

Conception des ouvrages en terre

Optimisation des matériaux

Fabienne DERMENONVILLE → Grégory MEYER

Optimisation des matériaux

Sommaire

- Chiffres clés et enjeux

Focus sur :

1. La conception des ouvrages (remblais / déblais)
2. Le mouvement des terres
3. Le compactage

Conclusions

Optimisation des matériaux

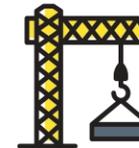
- Chiffres-clés et enjeux
 - Les impacts de la filière TP
 - Consommation de ressources
 - Consommation d'énergie et émission de GES
 - Production de déchets

20 000 À 30 000

tonnes de granulats
sont nécessaires pour réaliser
un kilomètre d'autoroute



300 000



chantiers sont réalisés
par an par les entreprises
de Travaux Publics

2,7



tonnes/habitant c'est la **quantité totale de déchets** générée
annuellement pour la construction
d'infrastructure (soit 185,3 Mt)

Optimisation des matériaux

- Chiffres-clés et enjeux : 3 objectifs
 - **3 objectifs d'optimisation des matériaux**
 - Consommation moindre de matériaux « nobles » (matériaux de carrière, granulats)
 - Réemploi des matériaux au plus près de leur lieu d'excavation / optimisation du planning chantier : diminution des distances de transport et des émissions de GES
 - Réemploi des matériaux : diminution du volume de matériaux mis en dépôt et de la production de « déchets »

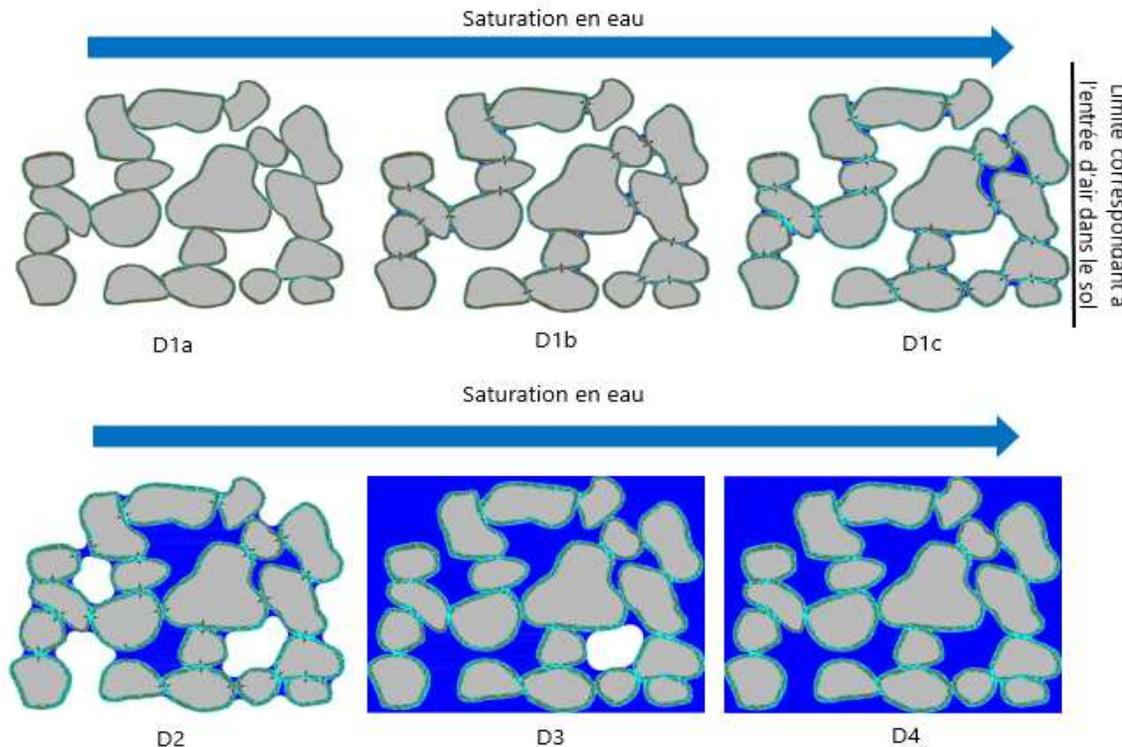
Optimisation des matériaux

■ 1. La conception des ouvrages

- Apports de la mécanique des sols non saturés dans la conception des ouvrages en sols fins (Projet ANR TERREDURABLE)
- Principe : prise en compte de la succion dans le comportement des sols
- Paramètres de conception à prendre en compte :
 - La succion $u_a - u_w$
 - La compressibilité du fluide interstitiel (eau + air) K_{a+w}

