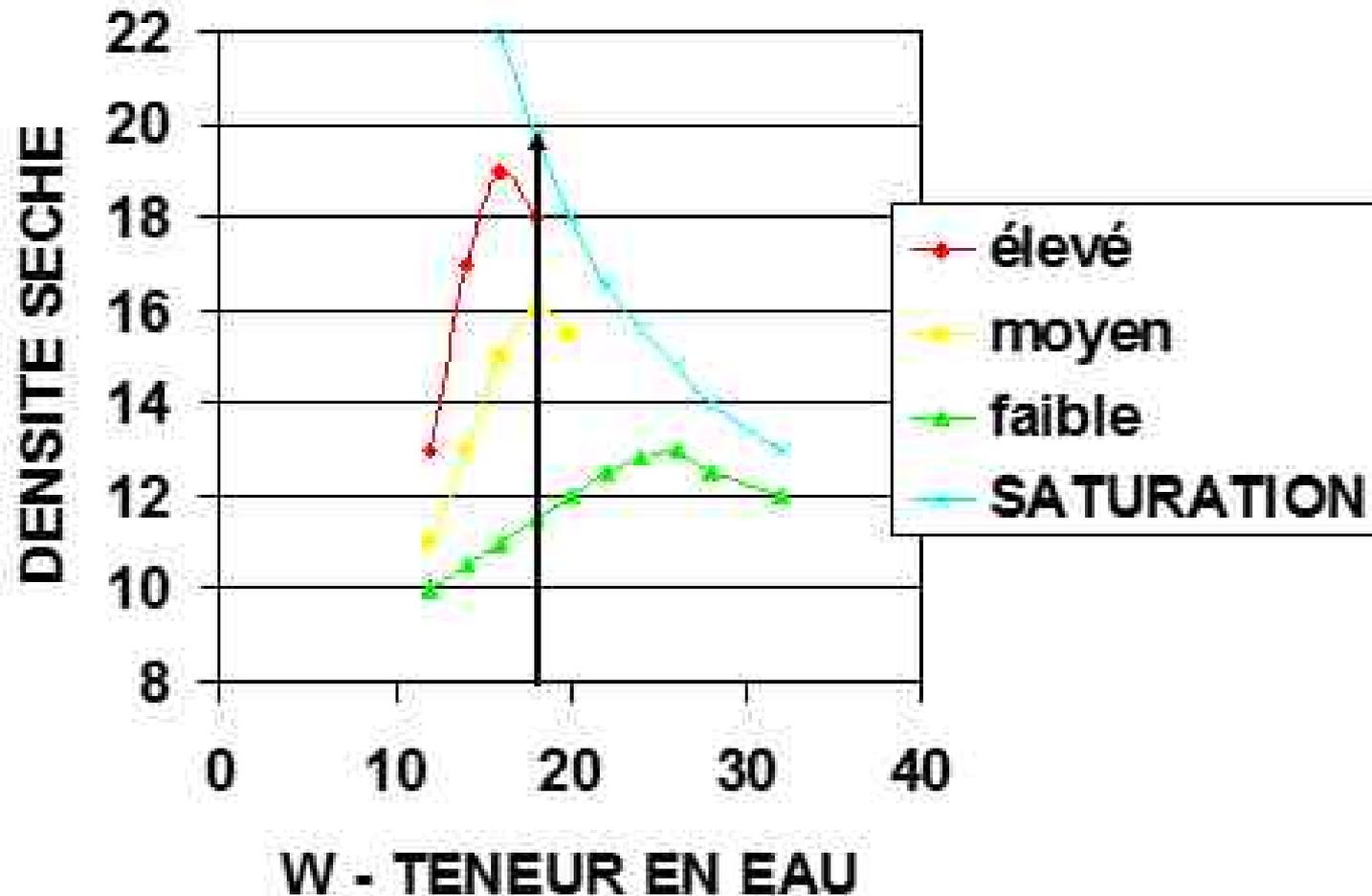
# Compactage « statique »

- Système de fabrication d'éprouvettes
  - Homogènes → double compression
  - + compacté en haut → simple compactage



