

Comportement de Stériles Miniers ROM à Hautes Pressions

E. Bard, M^a E. Anabalón: ARCADIS Chile.



Tendance actuelle de l'Industrie Minière Métallique (1)

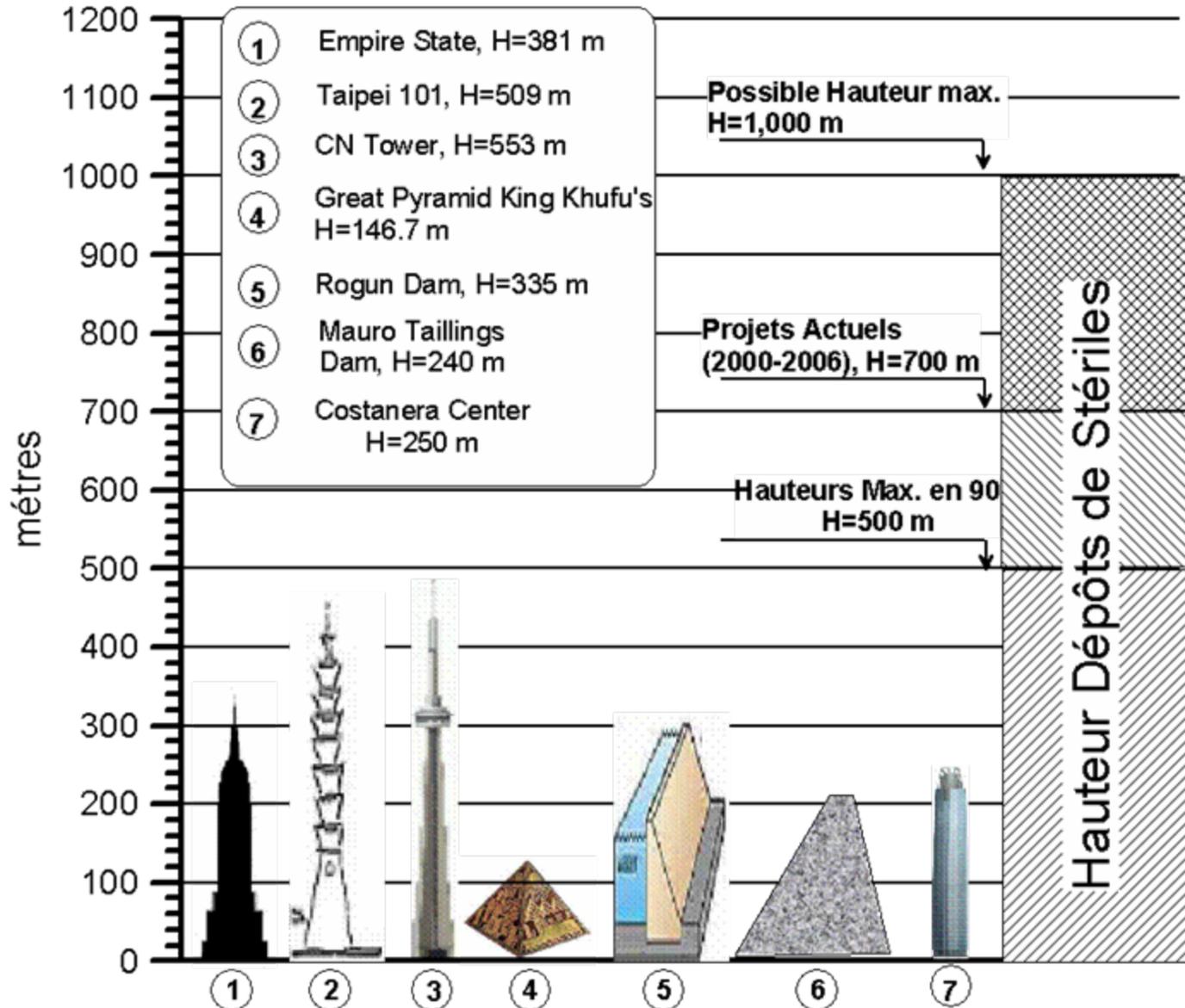
- **Niveaux de production élevés:**
 - réduire les coûts de production,
 - compenser la diminution des taux de concentration de minéraux,
 - prix actuel du cuivre: encouragement supplémentaire
- **Au Chili:** 10 des plus importantes mines de cuivre à ciel ouvert entreposent de l'ordre de 2 Mton de roches stériles par jour,
- **Comme au Canada ou au Pérou, au Chili:**
 - grandes exploitations minières situées en régions montagneuses
 - peu d'espace disponible pour l'entreposage de stériles,
 - certains dépôts ont déjà des hauteurs de 400 m à 500 m.

Tendance actuelle de l'Industrie Minière Métallique

(2)

- **Certaines mines** envisagent des expansions qui entraîneraient des dépôts de stériles de 700m de hauteur, voire plus,
- **Ce type de structure serait la plus haute jamais bâtie par l'homme:**
 - exigeant une prise en compte rigoureuse de tous les facteurs inhérents à leurs comportements à court et long termes,
 - représentant un défi majeur aux géotechniciens et chercheurs afin de trouver des solutions adéquates aux nombreux problèmes qui se présenteraient.