Optimisation des matériaux

- La conception des ouvrages
 - Différents domaines de comportement des sols en fonction de leur degré de saturation



Domaines rencontrés en terrassements (hors barrages) : D1c et D2

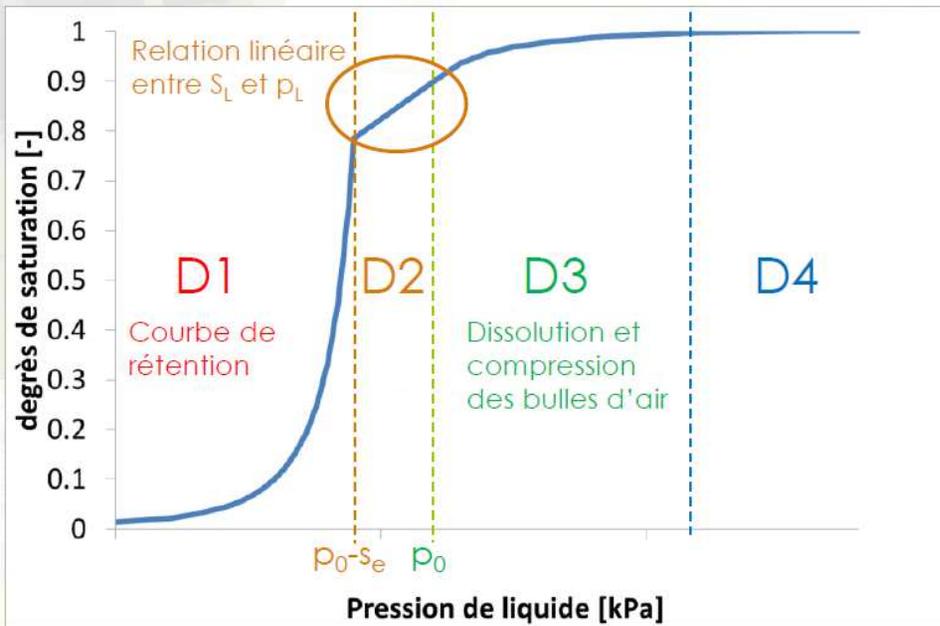
Domaines rencontrés en sols naturels : D2 (> nappe) et D3 (20-30m sous nappe)

Succion en domaines D1 et D2 qui augmente la résistance au cisaillement du matériau

$P_i > 0$ en domaine D3 et D4

Optimisation des matériaux

Approche en 4 domaines



D1 : Non saturé

D2 : Quasi-saturé avec interactions air-matrice

D3: Quasi-saturé sans interactions air-matrice

D4: Totalemment saturé

p_0 : Pression atmosphérique
 s_e : Succion d'entrée d'air

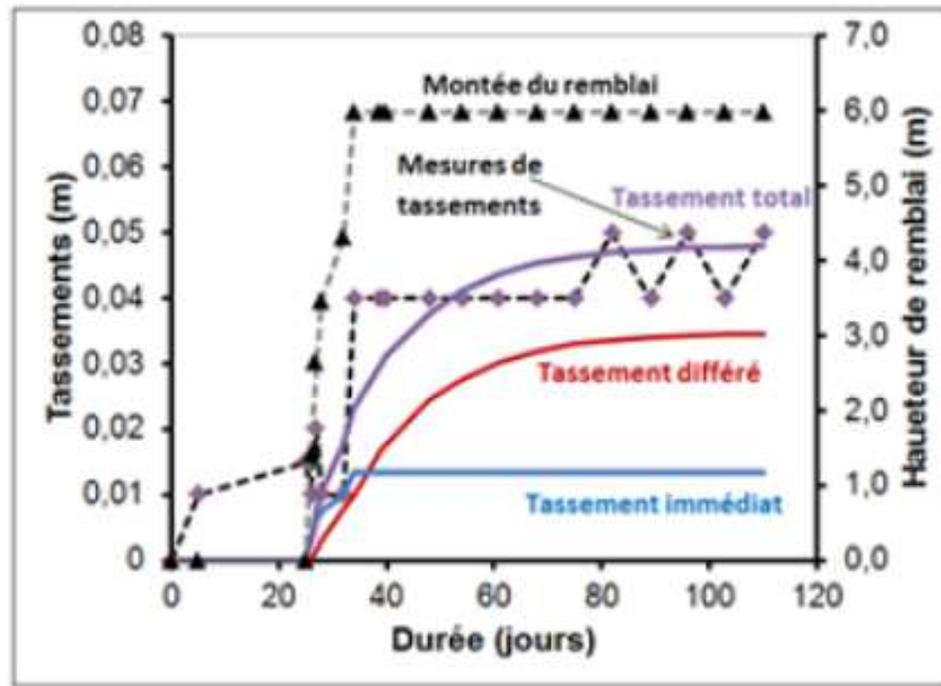
La connaissance de la succion initiale et de la compressibilité du fluide (eau + air) est particulièrement importante pour préciser le comportement des sols