# Compactage « statique »

- Courbe de compactage statique : impact de l'effort

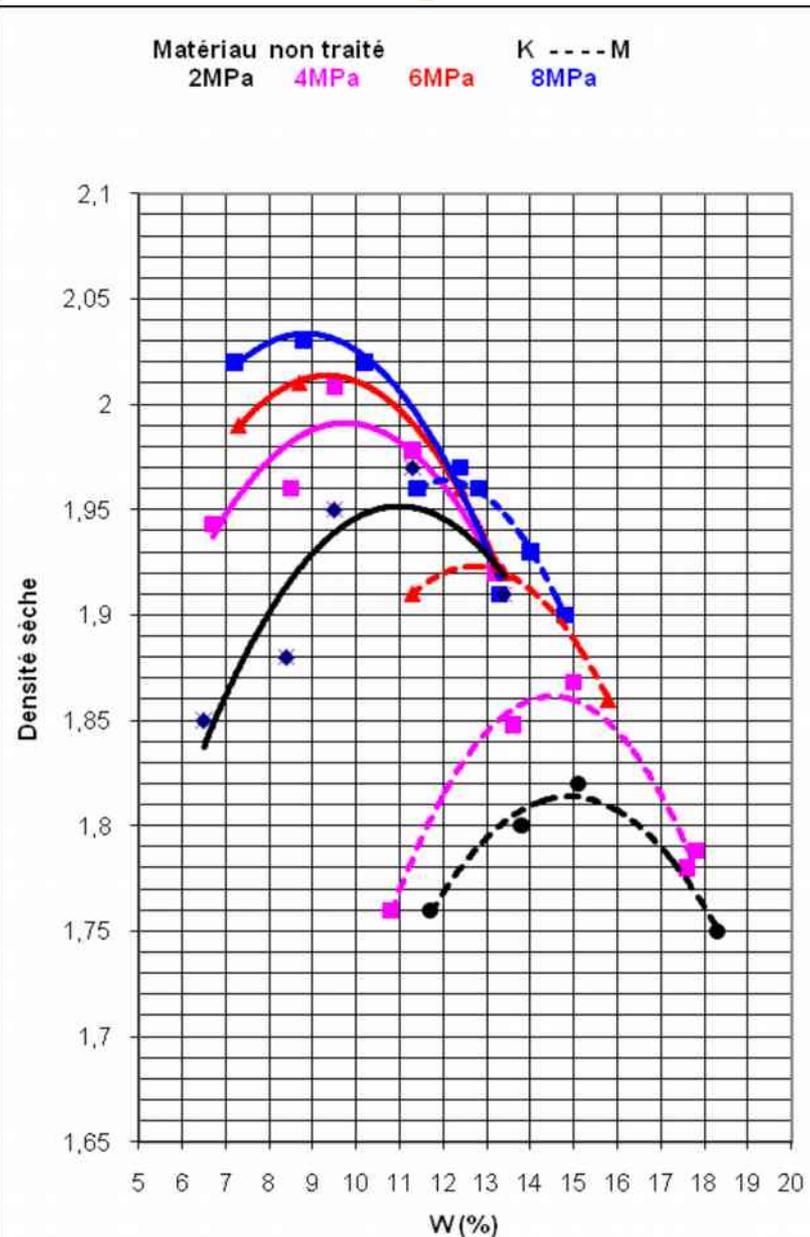


# Compactage « statique »

- Attention : Courbe de saturation
  - ne pas trop dépasser la teneur en eau optimale !
    - Saturation locale → Pores fermés  
=> mise en pression de l'air dans les pores
  - Ne pas compresser trop vite
    - l'air n'a pas le temps de s'évacuer du moule
- => matelassage
  - Apparition de fissures horizontales
    - Signe de la décompression du BTC

# Compactage « statique »

- Comparaison des 2 matériaux non stabilisés
  - Kaolin (proche de la latérite)
  - Montmorillonite



# Compactage « statique »

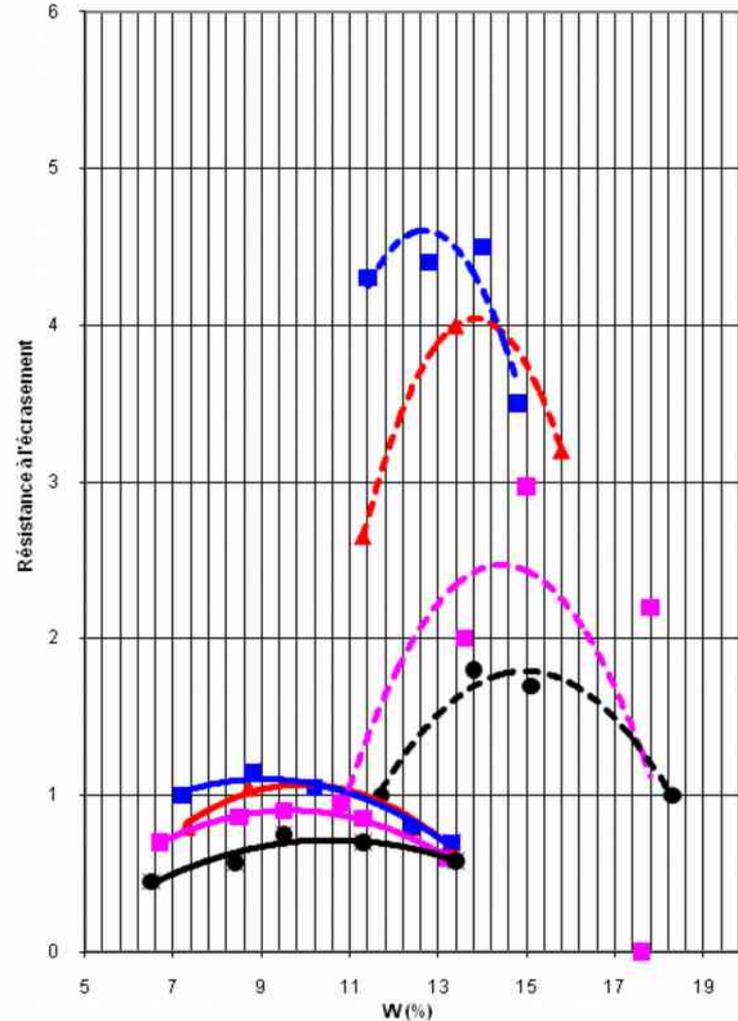
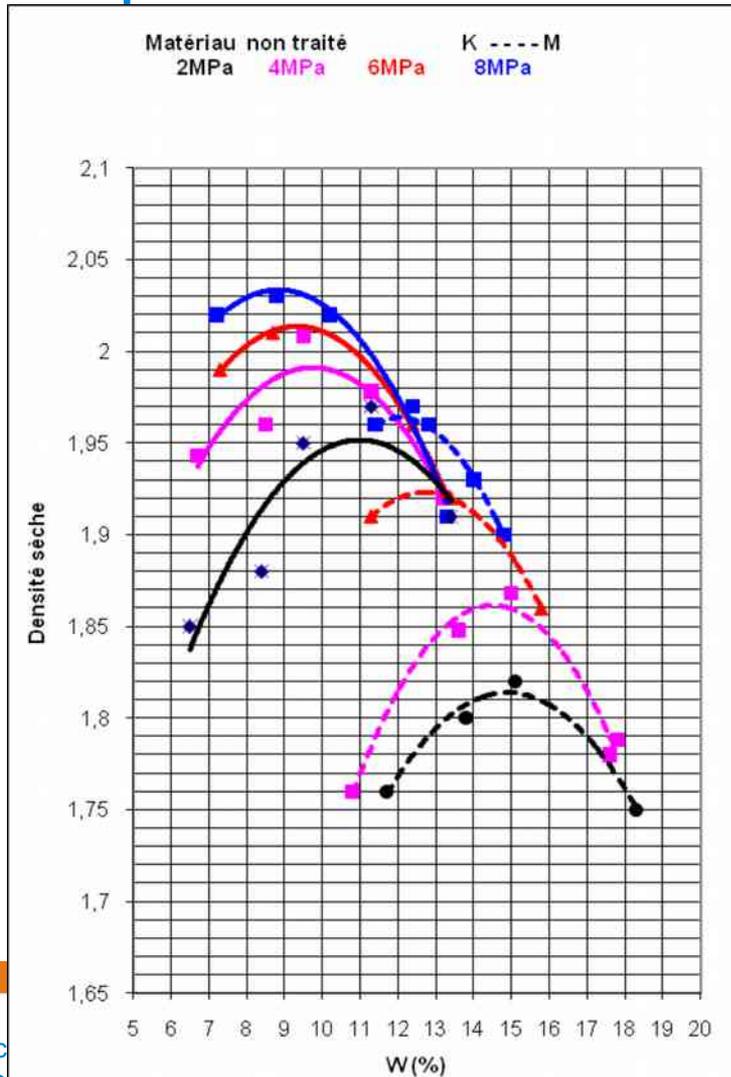
- Comparaison des 2 matériaux
  - $\gamma_d$  élevé  $\neq$   $R_c$  élevé !
  - $\gamma_d$  opt  $\Rightarrow$   $R_c$  opt
  - si  $\sigma$   $\nearrow$   $\Rightarrow$   $w$  opt  $\searrow$
- Résistance minimale pour un matériau porteur
  - Descente de charge  $R+1 = 0,1$  à  $0,2$  MPa
  - Coef de sécurité de 10 ( $R+0$ ) à 20 ( $R+1$ )
  - ATTENTION : tenue des BTC pendant le transport

