

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

2 – le compactage de la terre

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

2 – le compactage de la terre

2.1 comportement en laboratoire

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)

Compactage des sols routiers

Compactage des sols routiers

- Compactage:
 - Action mécanique pour augmenter la compacité d'un sol :
 - en réduisant les possibilités de déformation
 - en améliorant la capacité portante
- Mécanisme :
 - apport de la contrainte dynamique ou statique
 - chasser l'air présent dans le matériau foisonné,
 - réarranger et resserrer les constituants afin de densifier le sol

Compactage des sols routiers

- Compactage dynamique – essais PROCTOR:
 - Essai de laboratoire permettant de définir
 - les paramètres optimaux (w_f & γ_d),
 - pour une énergie donnée
 - pour la réalisation des sols en remblais et/ou en couche de forme.
 - NF P 94 093
 - Proctor normal
 - Proctor modifié

Compactage des sols routiers

- Compactage dynamique – essais PROCTOR



Compactage des sols routiers

- Compactage dynamique – essais PROCTOR



Compactage des sols routiers

- Compactage dynamique – essais PROCTOR:

Courbe de saturation

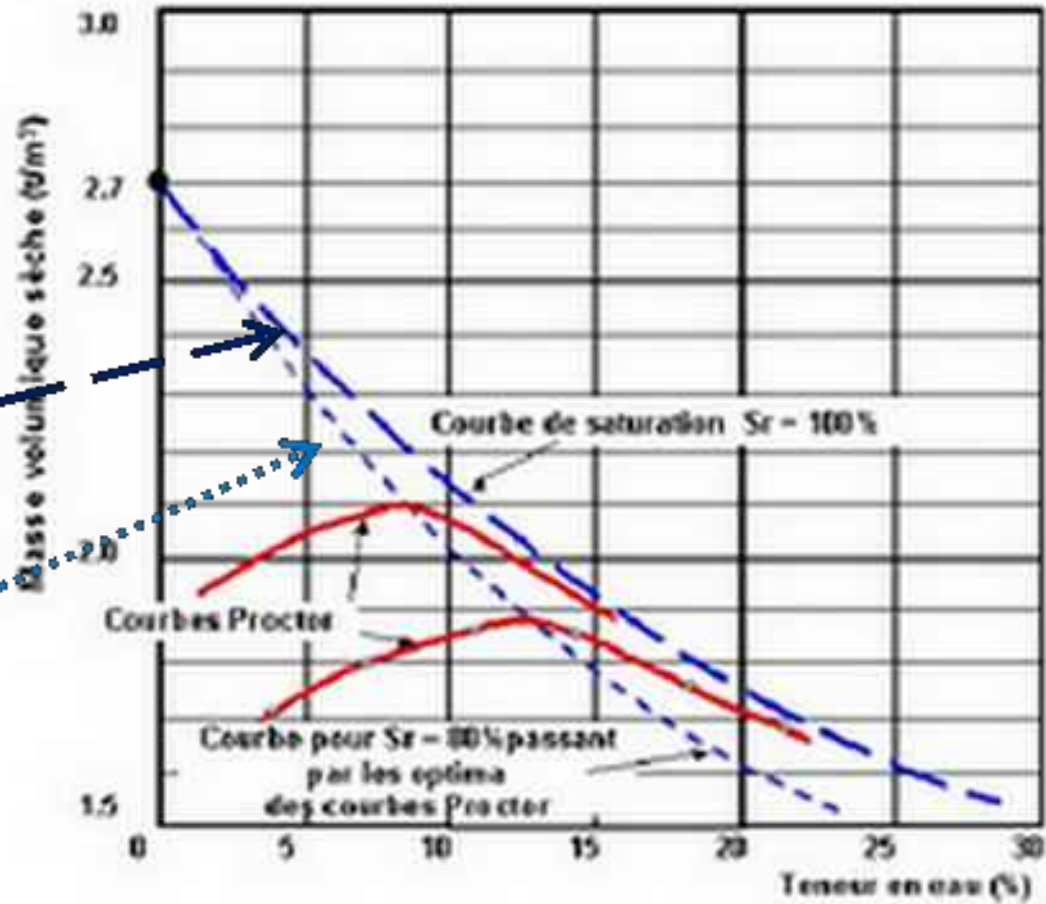
$$\rho_d = \frac{\rho_w}{\frac{w}{S_r} + \frac{\rho}{\rho_s}}$$

$$S_r = 100 \%$$

$$\gamma_d = \gamma_s / (1 + w \cdot \gamma_\sigma / \gamma_\omega)$$

$$S_r = 80 \%$$

$$\gamma_d = \gamma_s / (1 + 1,25 \cdot w \cdot \gamma_\sigma / \gamma_\omega)$$

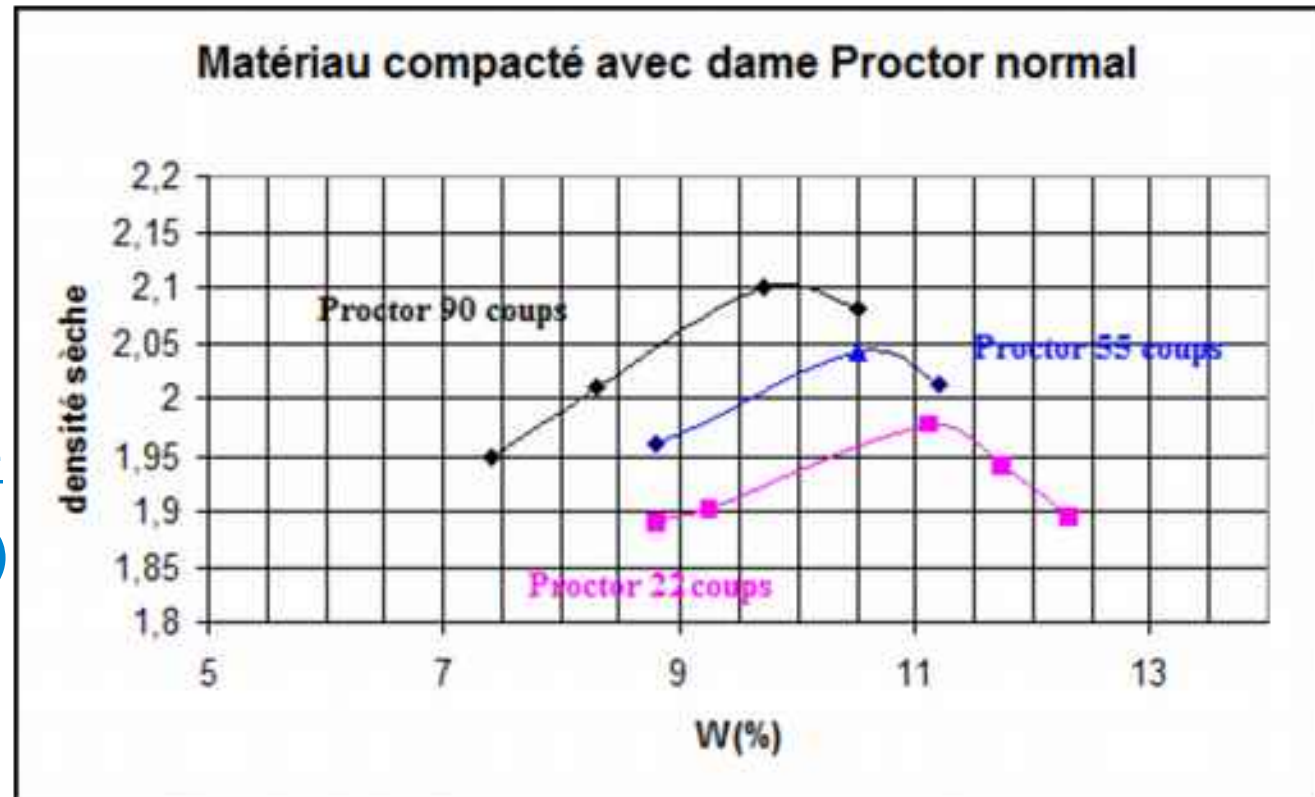


Compactage des sols routiers

- Compactage dynamique – essais PROCTOR:

$$\gamma_d = \frac{\text{masse sèche}}{\text{volume}}$$

$$\gamma_d = \frac{\text{masse humide}}{\text{volume (1 + w)}}$$



Compactage des sols routiers

- Compactage dynamique – essais PROCTOR:
 - On ne peut pas utiliser les éprouvettes Proctor pour mesurer les caractéristiques mécaniques
 - Ces éprouvettes **ne sont pas homogènes**



Compactage des matériaux pour la construction en terre

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)
 - Augmenter la cohésion par le séchage complet
 - Améliorer la résistance en compression
- Même mécanisme que pour les sols routiers

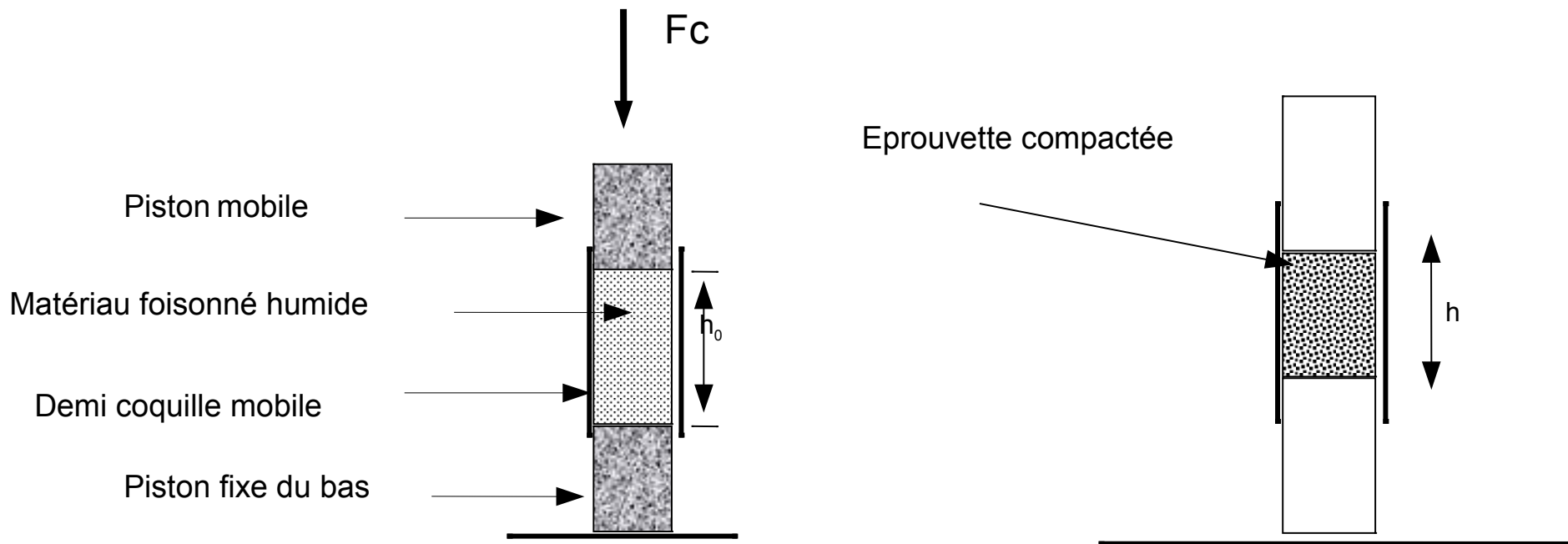
Compactage « statique »