Dépôts de Stériles (WRD): plus hautes structures bâties par l'homme



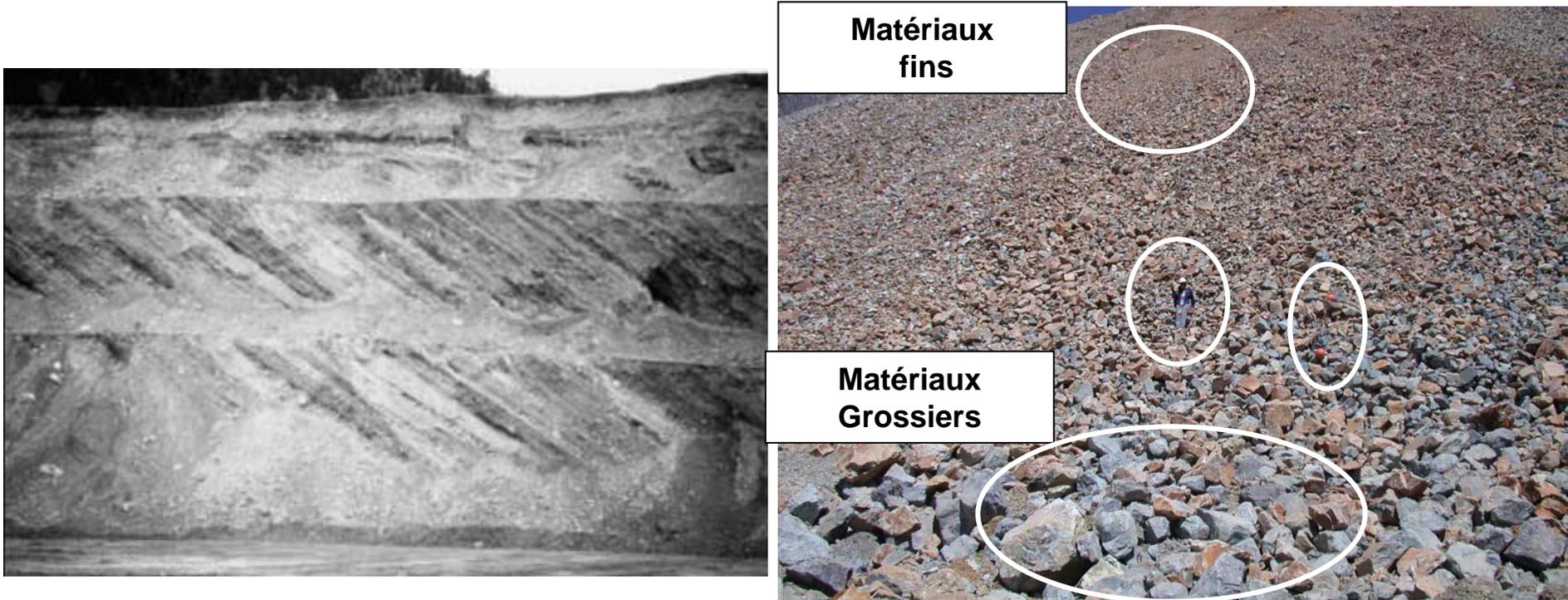
Importants défis posés par des dépôts de stériles miniers de grande taille

- **Caractériser et modeler des matériaux hétérogènes,**
- **Comportement mécanique des stériles miniers:**
 - soumis à des hautes pressions,
 - chemins de contraintes drainés et non drainés
- **Considérations de Dimensionnement et de Stabilité,**
- **Autres considérations,**
 - drainage, gestion des eaux affluentes, de la neige
 - conditions de fondation,
 - dimensionnement pour l'abandon (clôture des activités).
- **Modes possibles de rupture des dépôts de stériles,**
- **Instrumentation géotechnique fiable et robuste,**
- **Aspects environnementaux**

Caractérisation de Stériles Miniers: matériaux très hétérogènes

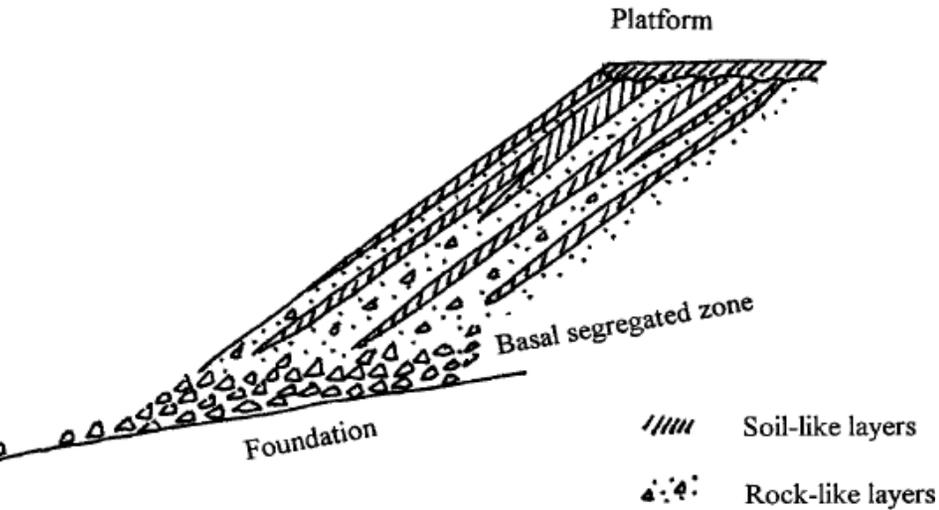
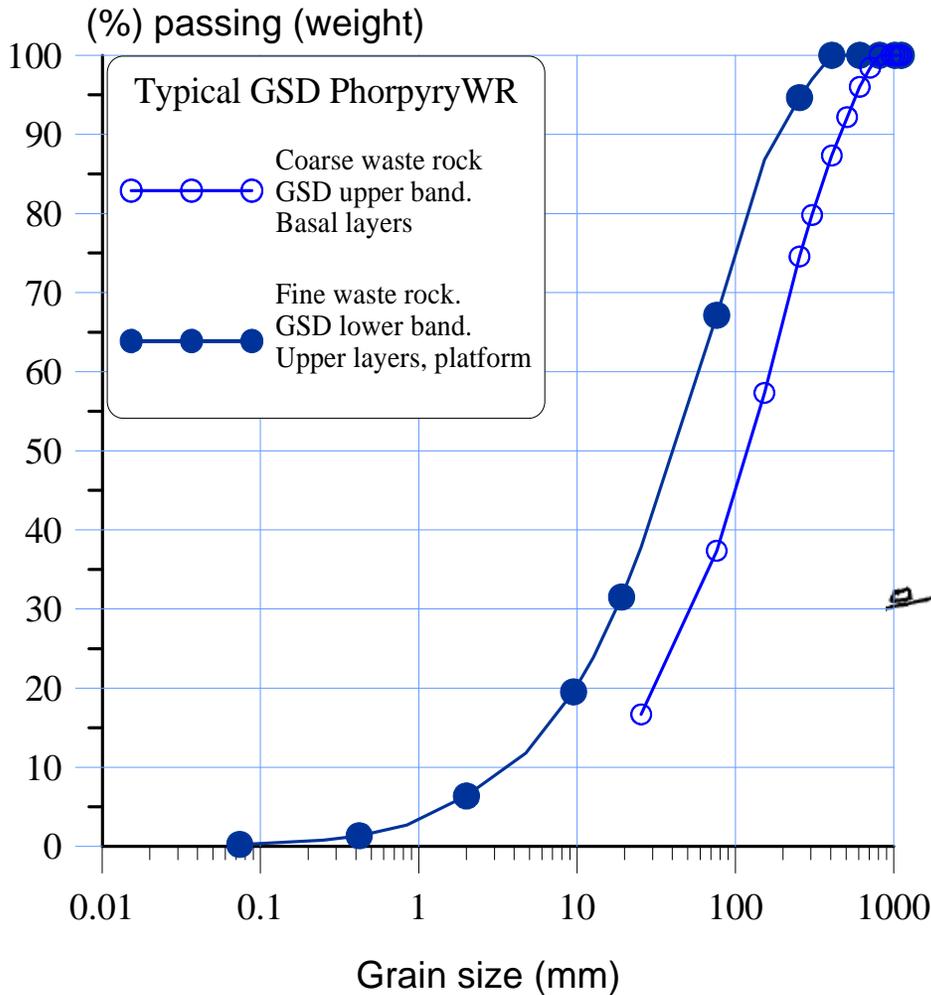
- **Matériaux granulaires extrêmement hétérogènes,**
 - tailles de grains: de sols fins à des blocs >1m,
 - diverses lithologies avec des résistances mécaniques différentes.
- **L'entreposage produit une ségrégation des matériaux selon la taille des particules,**
 - la ségrégation conduit à la formation de couches parallèles à la face de décharge,
 - stratification des particules le long du profil du dépôt
 - fines s'accumulent près de la surface de la couche,
 - grossières roulent vers le pied de la couche.
- **Modeler cette hétérogénéité pour des analyses est généralement une approche difficile.**