# Compactage « statique »

- Cas particulier de la Guyane :
- Présence de **séricite**
  - variété de mica à grain très fin et à reflets verts
    - muscovite ou (plus rarement) paragonite.
    - Silicate naturel d'aluminium et de potassium ayant un éclat soyeux.
  - **Effet**
    - Matériau hydrophobe → difficile à malaxer avec l'eau
    - Identification
      - Séricite = Grains de 10 $\mu$ m : clairs et brillants
      - Argile : couleur foncée

# Compactage « statique »

- Comparaison des 2 matériaux :  $\gamma_d$  et  $R_c$



# Compactage « statique »

## Constations générales

- Correspondance entre densité et résistance : pour chaque effort de compactage,
  - l'optimum de densité correspond à l'optimum de résistance
- Pour chaque contrainte de compression statique
  - Courbe densité sèche / teneur en eau compactage
  - résistance / teneurs en eau

# Compactage « statique »

## Constations générales

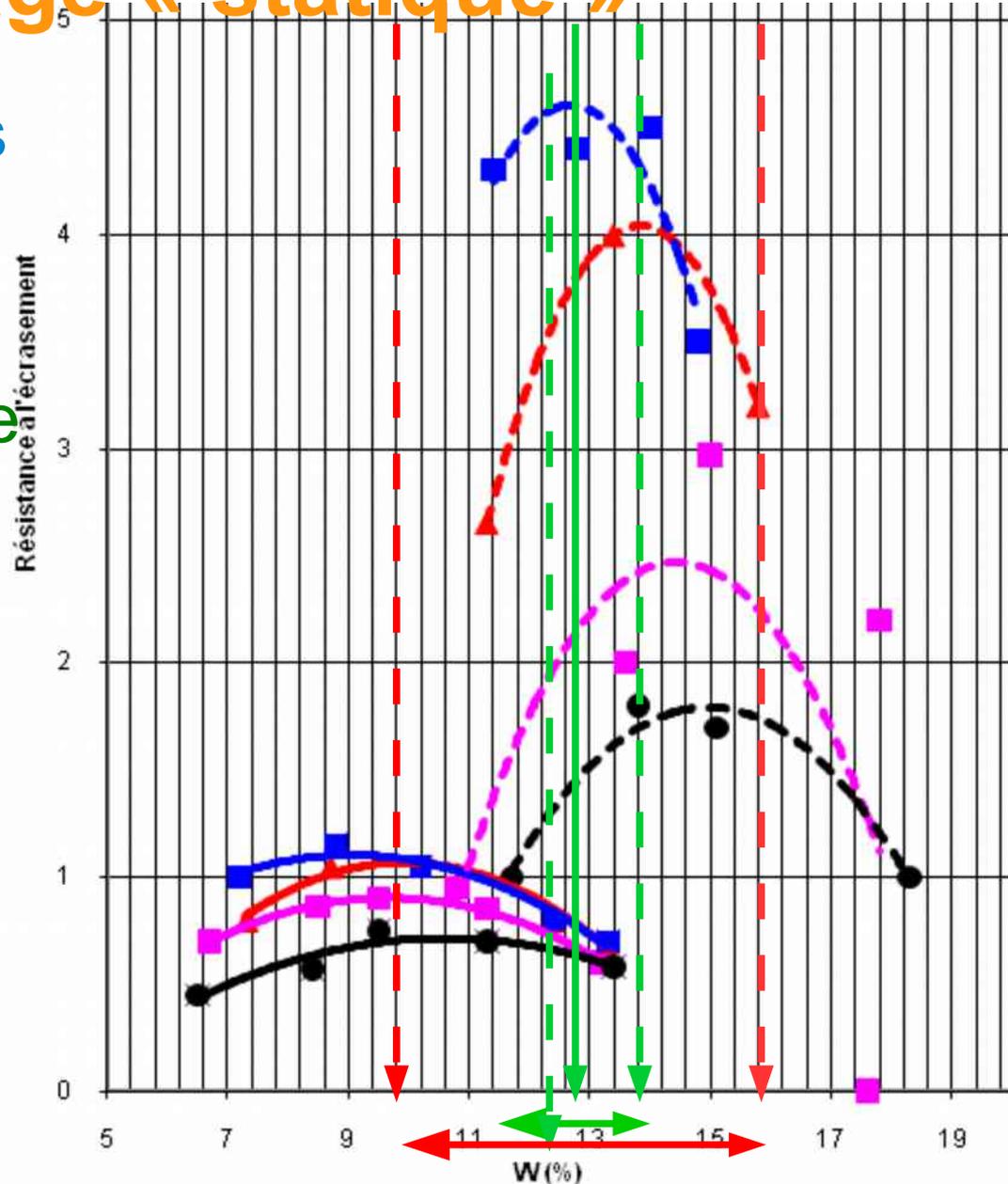
- Correspondance entre densité et résistance
- Courbes compactage / résistance
  - Base de la procédure d'optimisation des BTC
    - Déterminer le couple optimal  $\sigma$  -  $w$
  - Base du système de contrôle-qualité
    - Pour  $\sigma$  imposée  $\rightarrow w$  optimal
    - Si  $w$  varie de +/- 1 % , Rc baisse de 5 %
    - Si  $w$  varie de +/- 3 % , Rc baisse de **50 %**