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



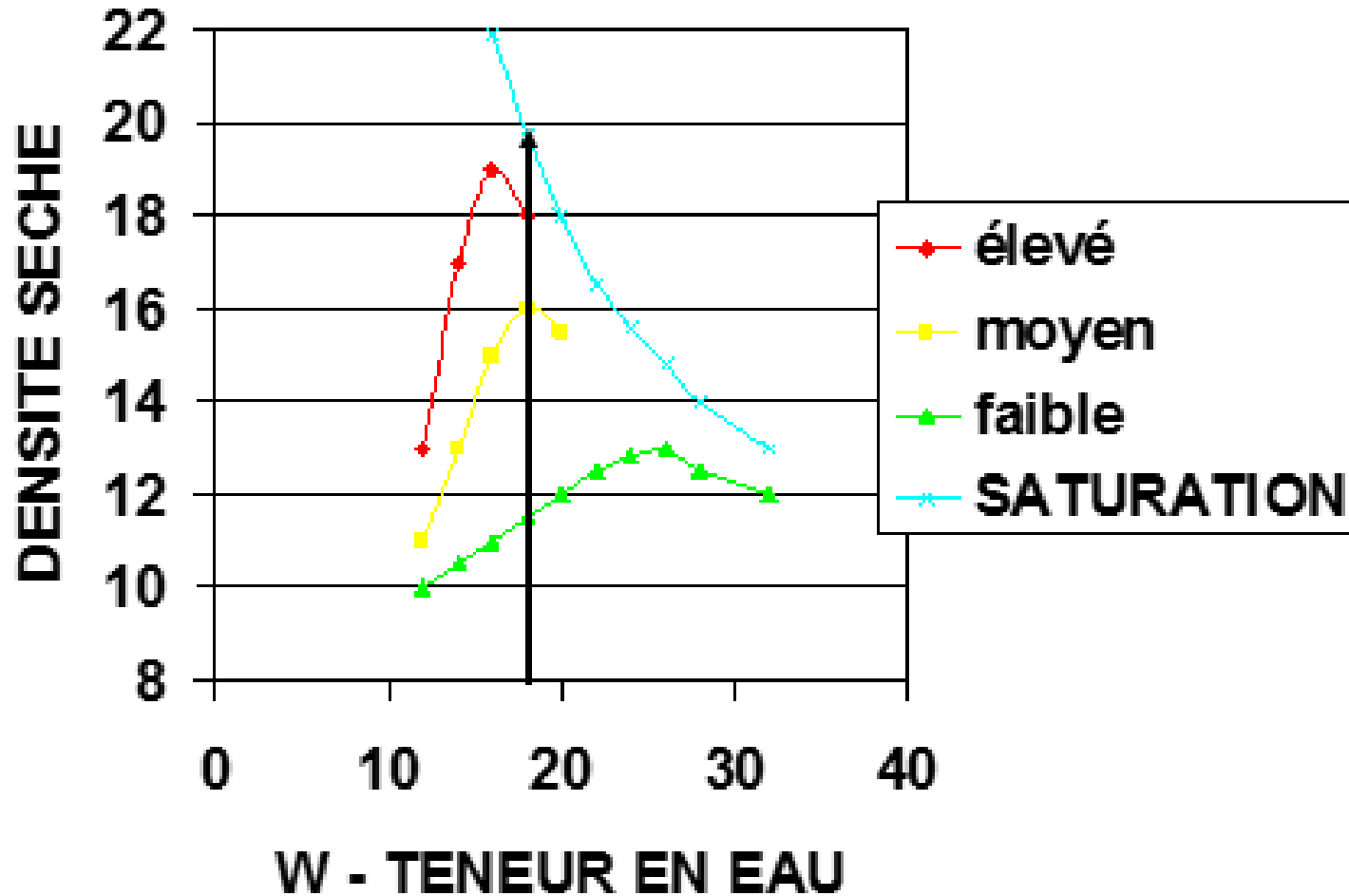
Compactage « statique »

- Système de fabrication d'éprouvettes
 - Homogènes → double compression



Compactage « statique »

- Courbe de compactage statique

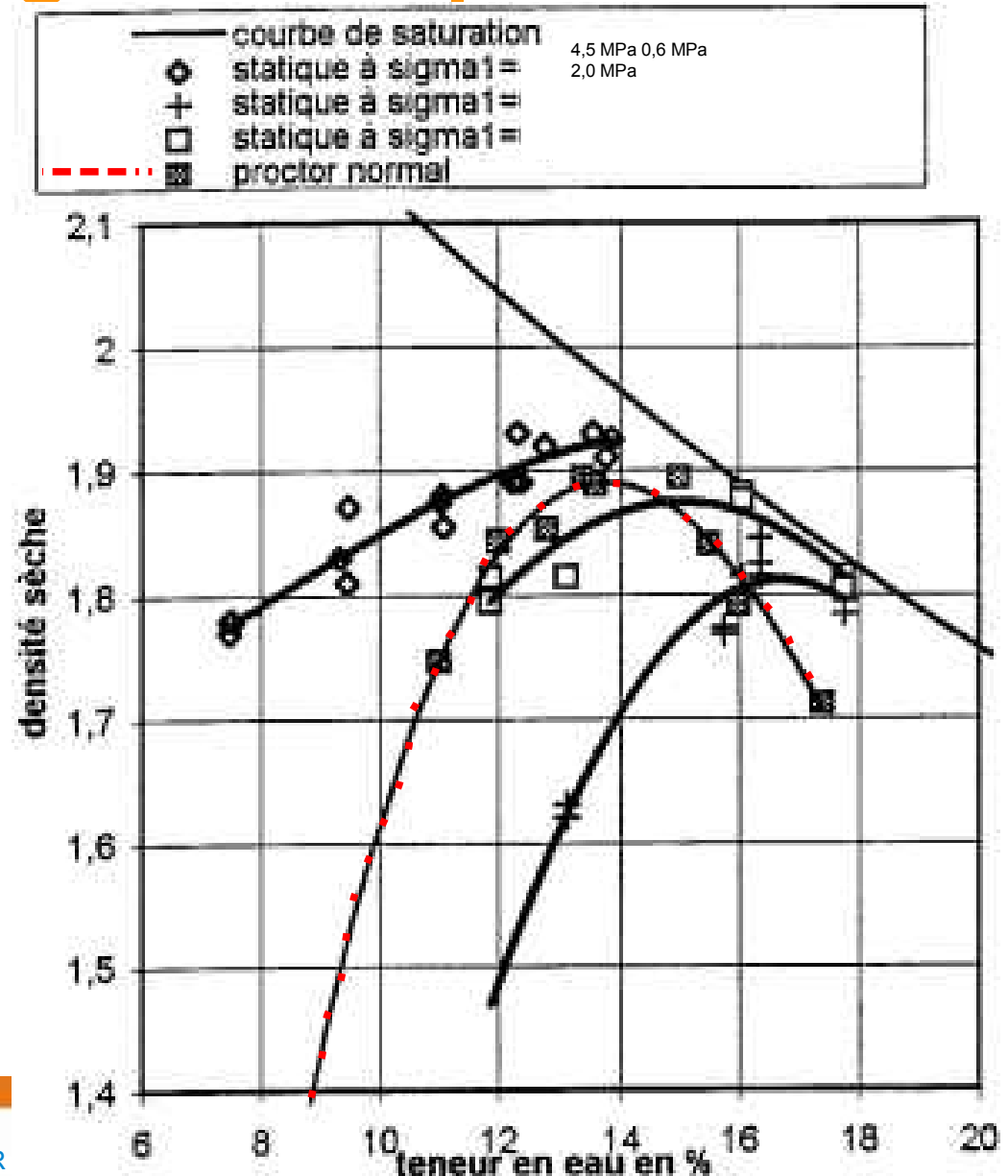


Compactage « statique »

- 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 »

- Correspondance entre
 - les courbes de compactage statiques à \neq pressions
 - et les courbes PROCTOR
- Couple : densité et w OPTIMAL pour chaque pression



Compactage « statique »

- Correspondance entre compactage statiques et PROCTOR
 - Essai PROCTOR : pris comme référence de densité/w à atteindre
 - La contrainte équivalente à l'OPNormal varie de 1 à 5 MPa !
 - Argile Kaolin
 - Fonction de wl
 - Φ maxi (si représentatif)

Compactage « statique » / dynamique

- Avec la technique du pisé
 - Compactage dynamique
 - Niveau recherché ?
 - Mais impossible de faire des éprouvettes homogènes
- recherche de la contrainte statique équivalente
 - Pour fabriquer des éprouvettes
 - et évaluer la résistance du pisé

Compactage « statique »

- résistance en compression simple (13mn)



Compactage « statique »

- Le compactage statique
 - fabrication d'éprouvettes
 - Homogènes (ϕ 11cm, h 18 à 22cm)
 - Reproductibles
 - Élancement proche de 2
 - essai en compression simple
 - Essai homogène
 - Valeur REELLE de résistance en compression
- Couplage densité / résistance en compression simple

Compactage « statique »