Caractérisation de Stériles ROM: matériaux hétérogènes - ségrégation



Hungr et al., 2002

Caractérisation de Stériles ROM: matériaux hétérogènes - ségrégation



Hungr et al., 2002

Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions

- **Mise en place d'un triaxial de grandes dimensions à charge contrôlée à IDIEM, Universidad de Chile:**
 - pression de confinement jusqu'à 2.5 MPa,
 - échantillons de grande taille: D=1.0 m, H= 1.8 m,
 - Taille maximale des grains: 203 mm. (8")

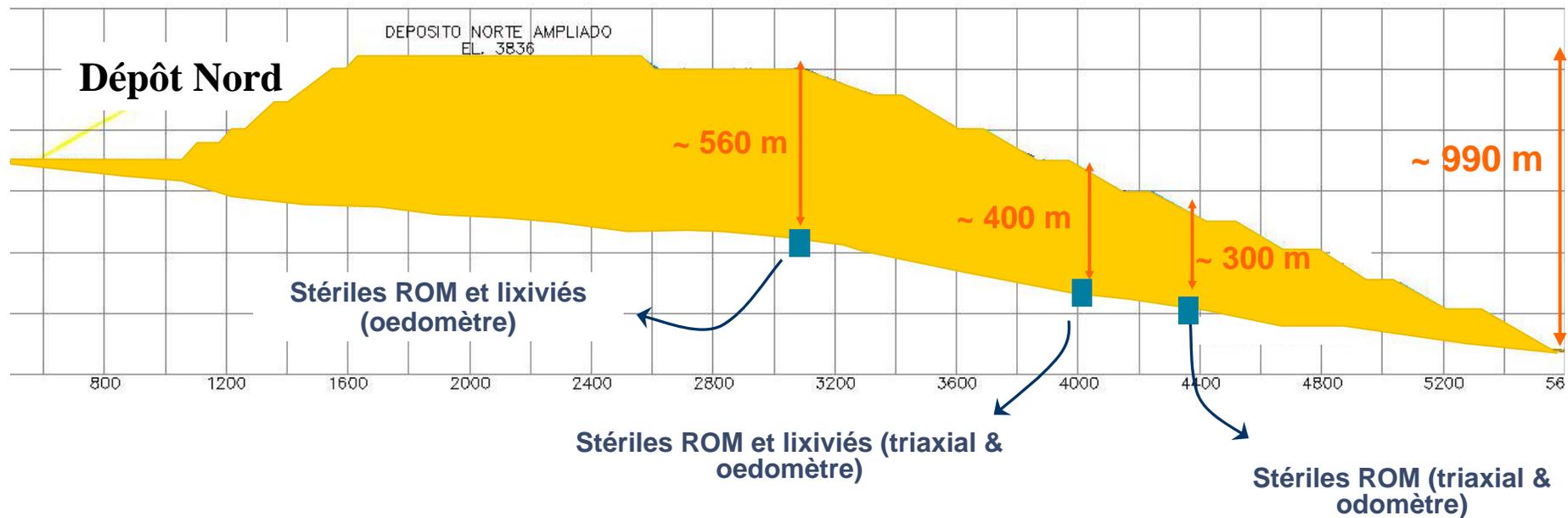


Cellule de charge



Echantillon D=1.0 m, H=1.8m
après essais $\sigma_{30}' = 2$ MPa.

Dépôts de stériles de Grande Hauteur (High WRD) Exemple: Dépôt de Stériles Nord (~2,800 Mton)



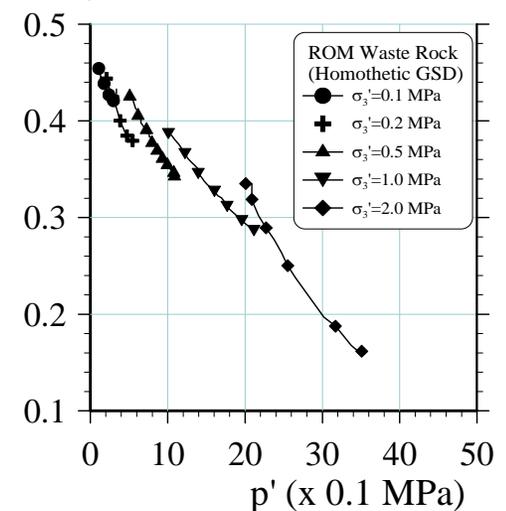
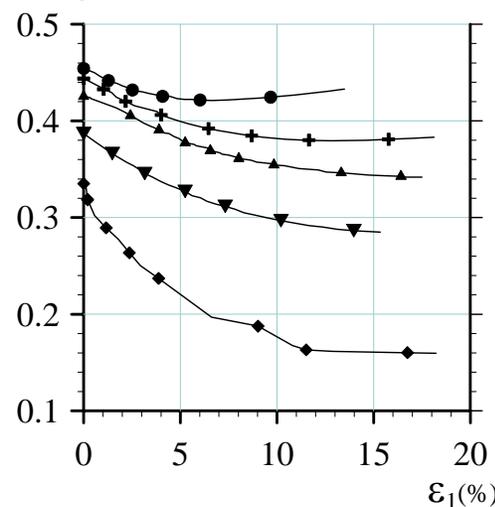
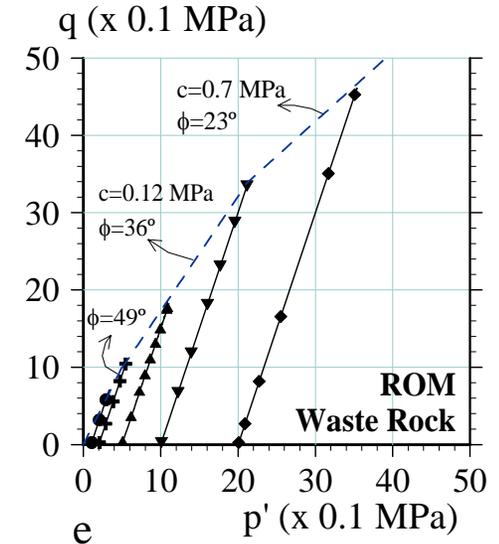
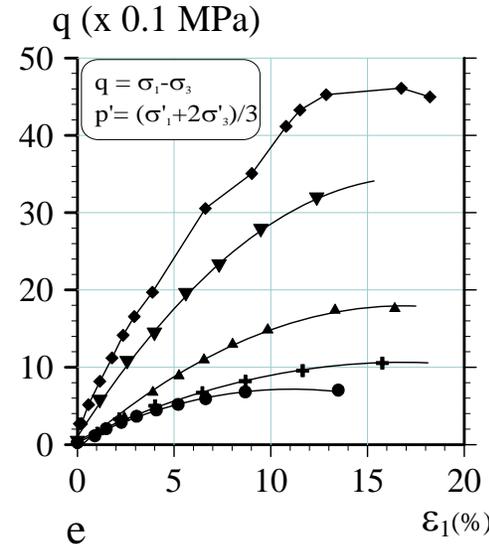
Site d'Emplacement du Dépôt Nord



Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions

• Matériaux Essayés

- Stérile ROM (tout venant)
- (Stérile porphyrique).
- Taille Max. grains: 8".
- DG Homothétique
- Chemin Triaxial: **CID**
 - Pression confinement σ_{30}' (MPa):
 - 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 2.0



Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions

• Matériaux Essayés

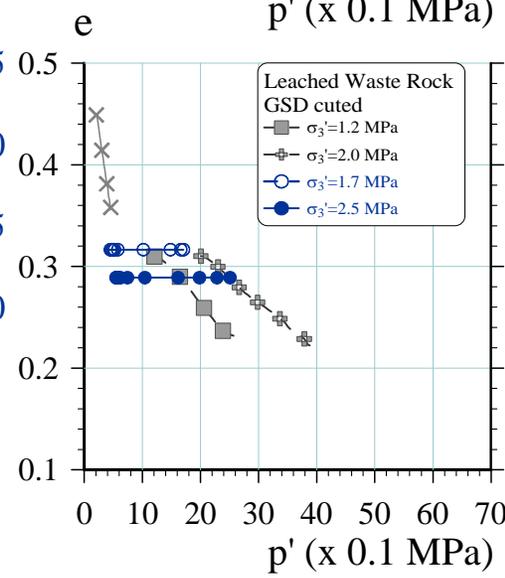
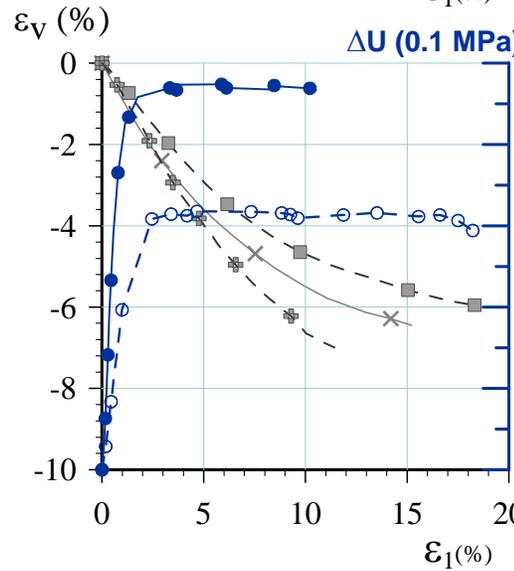
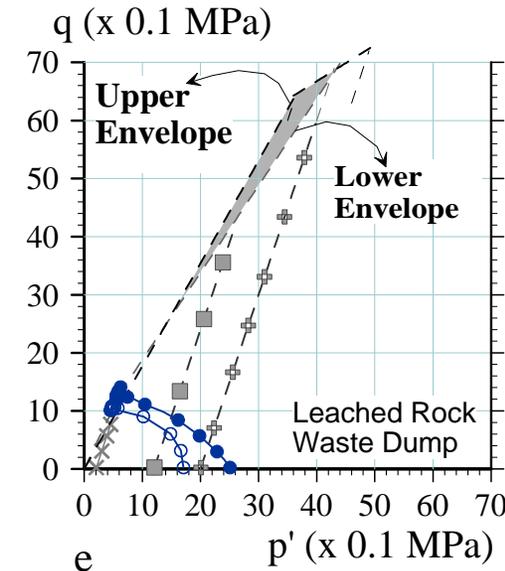
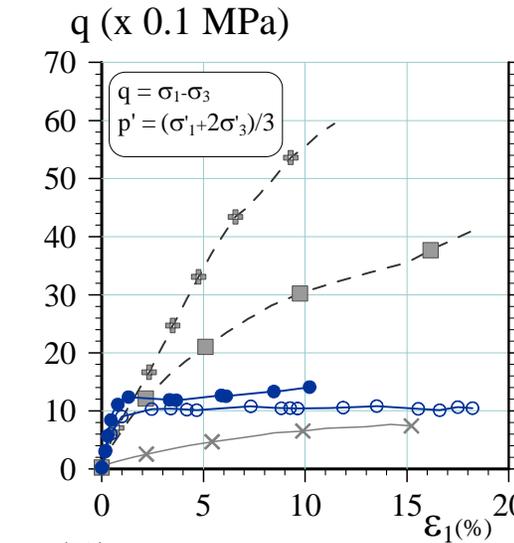
- Stériles ROM lixiviés (stériles porphyriques)
- Taille Max. Grains: 8".
- DG coupée (tronquée)
- Chemins Triaxiaux