# Compactage « statique »

- Constatations générales

- Impact de la variation de  $w$
- Courbe compactage rouge

- — — — — +/- 1 %
- - - - - +/- 3 %



# Cure des matériaux

- Matériaux NON STABILISES
  - Cure des BTC = séchage
    - Évaporation de l'eau libre
      - Passage de 10 à 15 % de teneur en eau de fabrication
      - À 1 à 3 %
    - Mécanisme de séchage
      - Gradient de teneur en eau  
=> tension à l'intérieur du matériau
- conditions hygrothermiques

# Cure des matériaux

- Matériaux NON STABILISES
  - Cure des BTC = séchage
    - En métropole
      - Température 20 à 25°C & Hygrométrie : 60 %  
→ temps de séchage ~ 15 jours
    - En Guyane
      - Température 25 à 35°C
      - Hygrométrie :
        - saison sèche 60 % → temps de séchage ~ 15 jours
        - Saison humide 90 à 100 % → temps de séchage ~ ??? jours
- => fabrication des BTC en SAISON SECHE !

# Stabilisation des matériaux

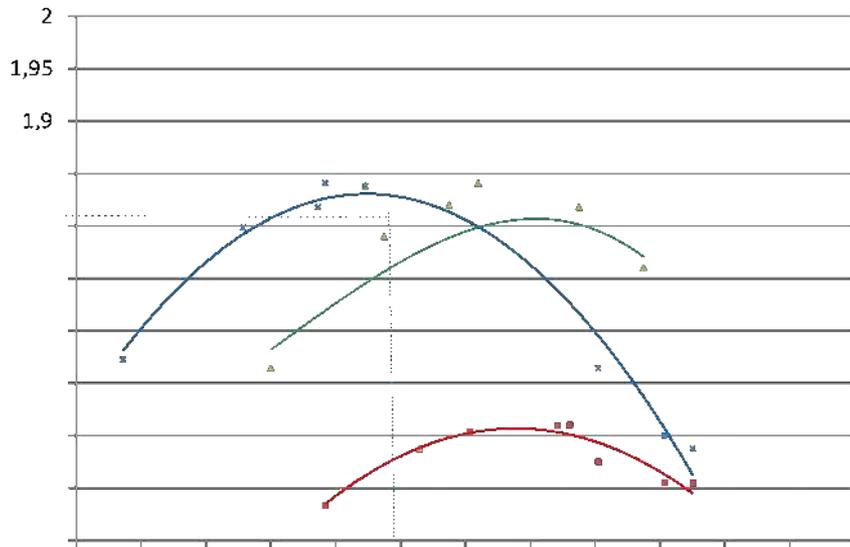
# Pourquoi stabiliser la terre ?

- Augmenter la résistance à sec
  - $R_c$  nécessaire pour un  $R+0 = 1\text{MPa}$
- Obtenir une résistance humide
  - Si nécessaire
    - Pas de protection à la pluie des murs
    - Bas de mur dans l'eau
    - Remontées capillaires
- Par facilité 😞 !
  - Inutile d'optimiser le matériau !

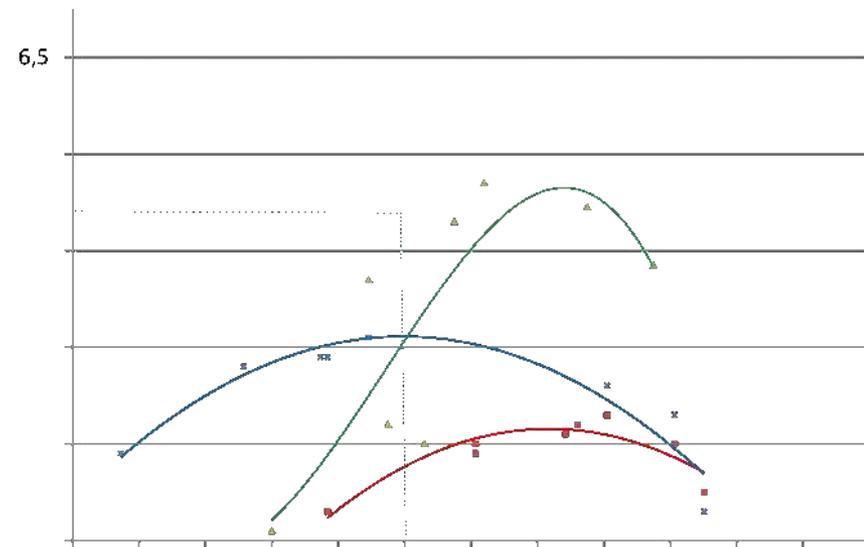
# Stabilisation de la terre

- Effet du liant sur la teneur en eau optimale
  - Correspondance entre  $W_{opt}$  et  $Rc_{opt}$