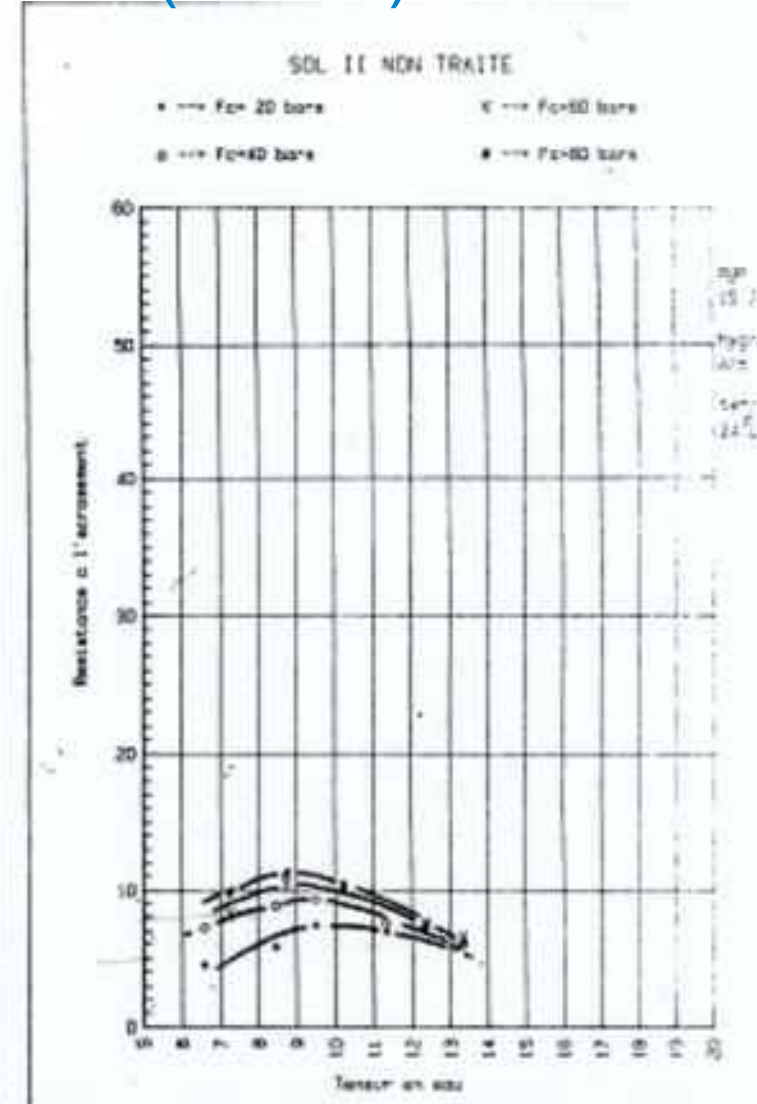
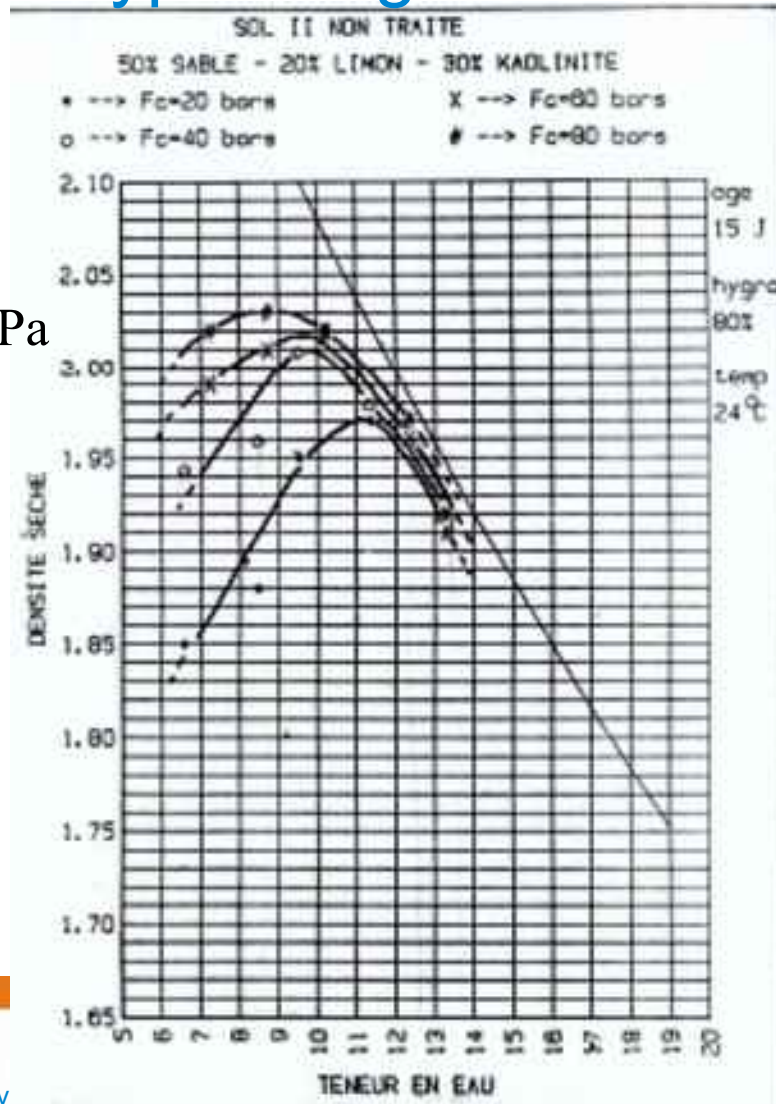
- Impact du type d'argile du matériau (Kaolin)

F_c : 2 à 8 MPa

W : 11% à 8%

γ_d : 1,98 à 2,3

R_c : 0,7 à 1,1 MPa



Compactage « statique »

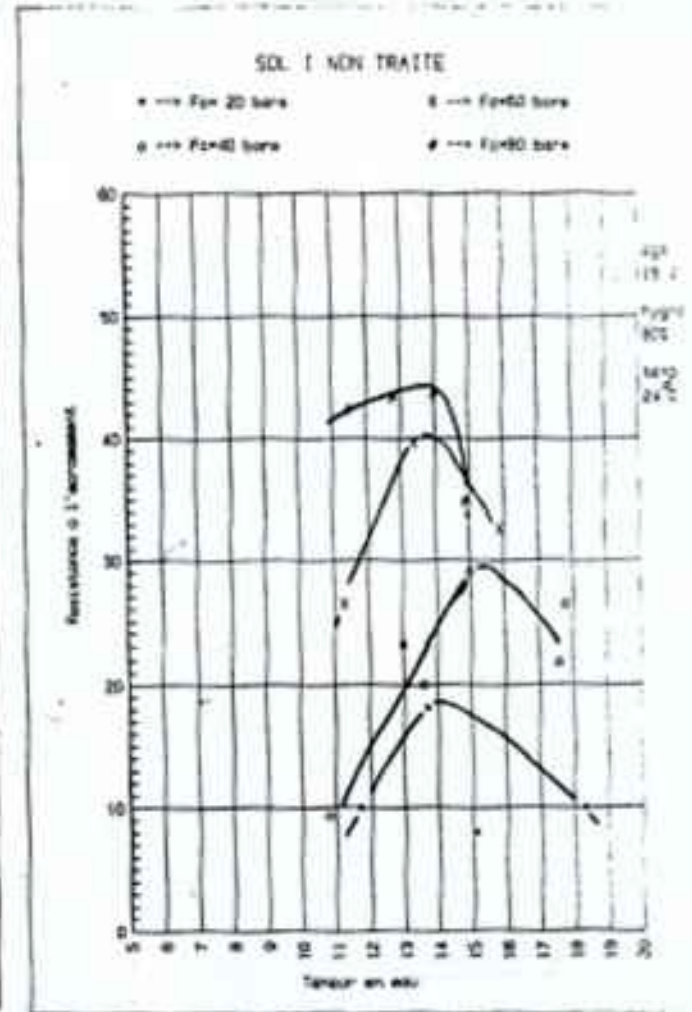
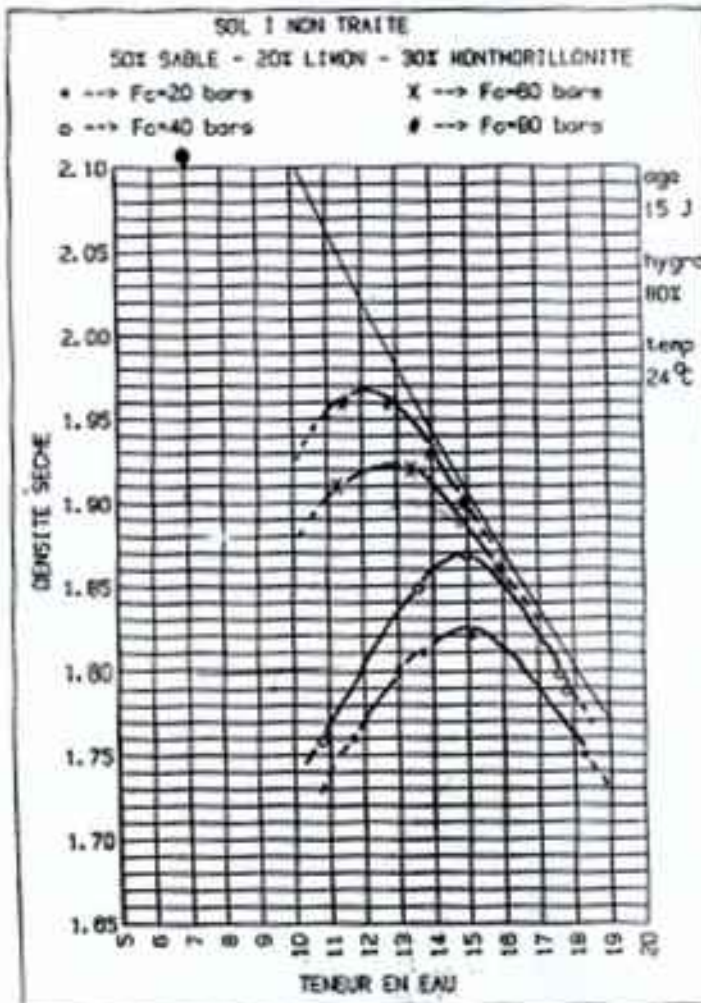
- Impact du type d'argile du matériau (Montmorillonite)