- CID

- pressions de confinement σ_{30}' (MPa): 1.2, 2.0

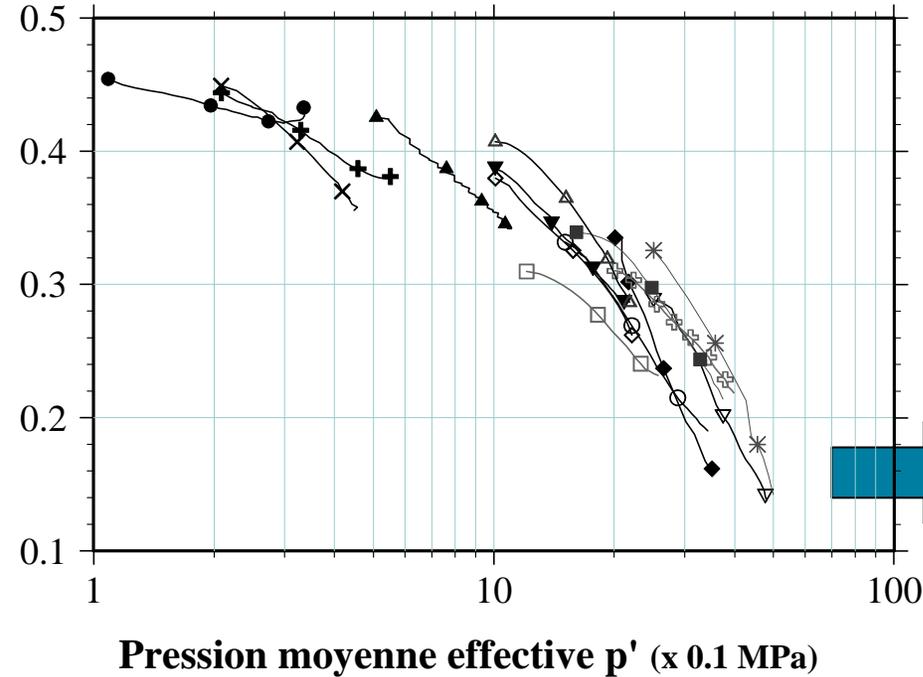
- CIU

- pressions de confinement σ_{30}' (MPa): 1.7, 2.5



Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions

Indice des Vides e

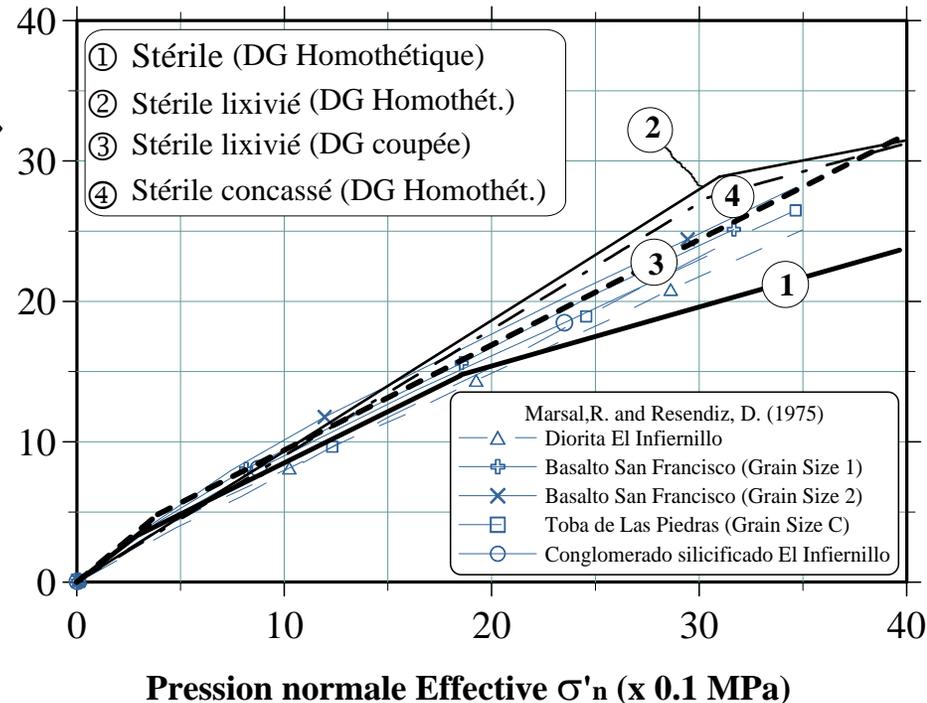


Enveloppes de résistance au cisaillement de stériles miniers dans le plan de Mohr. Echantillons porphyriques.

Comparaison avec résultats obtenus par Marsal et al., 1975 pour roches dures.

Résultats typiques de compressibilité sur chemins triaxiaux drainés
Stériles ROM porphyriques
Plan (e-p').

Résistance au Cisaillement τ (x 0.1 MPa)