Courbes d

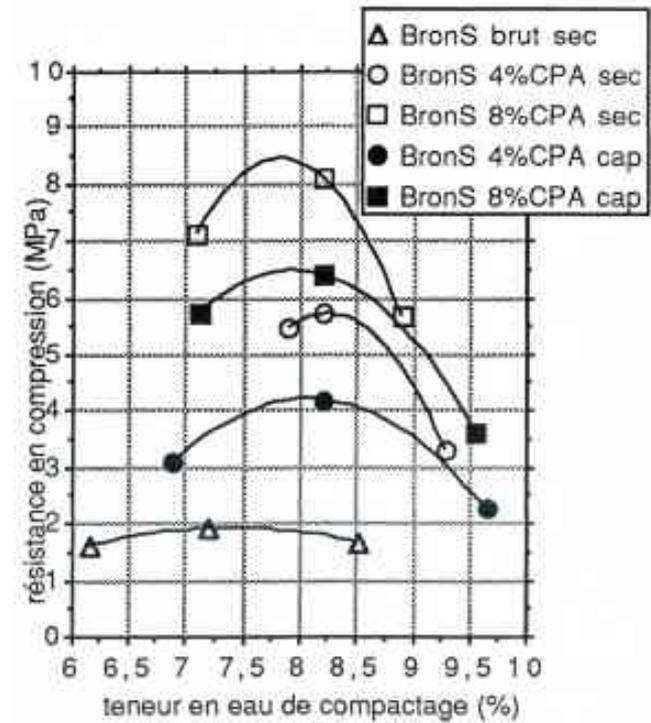
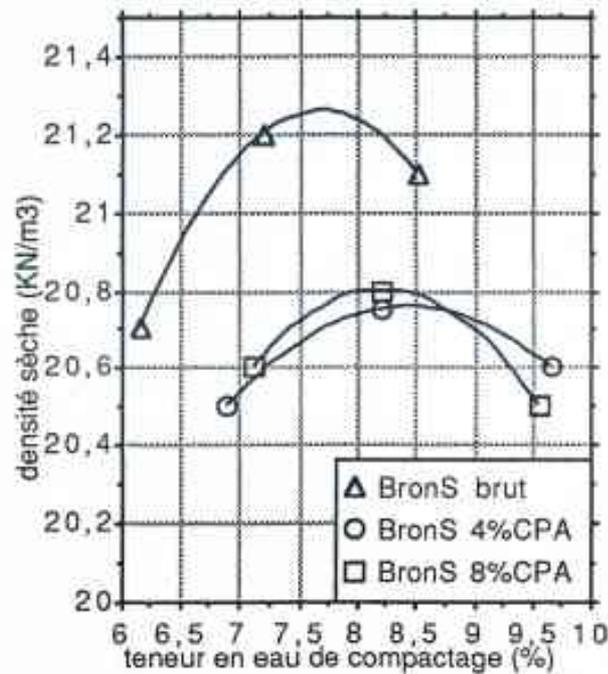


Resis



# Stabilisation de la terre

- Argile = Kaolin ou Latérite
  - Stabilisation au ciment
    - Teneur en eau optimale ↗ : à déterminer
    - Même force
    - Rc ↗↗



# Stabilisation de la terre

- Effets de la stabilisation au ciment (argile kaolin)
  - Amélioration importante des résistances à sec
  - Acquisition d'une résistance mécanique
    - Capillarité
    - Immersion
  - Amélioration de la résistance à l'érosion
- Norme XP P13 901
  - Modalités d'essais

# Construire en terre

## Fabrication des BTC

1 - Mécanisme d'optimisation

2 – Matériels de fabrication

# Fabrication de blocs BTC

- 2 grandes familles presses ... presque !
  - Presses hydrauliques
    - Vérin hydraulique qui délivre une force  
→ donc une contrainte sur le matériau
  - Presses mécaniques ou manuelles
    - Levier ou came elliptique qui déplace un fond de moule  
→ donc tasse le matériau

# Paramètres à suivre pour

- Optimiser la fabrication de BTC
  - Presses hydrauliques
    - Force imposée
    - $W$  : teneur en eau  $\rightarrow$  mesure de la densité sèche  $\rightarrow W$  optimal
    - Poids du sol humide  $\rightarrow$  Remplissage maximum
  - Presses manuelles et mécaniques
    - Force appliquée : fonction du remplissage
    - $W$  : teneur en eau
    - mesure de la densité sèche  $\rightarrow$  Poids du sol humide
    - Volume de remplissage optimal

# Paramètres à suivre pour

- Contrôler la qualité de la fabrication
  - $W$  : teneur en eau optimale  $\pm 1$  % maxi
  - $h$  : hauteur des blocs  $\rightarrow$  constant  $\pm 1$  mm
  - Densité sèche  $\rightarrow$  constant  $\pm 0,1 \text{ kN/m}^3$   
= poids humide / (volume \* (1+w))