F_c : 2, 4, 6, 8 MPa

W : 15% à 12%

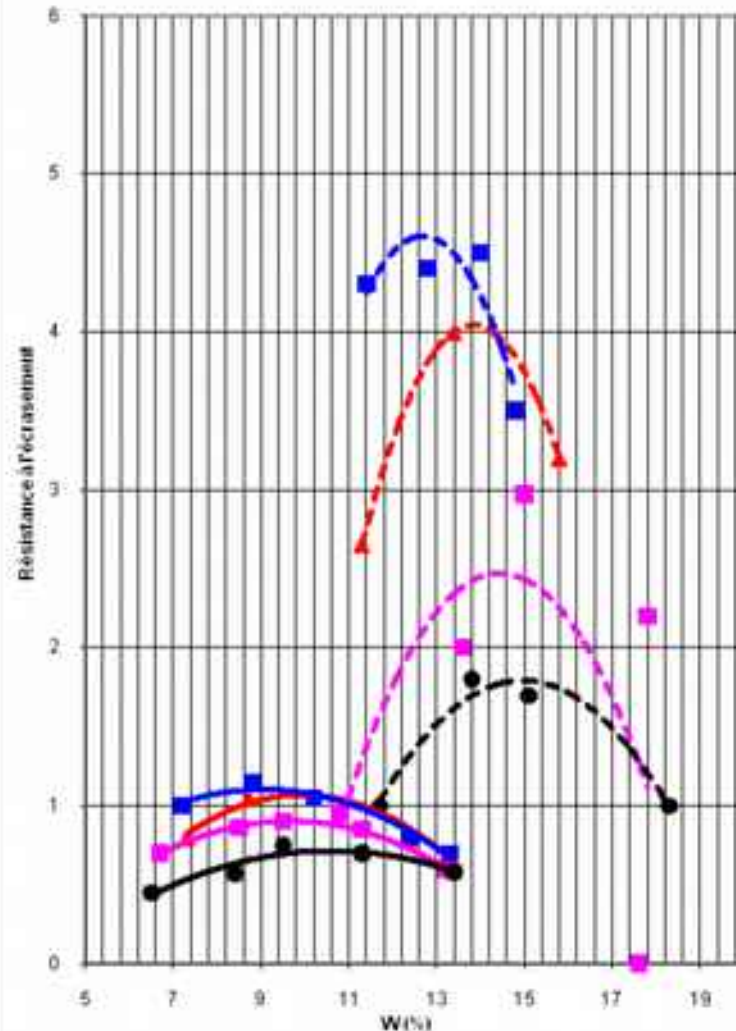
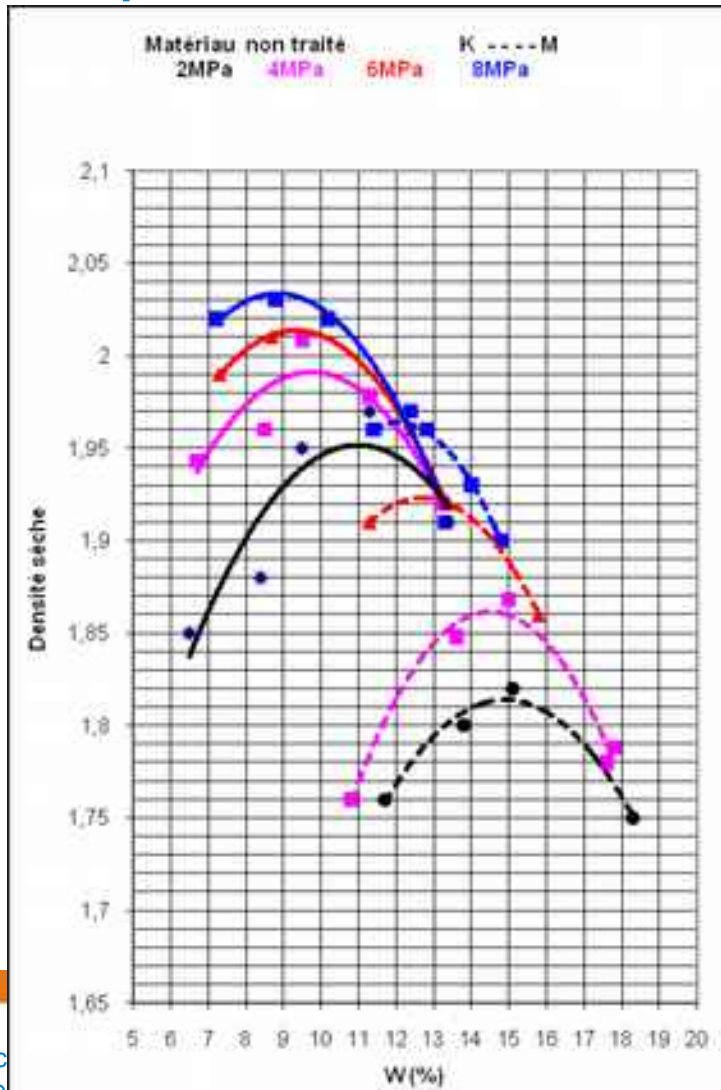
γ_d : 1,82 à 1,96

R_c : 1,9 à 4,4MPa



Compactage « statique »

- Comparaison des 2 matériaux



Compactage « statique »

- Comparaison des 2 matériaux
 - γ_d élevé \neq R_c élevé !
 - γ_d opt \Rightarrow R_c opt
 - si σ \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 »

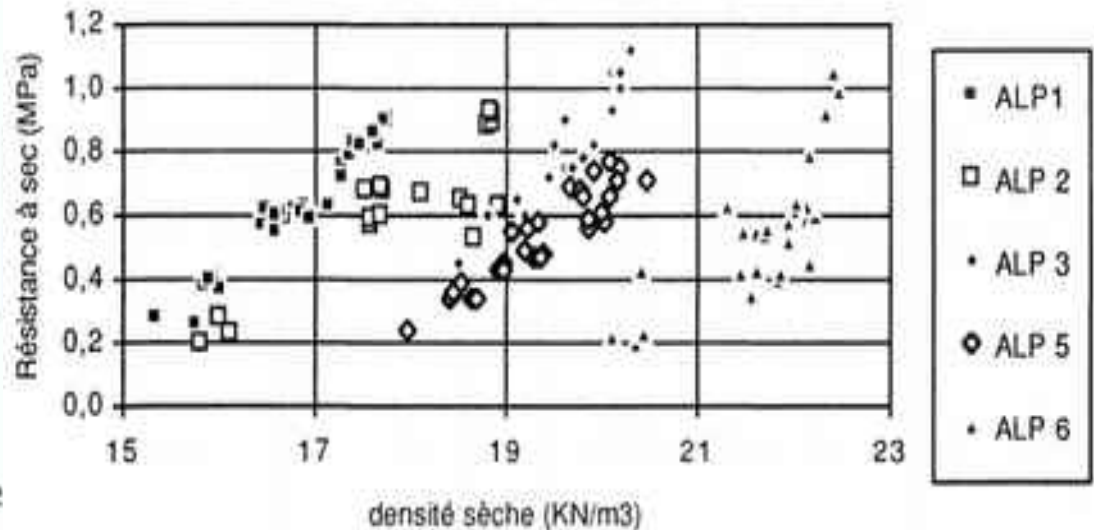
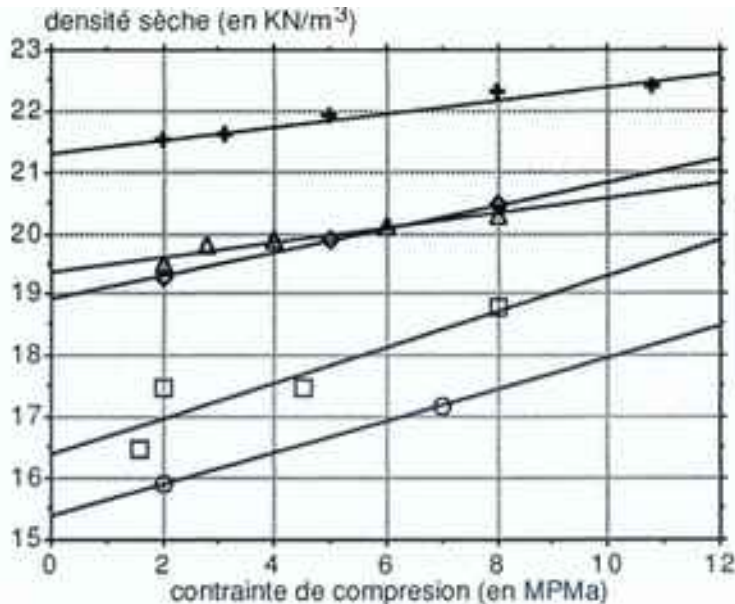
- Cas particulier de la Guyane :
- Présence de **séricite**
 - variété de mica à grain très fin et à reflets verts
 - muscovite ou (plus rarement) paragonite.
 - Silicate naturel d'aluminium et de potassium ayant un éclat soyeux.
 - **Effet**
 - Matériau hydrophobe → difficile à malaxer avec l'eau
 -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

Compactage « statique »

- Impact de la granulométrie du matériau

Compactage « statique »

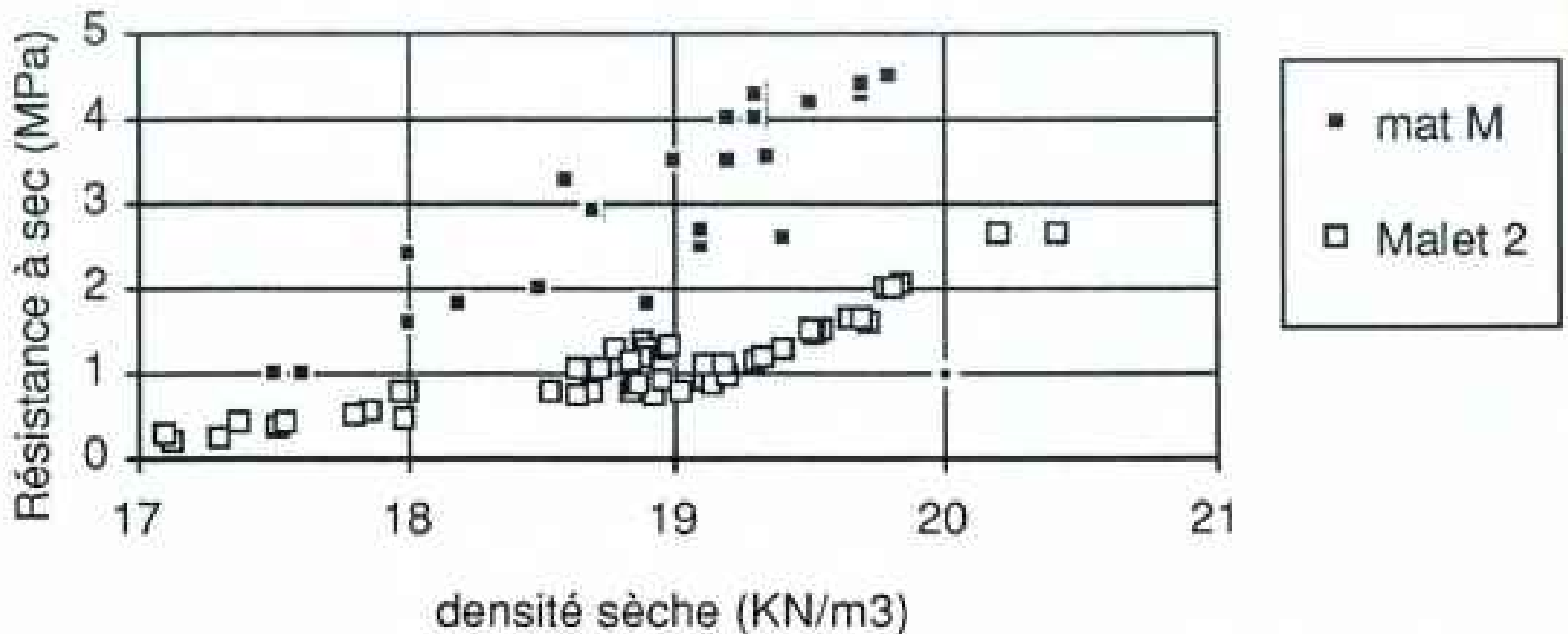
- Impact de la granulométrie du matériau
 - Même type d'argile (Kaolin)
 - Matériau fin (1) à grenu (6)



→ peu d'impact de la granulo sur Rc

Compactage « statique »

- Impact de la granulométrie du matériau
 - Même type d'argile (montmorillonite)
 - Matériau fin (Malet 2) à grenu (M)



Compactage « statique »

- Impact de la granulométrie du matériau
 - type d'argile → qualité du collage des grains
 - Peu d'impact avec Kaolin
 - Impact important avec Montmorillonite
- cf. fonctionnement d'un béton avec peu de liant
- => possible de besoin de stabilisation

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 σ - w
 - Base du système de contrôle-qualité
 - Pour σ imposée $\rightarrow w$ optimal
 - Si w varie de +/- 1 % , Rc baisse de 5 %
 - Si w varie de +/- 3 % , Rc baisse de **50 %**

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 !