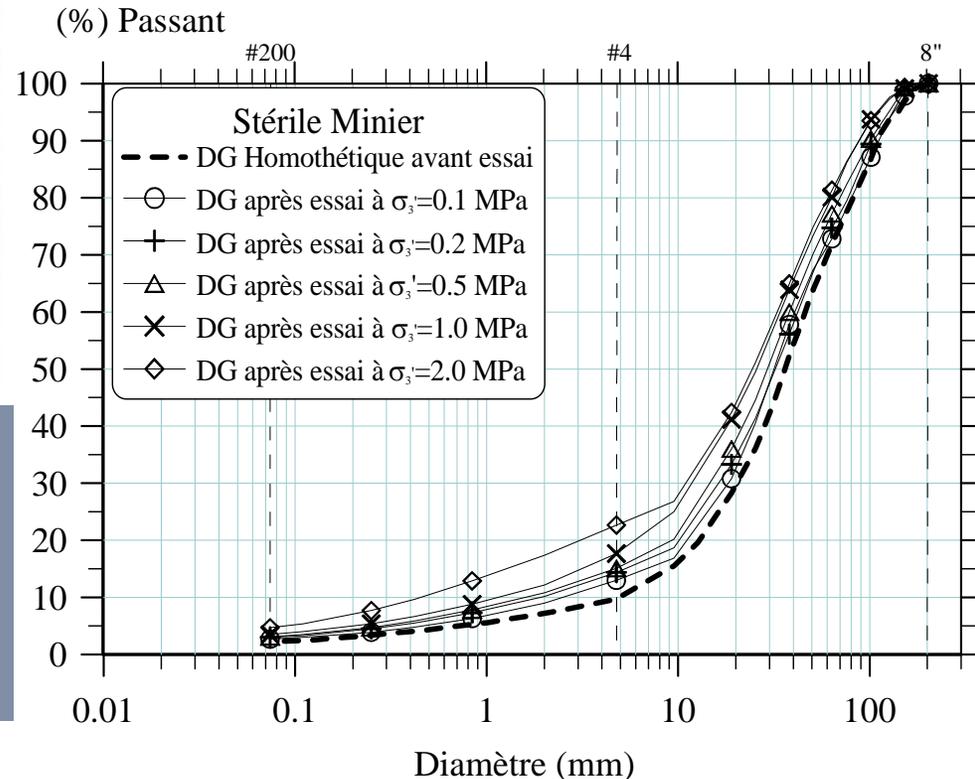


Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions

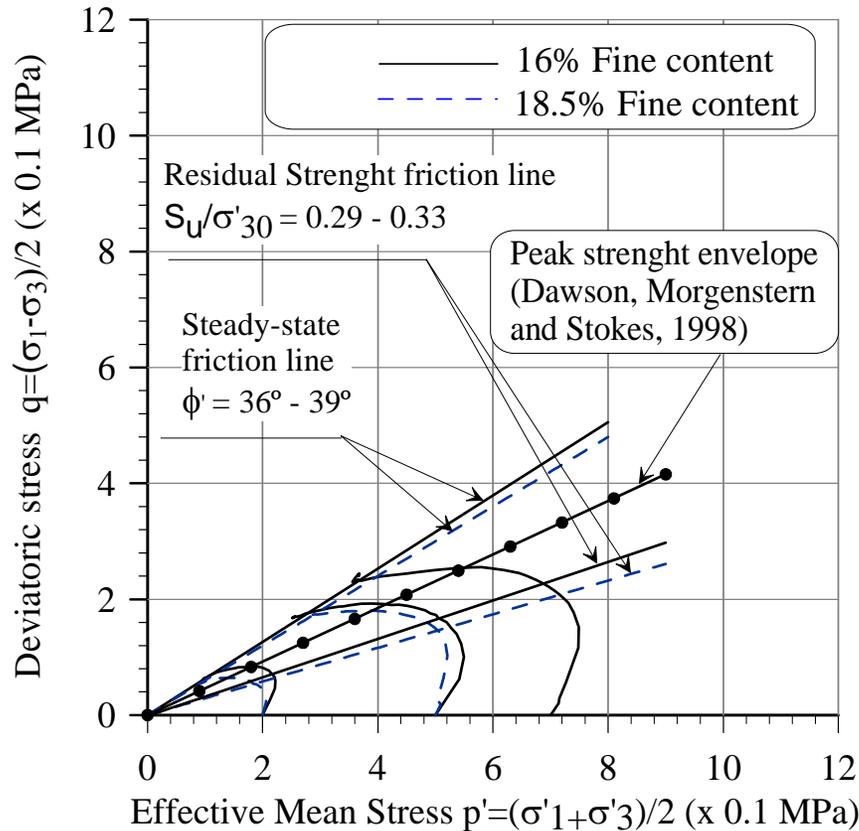


DG initiale modifiée par la rupture de particules, croissante avec la pression moyenne effective. Augmentation de la fraction de sables et de fins, moins importante, dans le squelette granulaire.

RUPTURE DE PARTICULES: Détail de la rupture de particules après essais triaxiaux drainés (échantillons de stériles porphyriques)

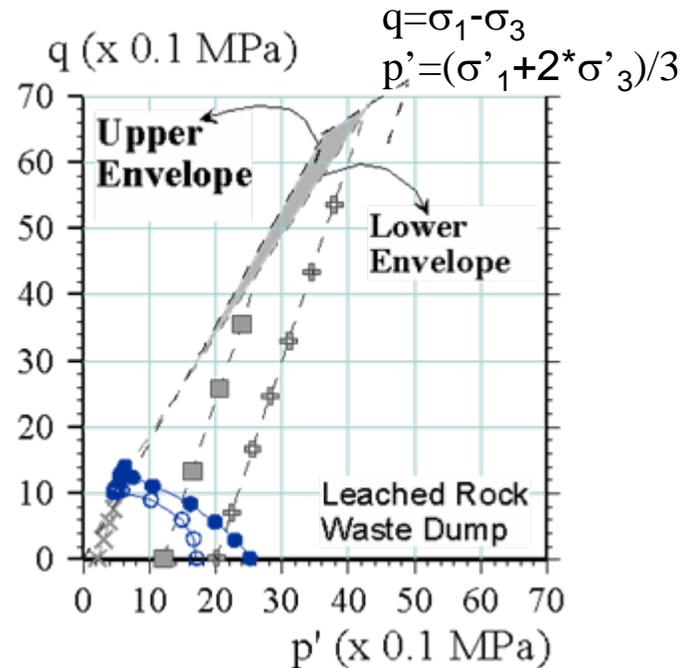


Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions

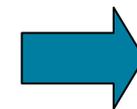


Trajectoires de tensions obtenues d'essais triaxiaux CIU effectués sur des Stériles porphyriques lixiviés.

Trajectoires de tensions obtenues d'essais CIU sur la fraction sableuse de matériaux lixiviés (Valenzuela, 2004).