Optimisation des matériaux

- La conception des ouvrages : remblai n°1
 - Dignes de Beaucaire : tassements immédiats vs tassements différés
 - Ouvrage en limons $H = 6\text{m}$, construit sur 20m de sols compressibles
 - Tassement immédiat (via le coefficient B de Skempton)
$$w_{immédiat} = \sum_{i=1}^n (1 - B_i) \Delta\sigma(z_i) \frac{h_i}{E_i}$$
 - B dépend de la compressibilité du fluide interstitiel (air + eau) et de la compressibilité du squelette

Optimisation des matériaux

- Instrumentation de l'ouvrage :
 - Bonnes corrélations tassement mesuré / calculé
 - Meilleure estimation de la consolidation du sol support
- **Optimisation du préchargement et de sa durée**



Optimisation des matériaux

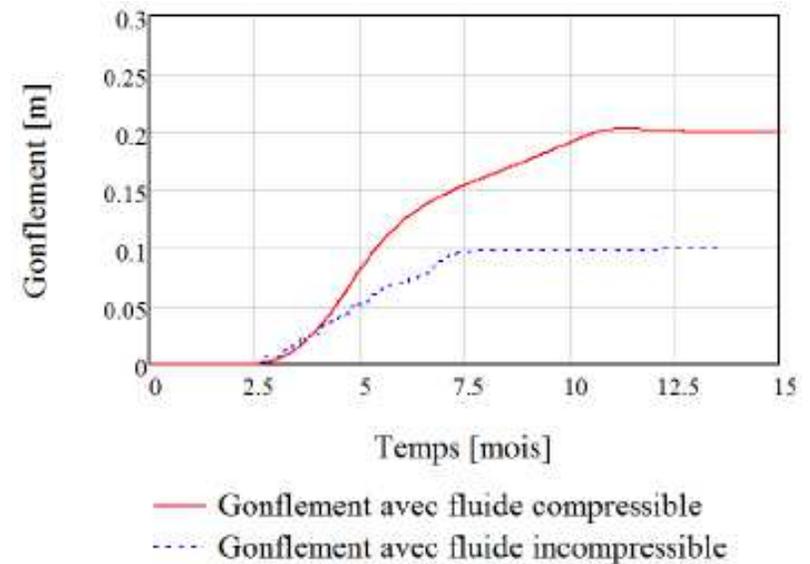
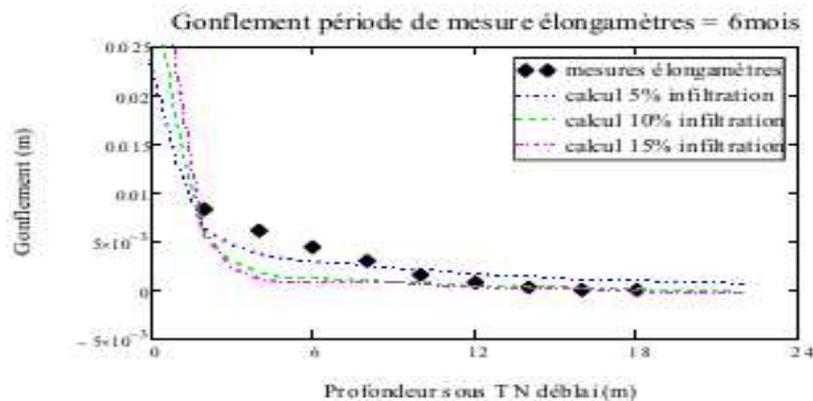
- La conception des ouvrages : remblai n°2
 - CDG Express : prise en compte de la cohésion apparente due à la succion
 - Remblai en limons d'une hauteur de 9m environ
 - La cohésion apparente dépend de la succion initiale :
$$C_{cor} = c' + F(u_a - u_w, s_{air}, Sr_{air}) \tan(\varphi')$$
$$F(u_a - u_w; s_{air}, Sr_{air}) = -u_w \text{ dans le domaine D2}$$
$$F(u_a - u_w; s_{air}, Sr_{air}) = -u_a + (u_a - u_w) \chi \text{ dans le domaine D1}$$
 - Succion initiale en labo (papier filtre) → $c' = 30$ kPa
 - Dispositions constructives pour conserver la succion