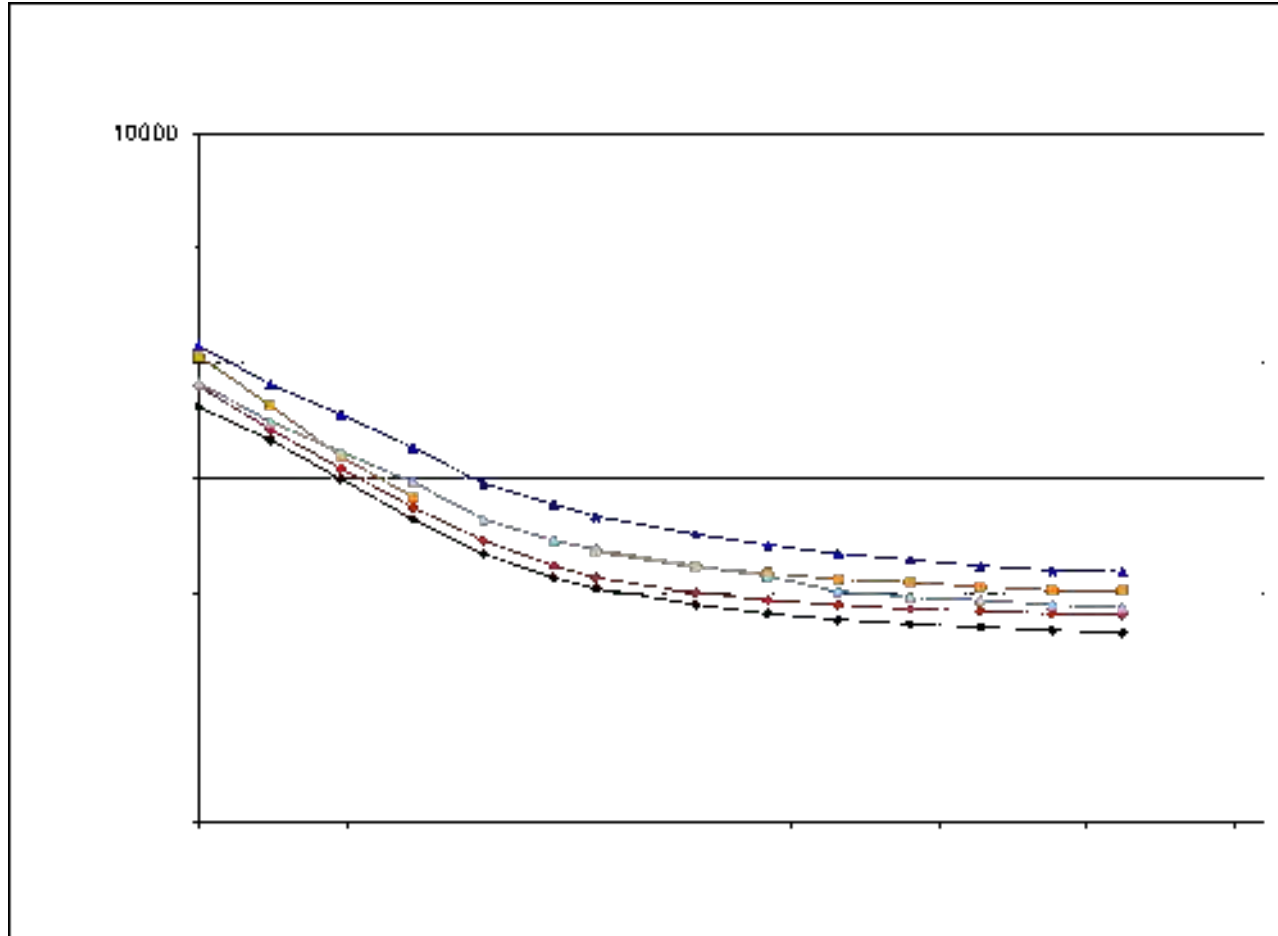
Cure des matériaux

- Matériaux NON STABILISES



Cure des matériaux

- Matériaux NON STABILISES – courbe de séchage



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

2 – le compactage de la terre

2.2 comportement sur chantier

Fabrication de blocs BTC

- § 2.1 : compréhension des phénomènes
- § 2.2 : processus de fabrication optimisation et contrôle de qualité sur chantier
- § 2.2.1 : traduction des phénomènes sur chantier
 - Impact des types de matériels utilisés
 - Impact de la préparation des matériaux
- §2.2.2 : les matériels
 - Presse
 - Malaxeurs
 - Autres matériels ...

Fabrication de blocs BTC

- § 2.2 : processus de fabrication optimisation et contrôle de qualité sur chantier
- § 2.2.1 : traduction des phénomènes sur chantier
 - Impact des types de matériels utilisés

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

Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- 2 grandes familles presses ... presque !
 - Presses hydrauliques (google : earth brick machine)



<http://www.alroma.com.br>

Fabrication de blocs BTC

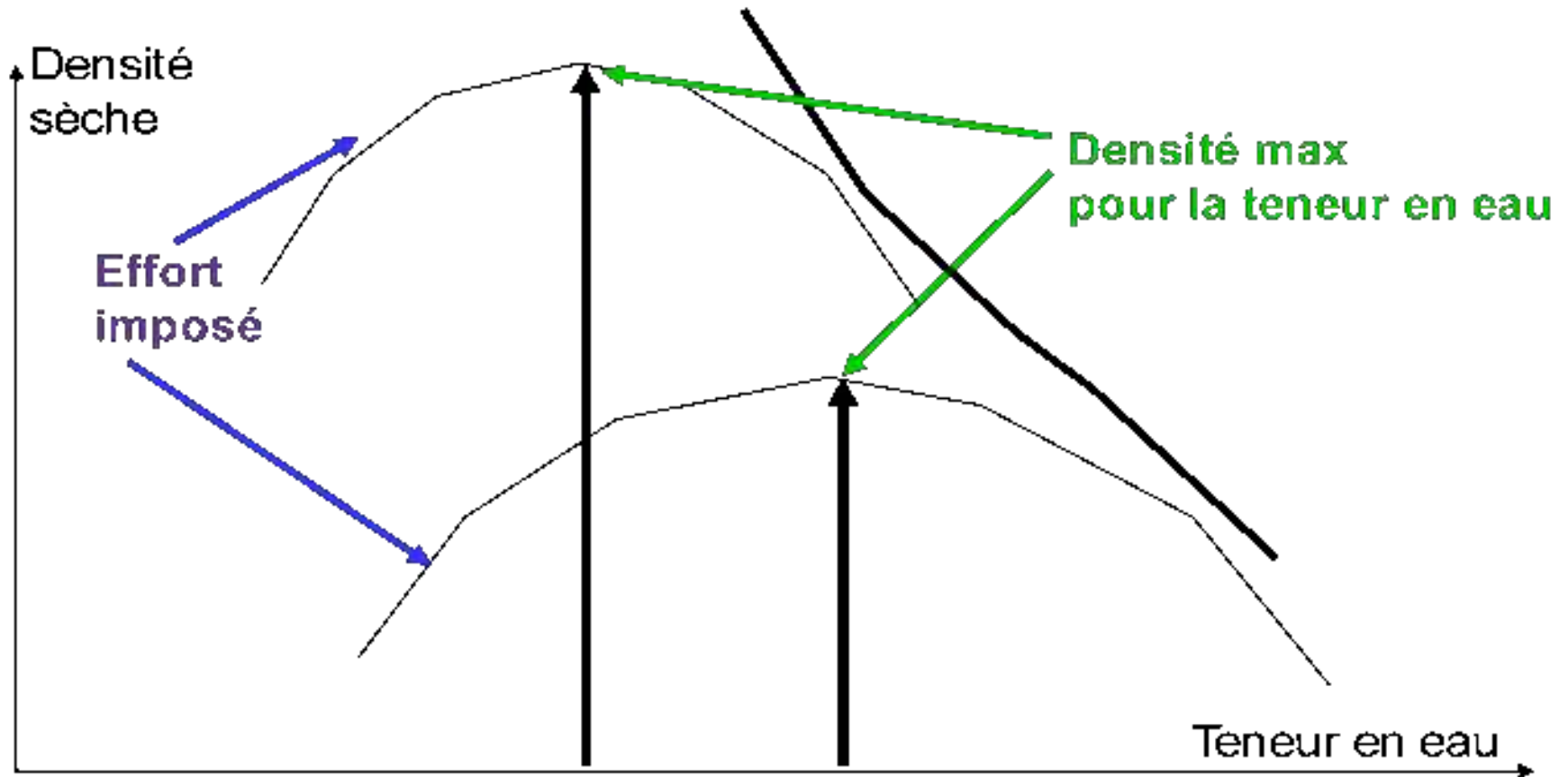
Presses hydrauliques

- 2 grandes familles presses ... presque !
- Presses hydrauliques
 - En théorie :
 - délivrent un effort via un vérin hydraulique
 - → contrainte de compression maxi σ_{\max}
 - En pratique
 - compriment le matériau au maximum à σ_{\max}
 - → fin de course
 -

Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- Si la presse hydraulique n'a PAS de fin de course



Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- Si la presse hydraulique n'a PAS de fin de course
 - Quelle que soit la QUANTITE de matériau introduite
 - Application d'une contrainte = σ_{\max}
 - Peu de matériau → petit bloc
 - Beaucoup de matériau → gros bloc
 - Blocs de hauteur différentes !
 - Fonction de la quantité de matériau introduit
 - Mais, densité sèche constante
 - Même w et même contrainte

Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- La presse hydraulique a une fin de course
 - Fin de course
 - garantir une épaisseur identique à tous les blocs
 - Quantité de matériau introduite
 - Trémie + taille du moule (profondeur modifiable?)
 - Mais, si variation de teneur en eau
 - Baisse de densité sèche
 - Donc baisse des résistances

Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- Principe d'optimisation
 - Déterminer w_{opt} pour chaque matériau
 - Faire varier la teneur en eau
 - Calculer la densité sèche
 - Dépend du matériau et de la presse
 - Déterminer le couple $(w_{opt}, \gamma_{d-opt})$
 - Paramètres de fabrication
 - Pour w_{opt}
 - Régler la quantité foisonnée et humidifiée de matériau à introduire dans le moule → réglage de la hauteur du bloc

Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- Principe d'optimisation
 - Contrôle de qualité
 - Teneur en eau du matériau malaxé
 - Quantité de matériau introduite
 - Homogénéité des épaisseurs de blocs
→ calcul de γ_d
 - γ_d varie de 17 à 22kN/m³
 - γ foisonné varie de 10 à 14 kN/m³

Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- Presse à contrainte de compression élevée
 - Presse hydrauliques BTC
 - dérivées de presse à bloc béton
 - Hyper-compression : $> 10\text{MPa} \rightarrow 15 \text{ à } 20 \text{ MPa}$
- Impact sur l'optimisation
 - si la contrainte ↗, la teneur en eau de fabrication ↘
 - la courbe est + pointue
et proche de la courbe de saturation
- Difficile d'évacuer l'eau et l'air pour des temps de compression de 1s \Rightarrow saturation localisée

Fabrication de blocs BTC

Presses hydrauliques

- Presse à contrainte de compression élevée
 - $>10\text{MPa}$
 - Difficile de travailler avec un matériau argileux
 - réservée aux sols sableux, peu argileux (donc très perméables à l'eau et à l'air)
 - Souvent associé à une forte stabilisation au ciment
 - $\sim 10\%$ ciment
 - Permet des blocs
 - creux ,
 - nervurés, ou avec empreintes

Fabrication de blocs BTC

Presses manuelles ou mécaniques

Fabrication de blocs BTC

Presses manuelles

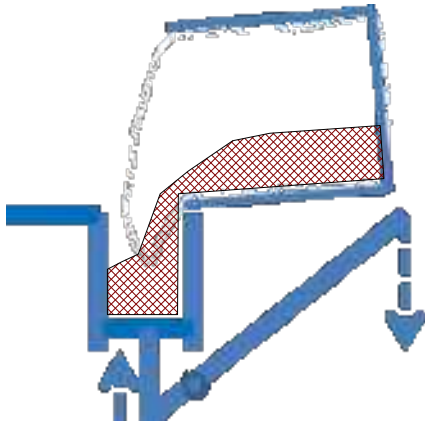
- Presse manuelle : type Cinva Ram



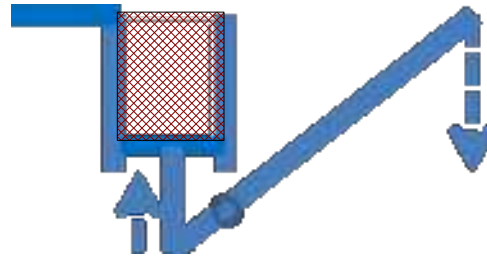
Fabrication de blocs BTC

fonctionnement presses manuelles

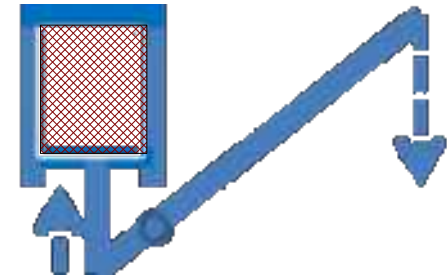
1 - remplissage



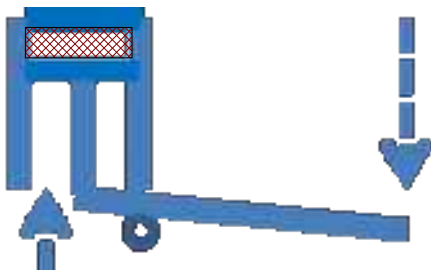
2 - arrasage



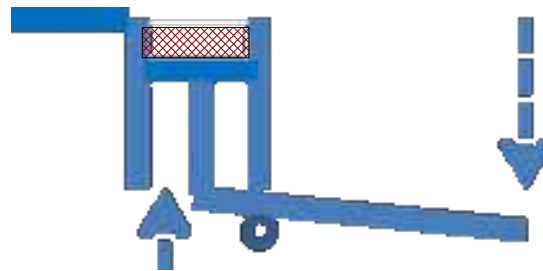
3 - fermeture



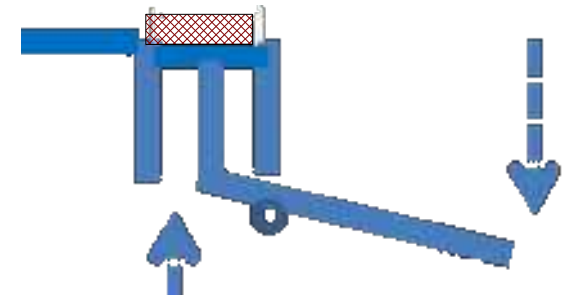
4 - compactage



5 - ouverture



6 - démoulage



Fabrication de blocs BTC

Presses mécaniques

- Pact 500 , MecoConcept



Fabrication de blocs BTC

fonctionnement presses mécaniques

- Fond de moule
 - Actionné par une came
 - Système semi-automatique
 - une personne déclenche manuellement le cycle de compactage
- Souvent associé à une ligne de fabrication
 - Malaxeur
 - Trémie de remplissage...
- <https://www.youtube.com/watch?v=PcWL9NnAHfE>

Fabrication de blocs BTC processus d'optimisation

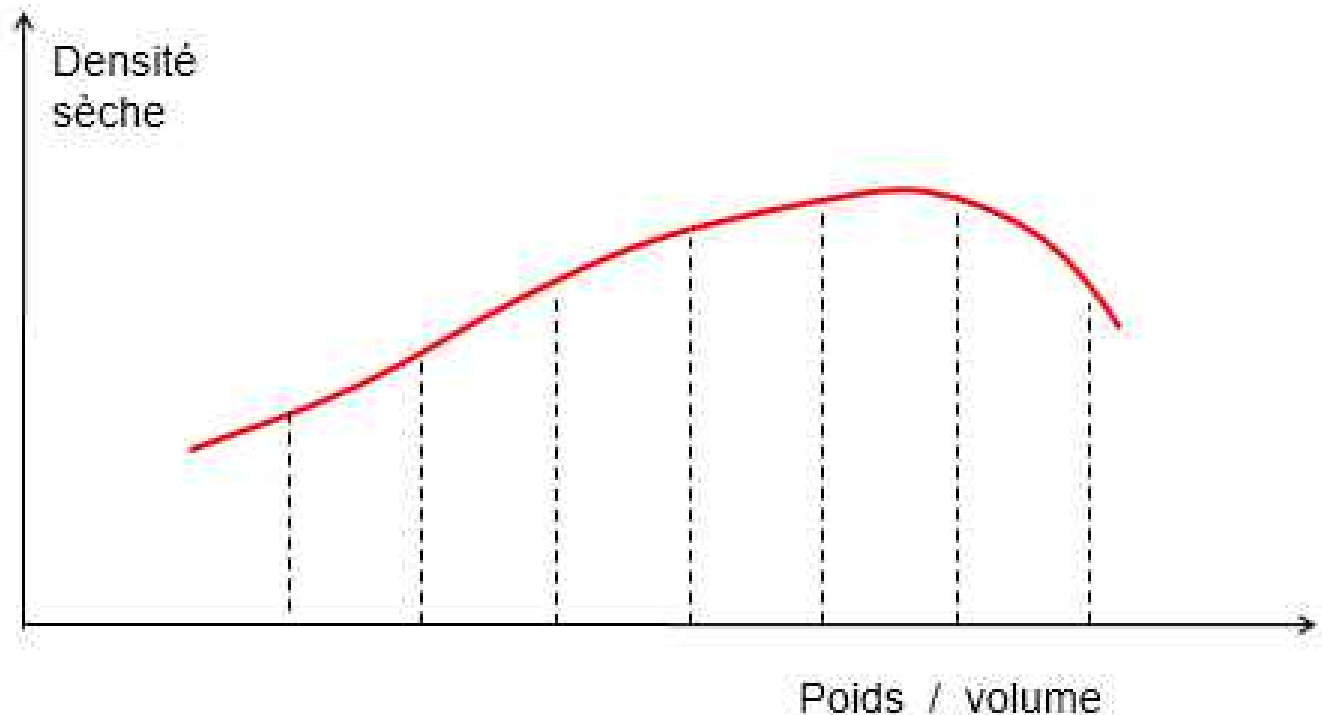
- Principe
 - Déplacement imposé
 - ... si le cycle se réalise complètement
 - Hauteur constante
 - Volume de remplissage variable
 - Foisonnement variable en fonction de la teneur en eau
 - Pour optimiser les BTC
 - Étude simultanée de
 - Teneur en eau
 - Volume de terre

Fabrication de blocs BTC processus d'optimisation

- Principe

1. Chercher l'optimum de densité pour plusieurs w

- À w constant : augmentation du poids foisonné
- Tout en allant jusqu'au bout du cycle