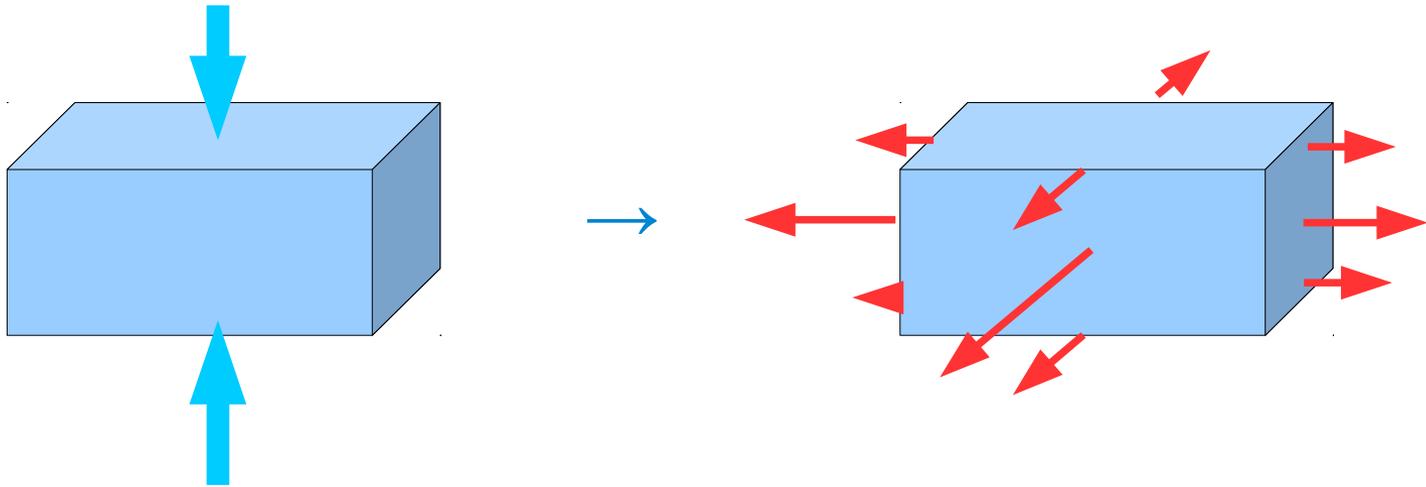
# Paramètres à suivre pour

- Vérifier les BTC à la réception
  - h : hauteur des blocs → constant  $\pm 1$  mm
  - Densité sèche → constant  $\pm 0,1\text{kN/m}^3$
  - Caractéristiques mécaniques nécessaires pour la conception du bâtiment
    - Rc à sec  
et si nécessaire
    - Rc humide
    - Résistance à l'abrasion

# Évaluation des caractéristiques mécaniques des BTC Norme XP-P 13 901

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Écraser un bloc parallélépipédique sous une presse



→ la valeur à la rupture

>> « vraie » résistance en compression simple

- Norme XP 13-901

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Norme XP 13-901
  - 1- caractéristiques des BTC
    - Physiques : tolérances
    - Mécaniques : classification des blocs selon
      - Compression à sec
      - Résistance humide
      - Résistance à l'abrasion
  - 2- méthodes d'essais
    - Résistance à sec, humide, abrasion
    - Résistance à l'état humide

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Norme XP 13-901
  - essai en compression simple, à sec  
→ valeur représentative d'une maçonnerie

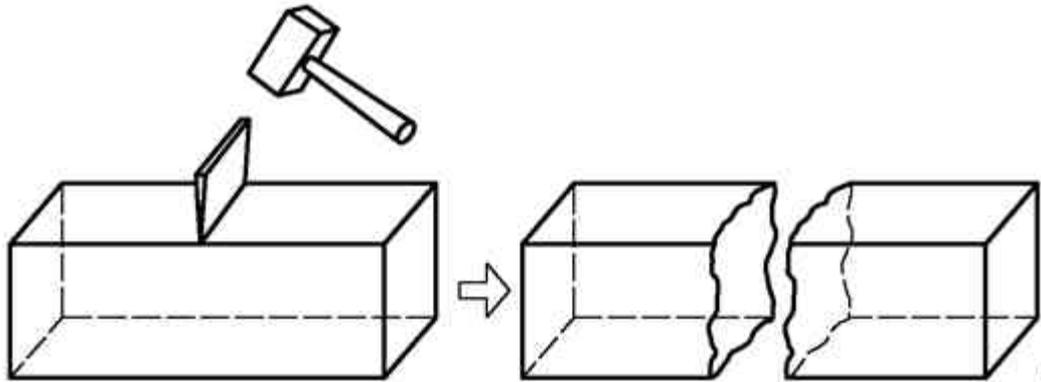


Figure 10.—Coupe du bloc en deux demi-blocs

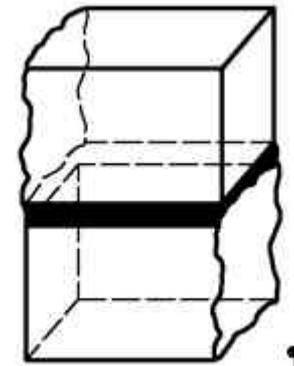


Figure 11.—Superposition des deux demi-blocs

- $R_c = F(\text{rupture}) / \text{Surface d'appui}$

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Norme XP 13-901
  - Essai de résistance à l'abrasion