Optimisation des matériaux

- La conception des ouvrages : déblai n°1
 - A304 : estimation des gonflements d'arase (gonflements immédiats / différés)
 - Déblai de 18m de profondeur terrassé dans des marnes argileuses
 - Intégration de fonctions spécifiques sous FLAC 2D prenant en compte la compressibilité du fluide interstitiel
 - Pressions d'eau initiales mesurées sur EI
 - Nécessité de prendre en compte les apports liés à l'infiltration des eaux de pluie dans le modèle pour un meilleur calage

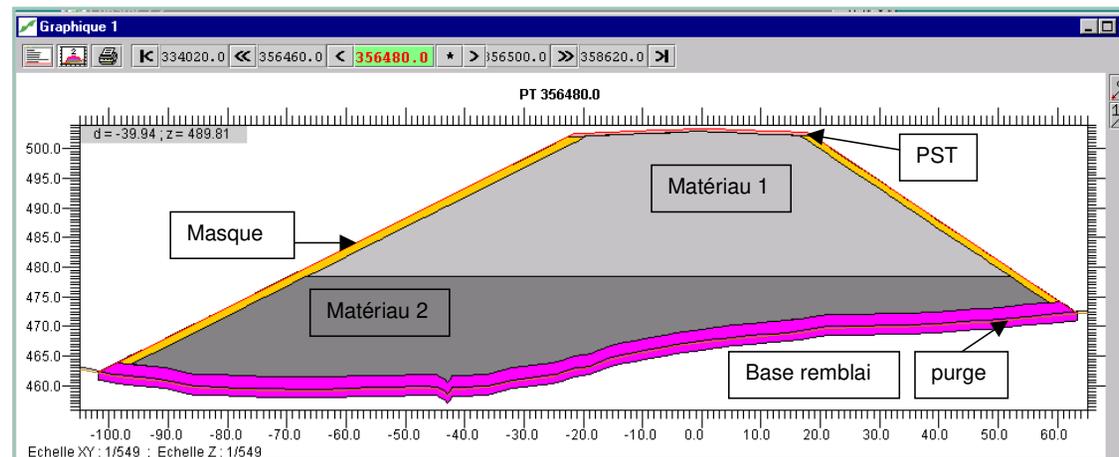
Optimisation des matériaux

- La conception des ouvrages : exemple de l'A304
 - Instrumentation de l'ouvrage pour comparer les valeurs calculées et les valeurs mesurées
 - Bonnes corrélations gonflement mesuré / calculé
 - Meilleure estimation des déformations en arase