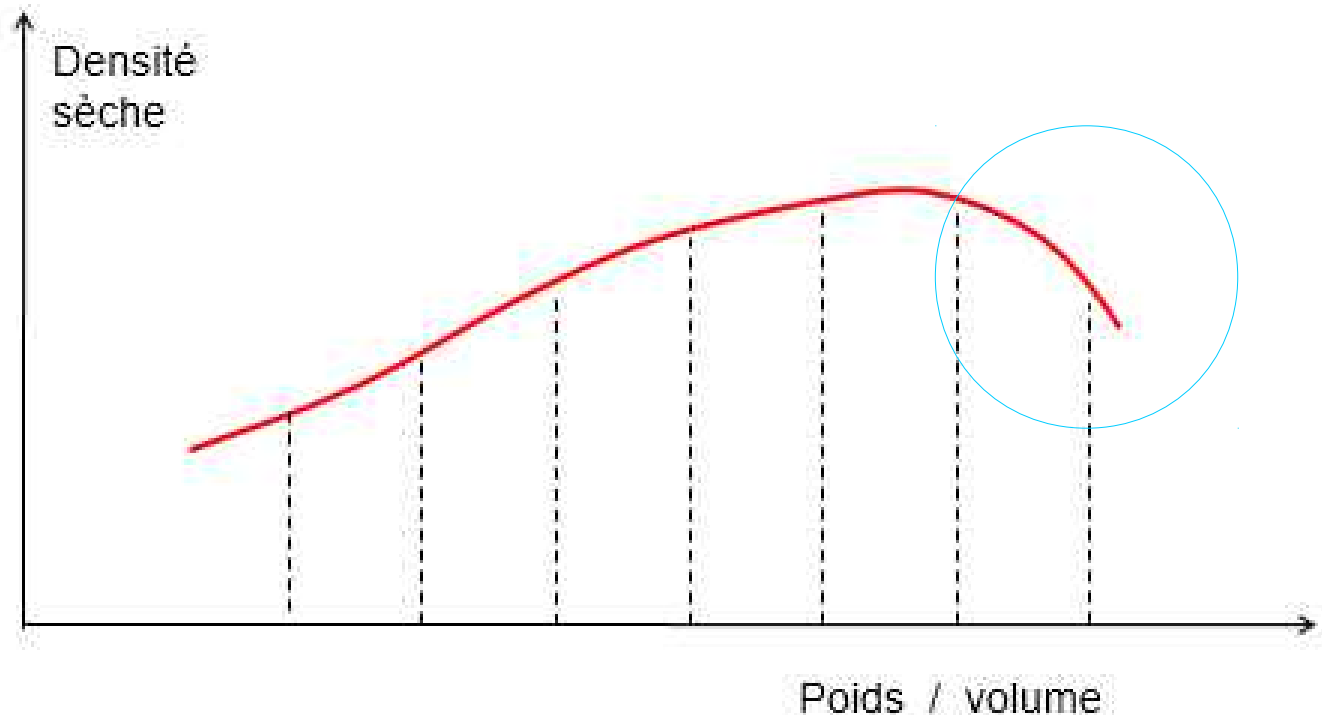


Fabrication de blocs BTC processus d'optimisation

- Principe

- Le cycle ne se termine pas :

- le levier ne va pas en bout de course (manuel)
- la came ne fait le tour complet (mécanique)

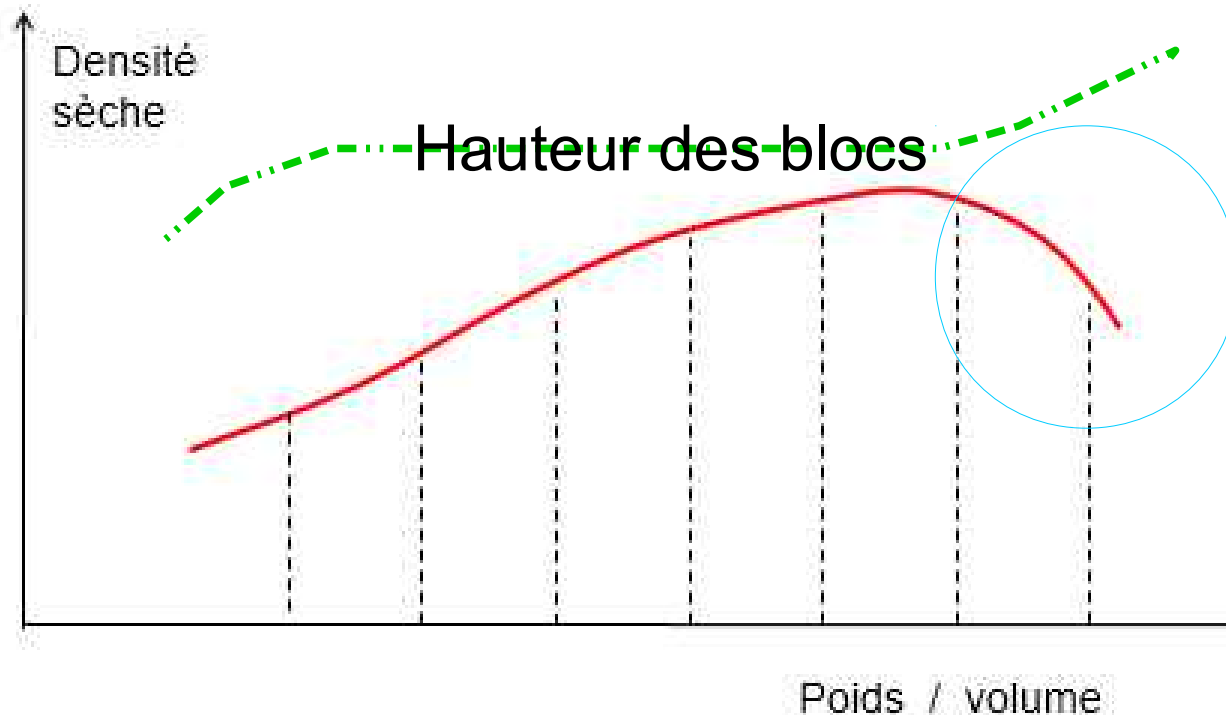


Fabrication de blocs BTC processus d'optimisation

- Principe

- Le cycle ne se termine pas :