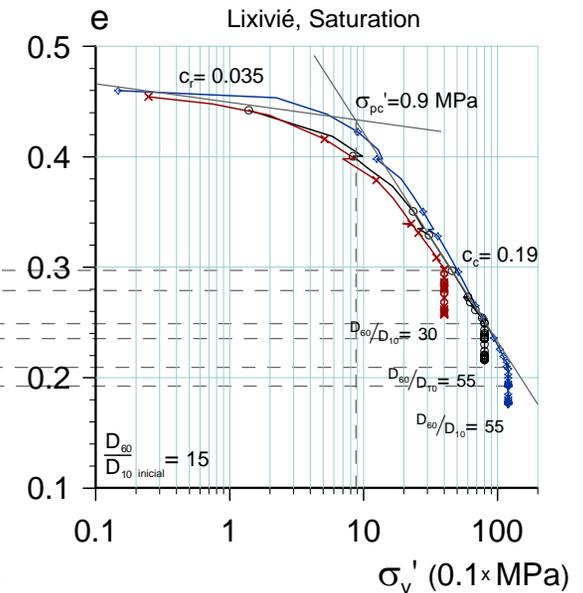
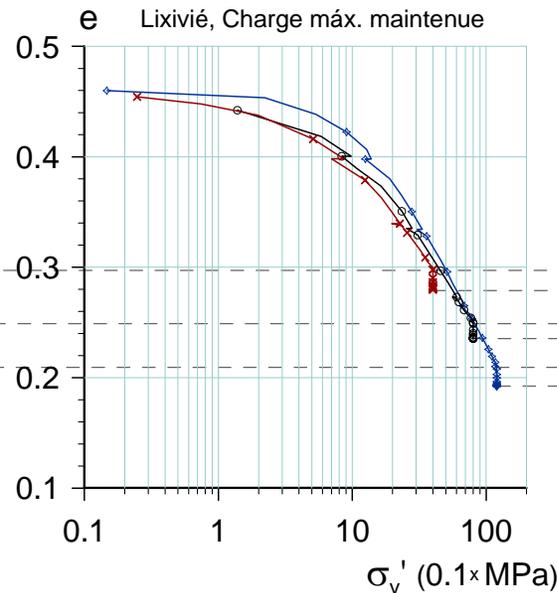
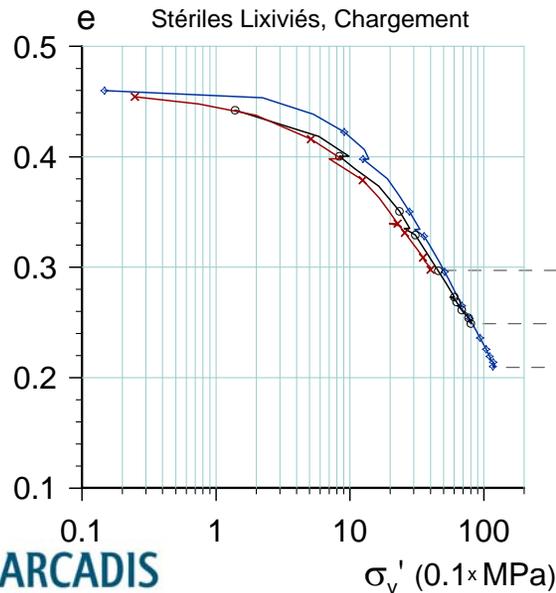
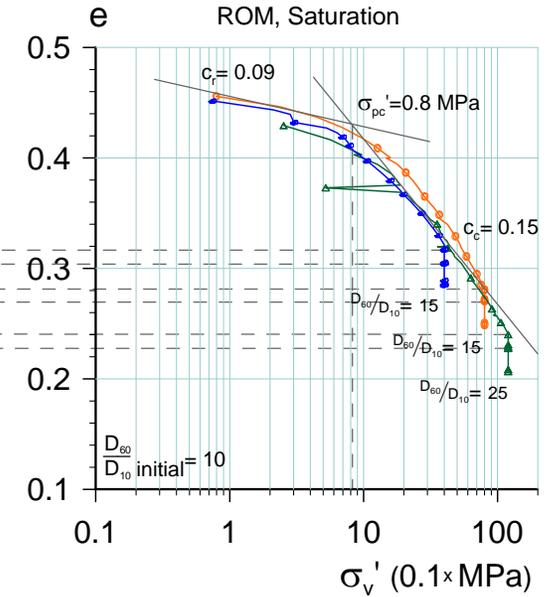
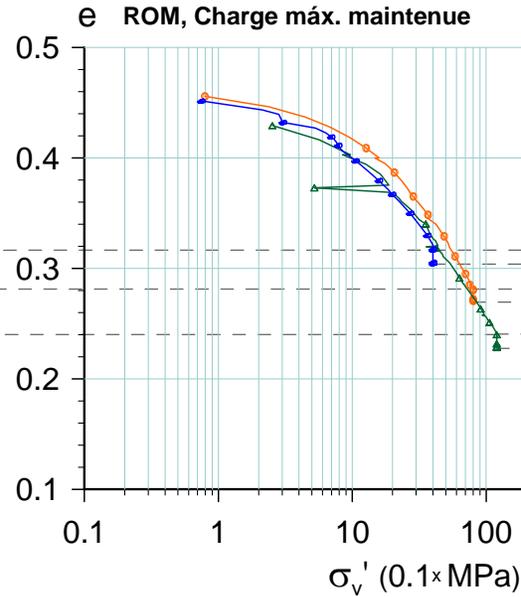
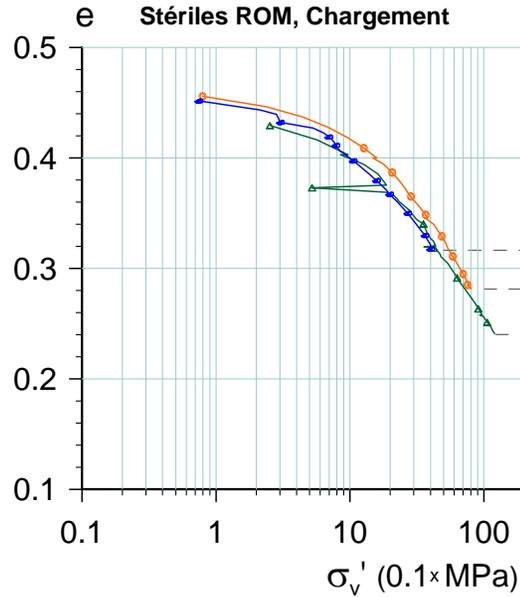
Condition non drainée