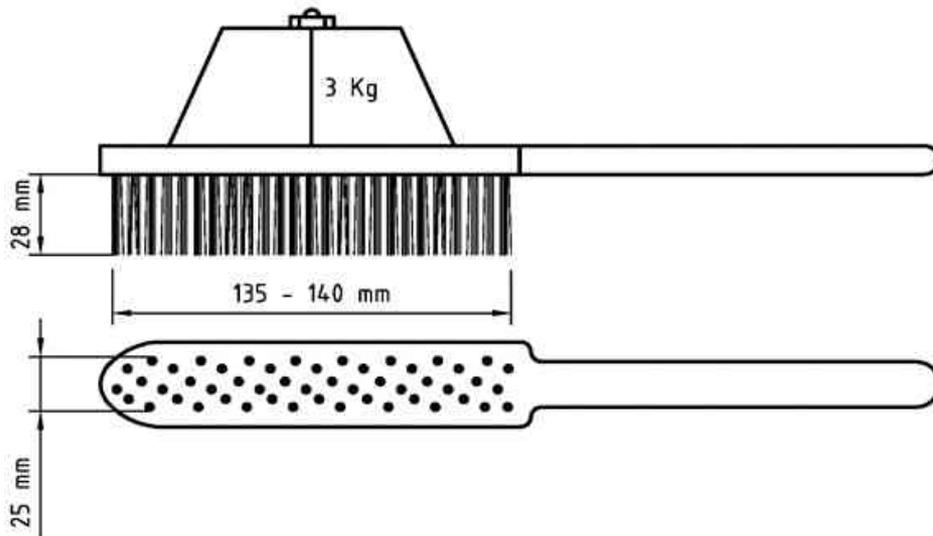


Figure-12.—Brosse-d'acier-pour-essai-d'abrasion

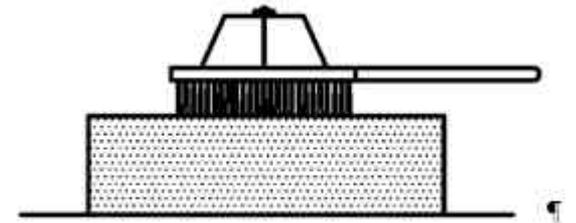


Figure-13.—Dispositif-pour-essai-d'abrasion

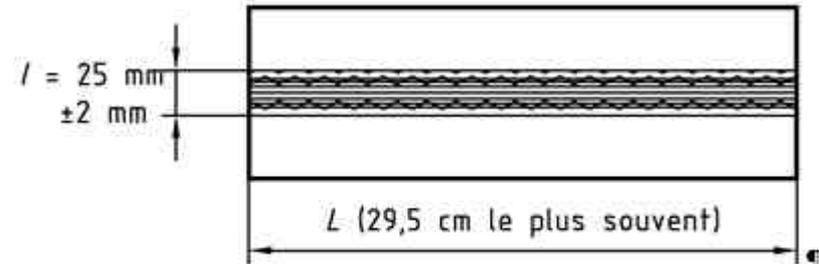


Figure-14.—Calcul-de-la-surface-de-brossage

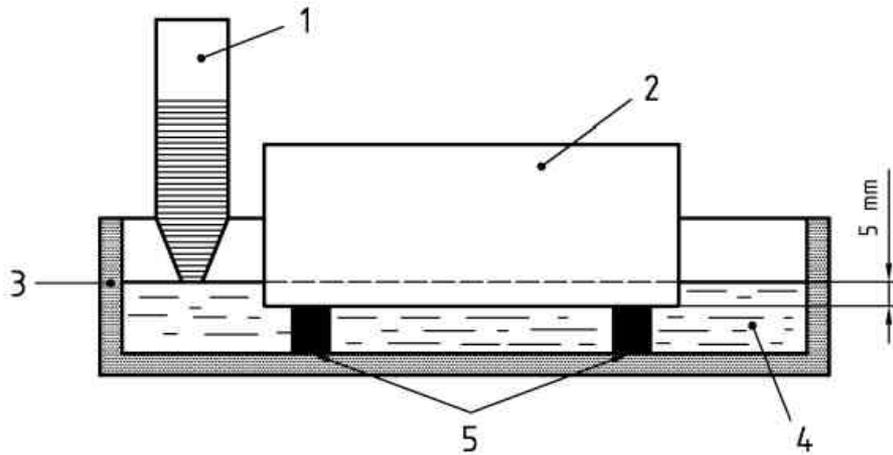
→ Mesure de la perte de matériau

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Effets de la stabilisation au ciment (argile kaolin)
  - Amélioration importante des résistances à sec
  - Acquisition d'une résistance mécanique à l'état humide
    - Capillarité
    - Immersion
  - Amélioration de la résistance à l'érosion

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Absorption d'eau par capillarité

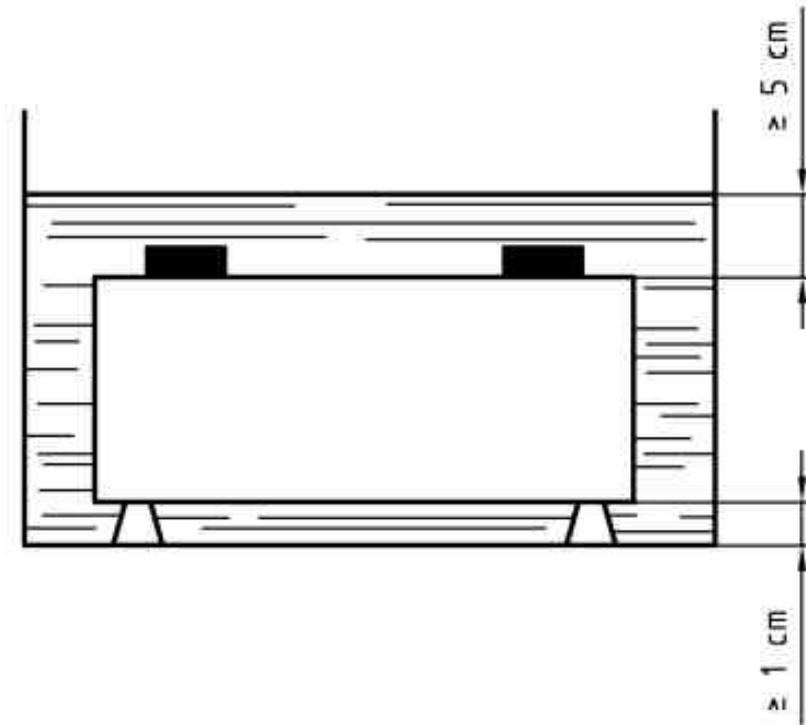


$$C_b = \frac{100 M}{S \sqrt{t}} = \frac{100 (P_1 - P_0)}{S \sqrt{10}}$$

- Quantité d'eau absorbée pdt 10 mn :  $C_b$
- ?? capacité à conserver l'intégrité des blocs

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

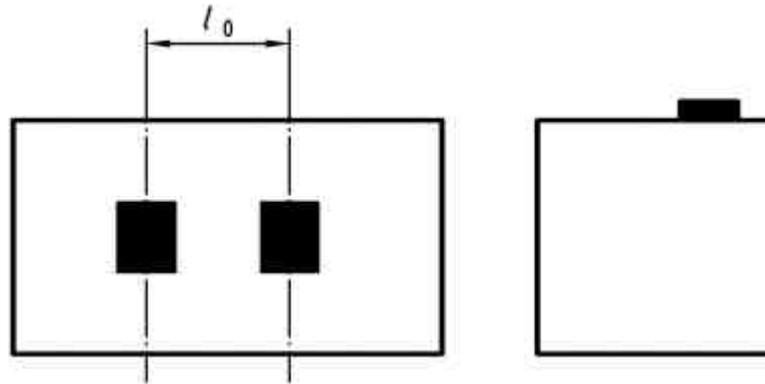
- Résistance après immersion



- Essai de résistance après immersion de 2 h
- ?? capacité à conserver l'intégrité des blocs

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Autres essais prévus par la norme
  - Variations dimensionnelles
    - Séchage : température compris entre 33 et 45°C
    - Gonflement par immersion : 96 heures (!)  
→ mesure de l'allongement entre 2 plots fixes



- Attention: pas facile de coller des plots sur la terre !