- $\gamma_d < \gamma_d \text{ max}$, les hauteurs de blocs augmentent

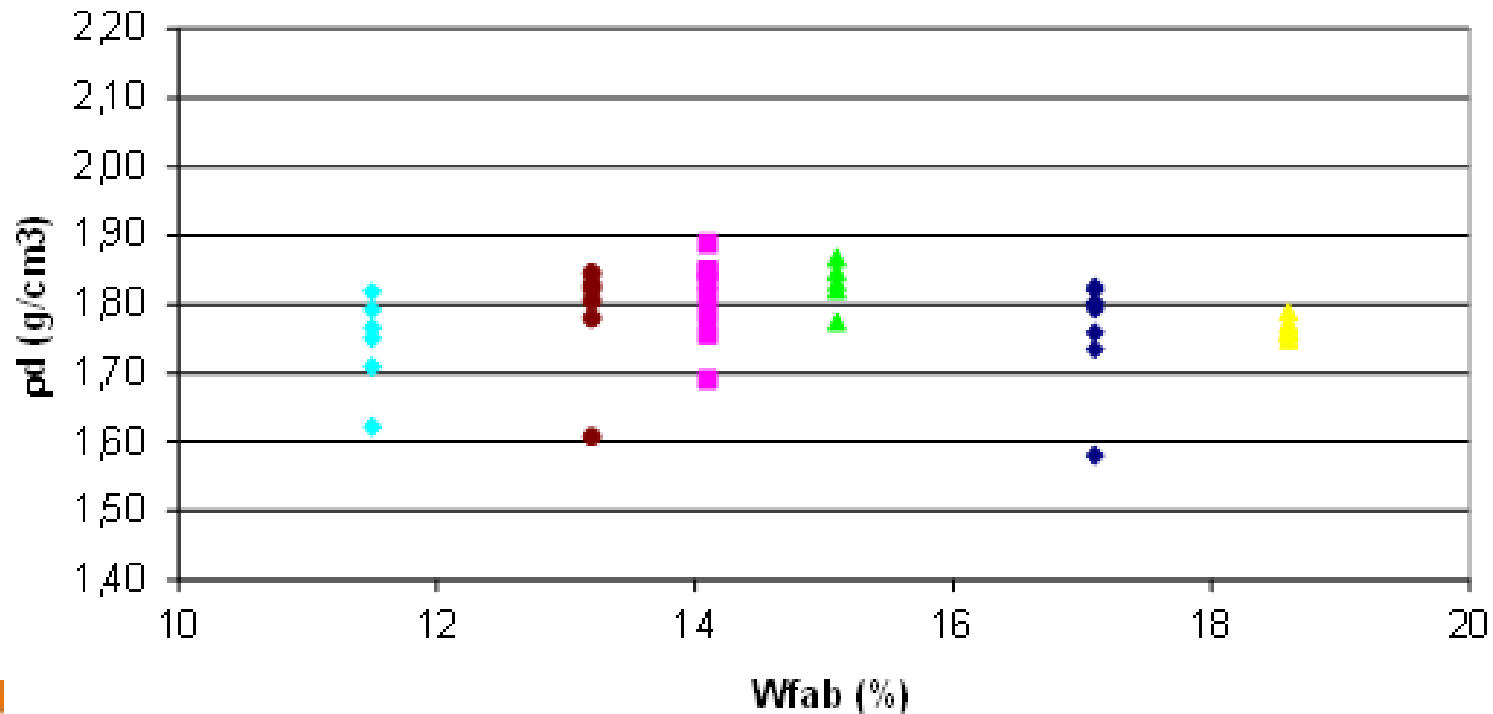


Fabrication de blocs BTC processus d'optimisation

- Principe

2. rechercher le couple $(w_{opt}, Q_{opt}) \rightarrow \gamma_d \max$

Essais compactage - briques 20*20*10 cm
Matériau SP

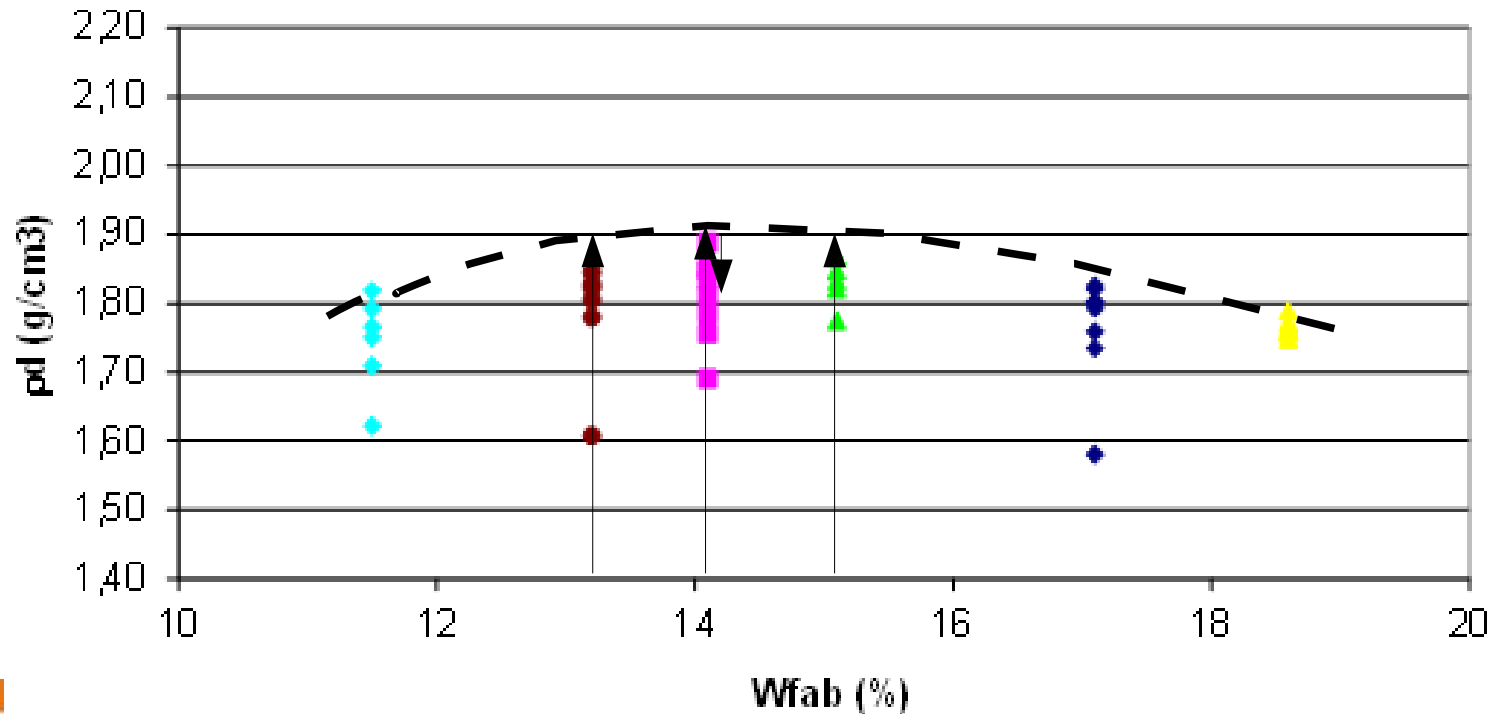


Fabrication de blocs BTC processus d'optimisation

- Principe

2. rechercher le couple $(w_{opt}, Q_{opt}) \rightarrow \gamma_d \max$

Essais compactage - briques 20*20*10 cm
Matériau SP



Fabrication de blocs BTC processus d'optimisation

- Principe

2. rechercher le couple $(w_{opt}, Q_{opt}) \rightarrow \gamma_d \max$

→ peut demander la fabrication de plusieurs dizaines de blocs

→ objet d'un TP

Fabrication de blocs BTC

- § 2.1 : compréhension des phénomènes
- § 2.2 : processus de fabrication optimisation et contrôle de qualité sur chantier
- § 2.2.1 : traduction des phénomènes sur chantier
 - Impact des types de matériels utilisés
 - Impact de la préparation des matériaux

Impact du malaxage

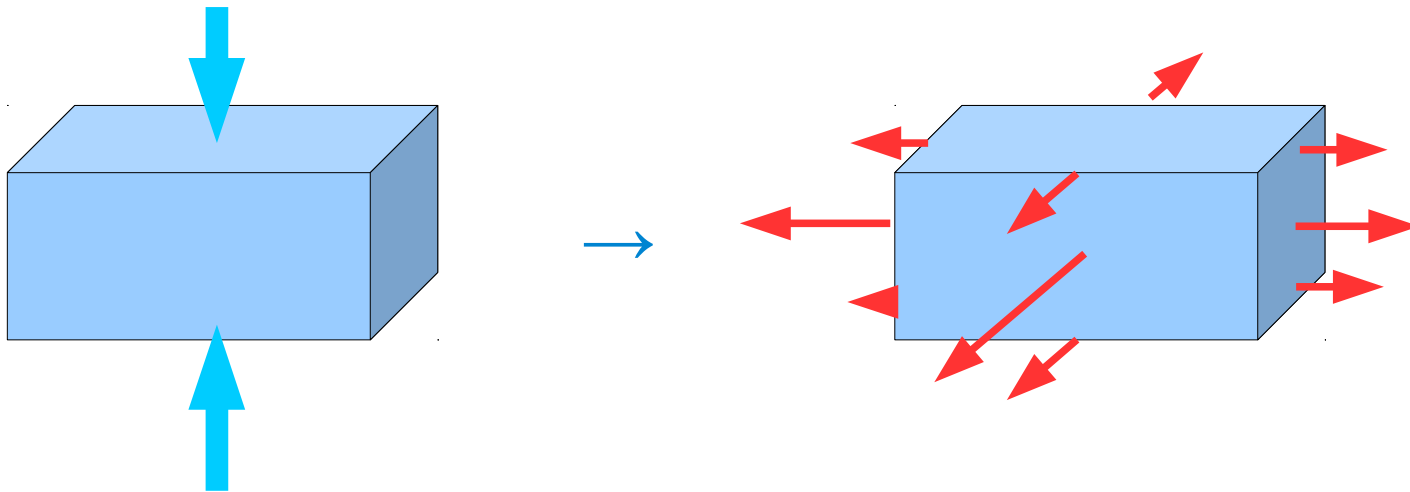
- Malaxage pour :
 - Humidifier la terre $\rightarrow w_{opt}$
 - Modifier le sol
 - Ajouter du sable /gravier
 - Améliorer le sol
 - Ajouter un liant
- Qualité du malaxage
 - Obtenir une couleur homogène

Construire en terre

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

Résistance en compression des blocs de terre compressée

- Écraser un bloc parallélépipédique sous une presse
(1-5) (5-8)



→ la valeur à la rupture

>> « vraie » résistance en compression simple

- Norme XP 13-901

Résistance en compression des 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
 - Essais capillaires

Résistance en compression des blocs de terre compressée

- Norme XP 13-901
 - essai en compression simple, à sec (8-9-12)
→ valeur représentative d'une maçonnerie

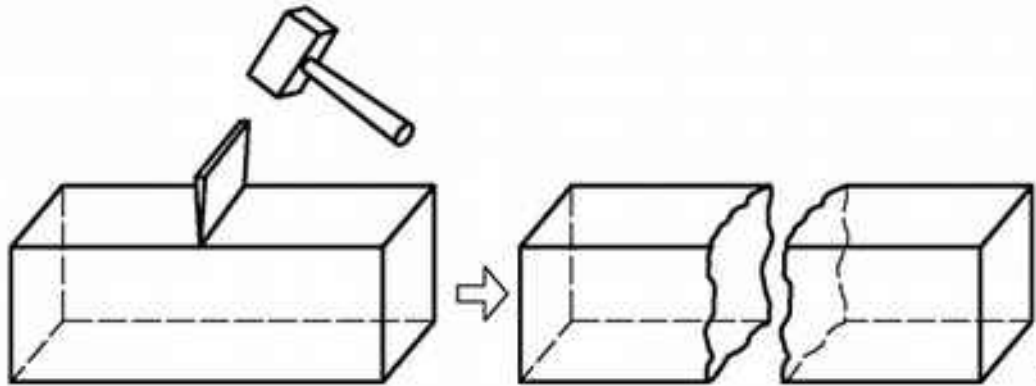


Figure-10 — Coupe-du-bloc-en-deux-demi-blocs¹

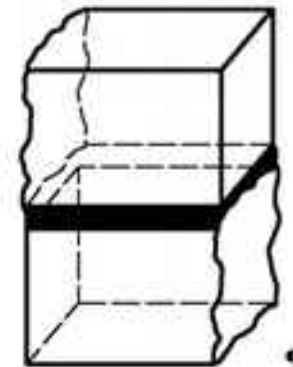


Figure-11 — Superposition-des-deux-demi-blocs¹

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

Résistance en compression des blocs de terre compressée

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

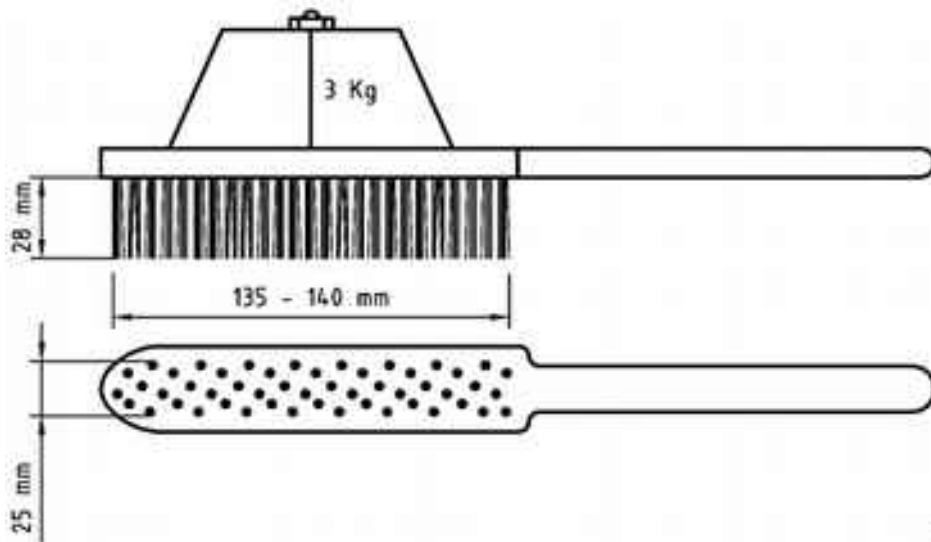


Figure 12 — Brosse d'acier pour essai d'abrasion

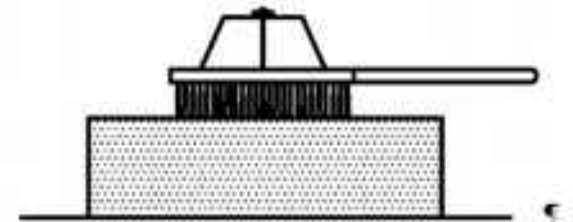


Figure 13 — Dispositif pour essai d'abrasion

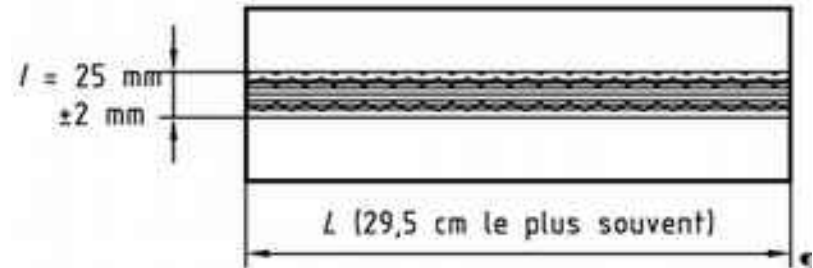


Figure 14 — Calcul de la surface de brossage

→ Mesure de la perte de matériau

Résumé

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 ± 1 % maxi
 - h : hauteur des blocs \rightarrow constant ± 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 \rightarrow constant ± 1 mm
 - Densité sèche \rightarrow constant $\pm 0,1\text{kN/m}^3$
 - Caractéristiques mécaniques nécessaires pour la conception du bâtiment
 - R_c à sec
et si nécessaire
 - R_c humide
 - Résistance à l'abrasion