Optimisation des matériaux

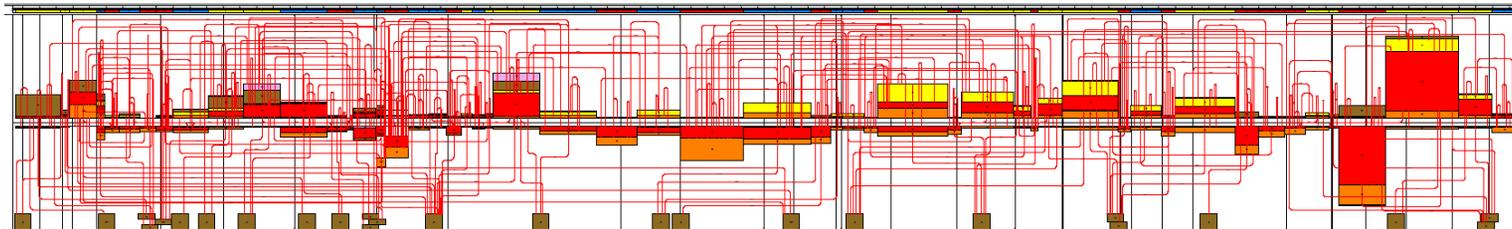
- La conception des ouvrages
 - Apports de la mécanique des sols non saturés dans la conception des ouvrages en sols fins :
 - **Meilleure maîtrise du planning chantier**
 - **Optimisation du réemploi des sols fins**
 - **Meilleure maîtrise des risques**



Optimisation des matériaux

2. Le mouvement des terres (projet CSNE)

- Impacts significatifs sur le projet (Tilos)
 - Optimisation du réemploi des matériaux
 - **Limitation de la consommation des ressources, limitation de la production de « déchets »**
 - Optimisation des dispositions constructives
 - **Limitation de la consommation des ressources**
 - Optimisation des distances de transport
 - **Limitation de l'émission des GES**



Optimisation des matériaux

3. Le compactage

- Chantier n°1 : planche d'essai réalisée sur l'A304 afin de vérifier l'influence de certains paramètres de compactage
 - Réalisation de 2x10 plots de compactage dans les matériaux marneux du Toarcien / Pliensbachien

 - Paramètres étudiés :
 - *La mouture : matériaux bruts / pulvimixés*
 - *Le type de compacteur : V5 / VP5*
 - *La teneur en eau de compactage par rapport à l'OPN*
 - *Le nombre de passes : 4 passes / 12 passes*

Optimisation des matériaux

■ Le compactage

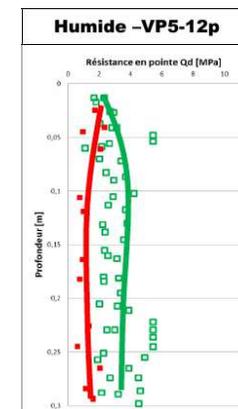
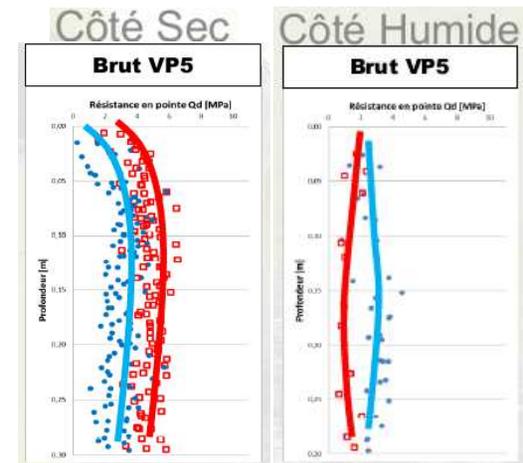
■ A304

- Principaux enseignements tirés de l'analyse des essais Panda

→ Amélioration des compacités en cas de sur compactage côté sec (diminution côté humide)

→ Apports de l'utilisation du VP5 : de bonnes compacités atteintes côté humide (compactage impossible au V5) , une meilleure homogénéité