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

- Norme XP 13-901
  - En cours de révision
    - Revoir les classes de résistance
      - Introduire une classe à  $R_c=1\text{MPa}$  ??
    - Revoir les tolérances sur les caractéristiques physiques
    - Introduire les briques extrudées
    - Supprimer les annexes
  - Lancé en 2015 → ??

# Essais mécaniques sur les blocs de terre compressée

Quels essais nécessaires / utiles en Guyane ?

- Essais de résistance en compression simple
  - À sec ou après immersion ou capillarité
    - « facile » à réaliser en Guyane
- Essais d'absorption capillaire
  - « facile » à réaliser en Guyane
- Essais d'immersion
  - Utile ?
- Essai d'érosion
  - « facile » à réaliser en Guyane

# Construire en terre

## 8.3 Quelles caractéristiques Mécaniques & Hygro-Thermiques des BTC et autres matériaux ?

# Comportement mécanique ... complexe

- Dépend ... du matériau de base
  - granulométrie
  - type d'argile
  - liants
  - fibres
- Dépend ... du produit
  - technique de mise en œuvre
  - teneur en eau
  - densité sèche
    - à la fabrication,
    - après séchage et retrait

# Terre modelée/compressée porteuse

## Caractéristiques mécaniques

	Adobe et enduits	BTC et pisé
Résistance en compression	0,1 à 0,5 Mpa ... et plus selon les liants	0,2 à 4 Mpa ... et plus selon les liants
Résistance en traction (fendage)	0,1 à 0,2 x Rc ... et plus selon les fibres	0,1 à 0,2 x Rc
« module » d'élasticité	<ul style="list-style-type: none"><li>• sec, non stabilisé : 20 à 100 MPa</li><li>• sec, stabilisé : → 350 MPa</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• sec, non stabilisé : 100 à 1000 MPa</li><li>• sec, stabilisé : → 3500 MPa</li></ul>

# Terre modelée/compressée

## Caractéristiques thermiques

- conductivité thermique  $\lambda$  : fonction de la densité
  - isolation

matériau	Densité sèche en $\text{kN/m}^3$ ( $\text{t/m}^3$ )	$\lambda$ en $\text{W / m . K}$
(réf : laine de verre)	0,02	0,035
terre-paille	3 à 12	0,10 à 0,45
torchis	4 à 14	0,12 à 0,5
Adobe, Enduits	12 à 15	0,4 à 0,6
Pisé	17	0,6 à 1
BTC, briques extrudées	20 ( $2 \text{ t/m}^3$ )	1 à 1,2

# Caractéristiques thermiques

- C capacité thermique massique
  - (ex chaleur massique) en (**J/kg.K**, Wh/kg.K)
- $\rho C$ :chaleur volumique (**J/m<sup>3</sup>.K,Wh/m<sup>3</sup>.K**)      1Wh=3600J  
→ Capacité de stockage de chaleur/ calories

matériau	C en J/kg.K	$\rho C$ en Wh/m <sup>3</sup> .K
aluminium	890	667,5
acier	476	1031,3
Bois 'lourd '	1500	375,0
Bois 'léger'	2400	266,7
béton	1000	555,6

# Caractéristiques thermiques

- C capacité thermique massique (**J/kg.K**, Wh/kg.K)
- $\rho C$ : chaleur volumique (**J/m<sup>3</sup>.K**, Wh/m<sup>3</sup>.K)      1Wh=3600J

matériau	C en J/ kg.K	$\rho C$ en Wh/m <sup>3</sup> .K
bois	1500 à 2000	350 à 220
Terre-paille / torchis	1600 à 900	400 à 150
Adobe, Enduits	500	220
Pisé , BTC	1200 à 1500	600 à 800
Parpaings de ciment	300	550
béton	1000	550

# Caractéristiques thermiques

- Diffusivité ou « a »
  - $a = D = \lambda / (\rho C)$  en  $m^2/s$
  - Plus la diffusivité est élevée  
→ plus la vitesse de transmission est rapide

matériau	a(diffusivité) $10^{-6}m^2/s$
bois	0,12
Terre-paille / torchis	0,06
Adobe, Enduits	0,16
<b>Pisé , BTC</b>	<b>0,25</b>
Parpaings de ciment	0,26
<b>béton</b>	<b>0,55 à 0,8</b>

# Caractéristiques thermiques

- Effusivité

- $E = \sqrt{(\lambda\rho C)} = \rho C\sqrt{D}$  en  $J/m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}$
- Plus l'effusivité est élevée → plus le matériau est capable d'absorber l'énergie sans se réchauffer → réguler l'ambiance intérieure

matériau	E en $J/m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}$
bois	0,1 à 0,18
Pisé	0,35
<b>BTC</b>	<b>0,45</b>
<b>Béton</b>	<b>0,45</b>
PSE	0,01

# Comportement hygro-thermique

- Perméabilité à la vapeur d'eau →  $\mu$  : fonction de la porosité, des matériaux, de la teneur en eau ...
  - $\mu = 1$  pour l'air
  - $\mu$  : 3 (terre-paille), 6-9 (enduit terre), 5-10 (pisé, BTC)
  - $\mu > 50$  : matériau pare-vapeur
    - Enduits ciment / béton : 80 à 100
    - Briques cuites : 50 à 100
- **ATTENTION** aux barrières étanches → condensation
  - Conception des parois en terre

# Résumé

- comportement thermique : La terre
  - Ralentit plus la pénétration de la chaleur dans la paroi que le béton
  - Est (un peu) plus isolante que le béton
  - A une effusivité identique au béton
    - meilleur confort d'été avec la terre
- Comportement mécanique
  - $R_c = 1\text{MPa}$  → OK pour R+0 ou remplissage
  - Protection contre l'eau LIQUIDE obligatoire