Bleu : 4 passes / Rouge : 12 passes



Rouge : brut
Vert : pulvimixé

Optimisation des matériaux

■ Le compactage

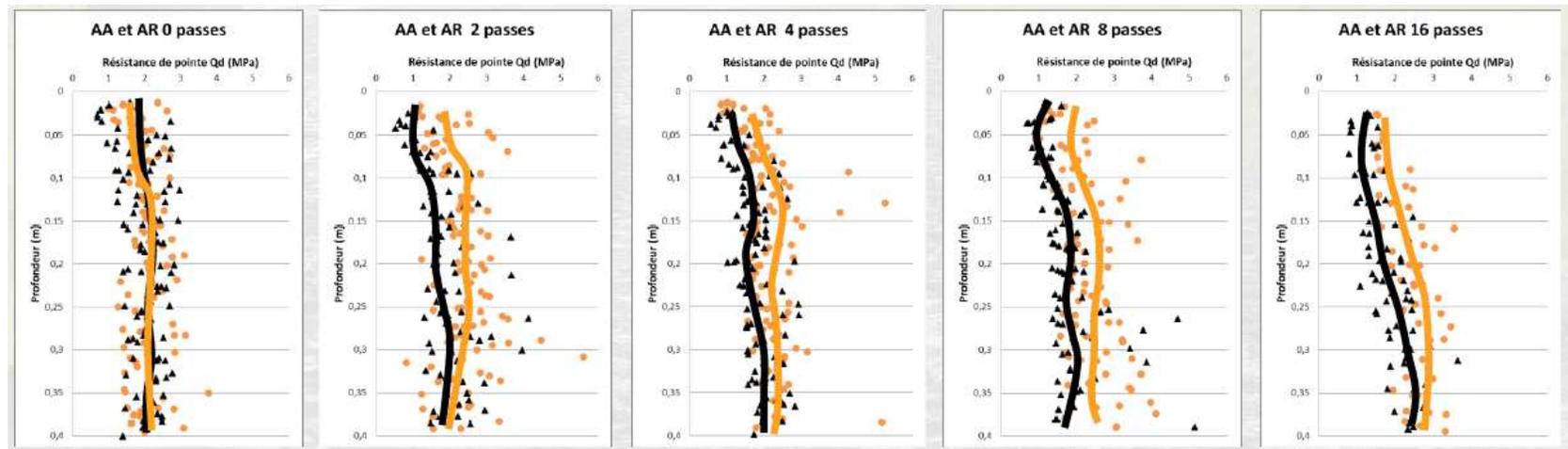
- Chantier n°2 : planche d'essai réalisée sur l'A10 afin de vérifier l'influence de certains paramètres
 - Réalisation de 2 plots de compactage dans des argiles A1/A2
 - Paramètres étudiés :
 - *Compactage en allers simples / compactage en aller-retour*
 - *Le nombre de passes (0, 2, 4, 8 et 16 passes)*
 - Essais au pénétromètre dynamique type Panda, gammadensimètre, cohésimètre + instrumentation (élongamètres, capteurs de contraintes totales, accéléromètres)

Optimisation des matériaux

■ Le compactage

■ A10

- Principaux enseignements tirés de l'analyse des essais
 - Gains de résistance dès la 2^{ème} passe en allers simples
 - Résistance à la compression simple améliorée (résistance au cisaillement)



Noir : Allers retours / Orange : Allers simples

Optimisation des matériaux

■ Le compactage – Impact sur les travaux

- **Maîtrise des risques** (sur compactage, sous-classes hydriques des terrains...)
- Possibilité de réemploi de matériaux au comportement « atypique » ou pour des fonctions spécifiques :
Limitation de la consommation des ressources
- Optimisation des méthodes de compactage :
Limitation de l'émission des GES

Optimisation des ouvrages en terre

■ Conclusions

- Meilleure connaissance des sols quasi-saturés
- Planches d'essais de compactage
- Projets de recherche : TerDOUEST – sols fins traités, PRIMATERRE – terre crue, pierre
- DD en TP : exemple du Vaucluse (horizon 2025)
 - 100% des matériaux excavés sur les chantiers, recyclés et valorisés
 - Tendre vers 0% de matériaux d'apport extérieur
 - Réduire les émissions des GES de 20%

Maurice BUFALO, Thierry DUBREUCQ,
Jean-Jacques FRY, Jean-Michel LEJEUNE, Dino MAHMUTOVIC

**CONCEPTION
ET CONSTRUCTION**
des ouvrages en sols fins

Merci pour votre attention

gregory.meyer@egis-group.com
fabienne.dermenonville@egis.fr



BOUTONNIER L. (2007) – Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation. Cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait/gonflement

MAHMUTOVIC D. (2016) – Etude du comportement des sols proches de la saturation. Validation numérique sur essais de laboratoire et ouvrages en terre

Projet ANR TerreDurable (restitution en 2016) : guide Conception et Construction des ouvrages en sols fins

DERMENONVILLE F. (2022) - L'optimisation des terrassements dans les sols fins : apports de la mécanique des sols non saturés (Article RGRA)