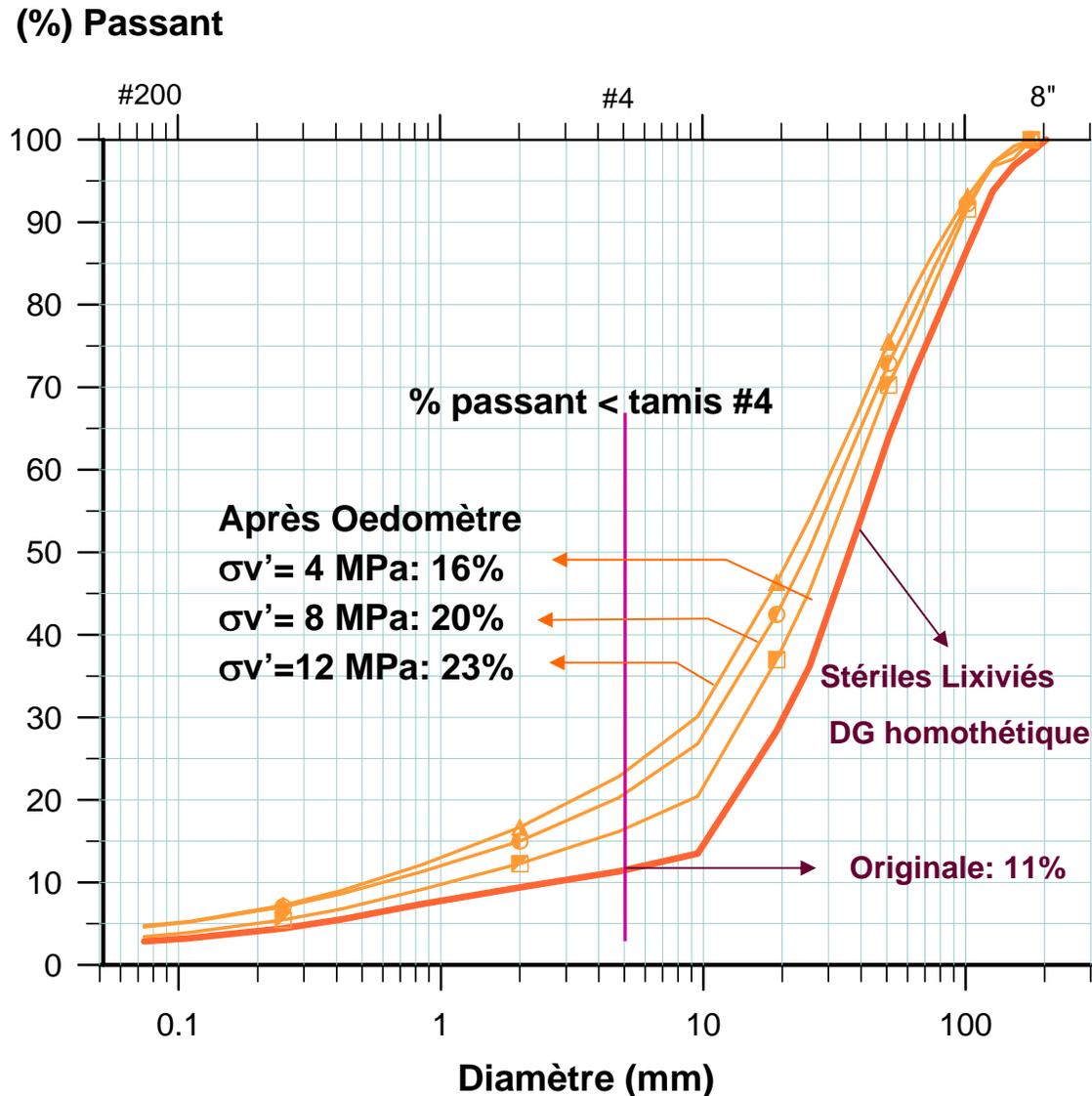
$$S_u = 0.30 \sigma'_{30}$$

Comportement Mécanique de Stériles

Odomètre à hautes pressions: ROM et lixiviés

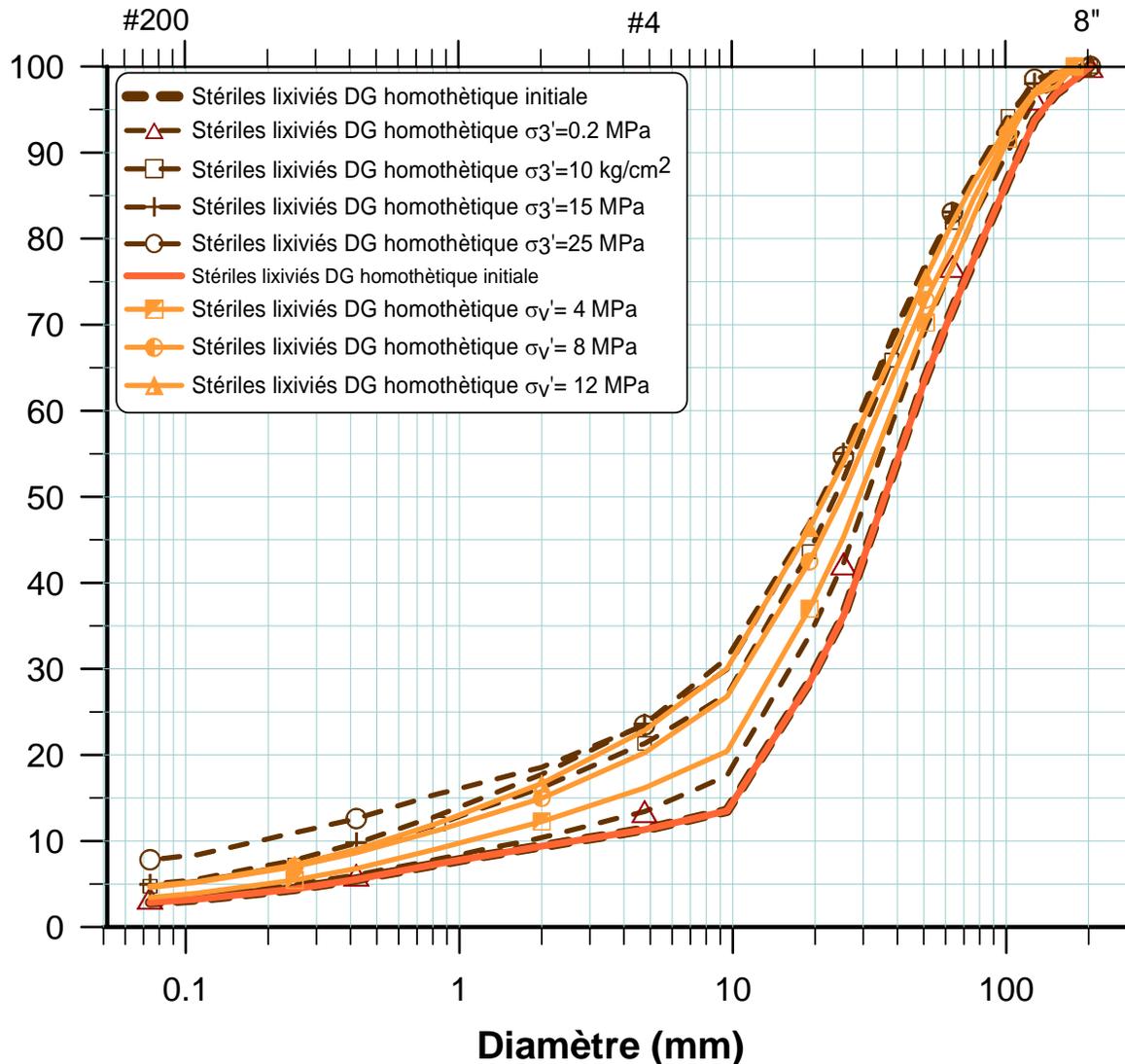


Comportement Mécanique de Stériles Odomètre à hautes pressions: Lixiviés

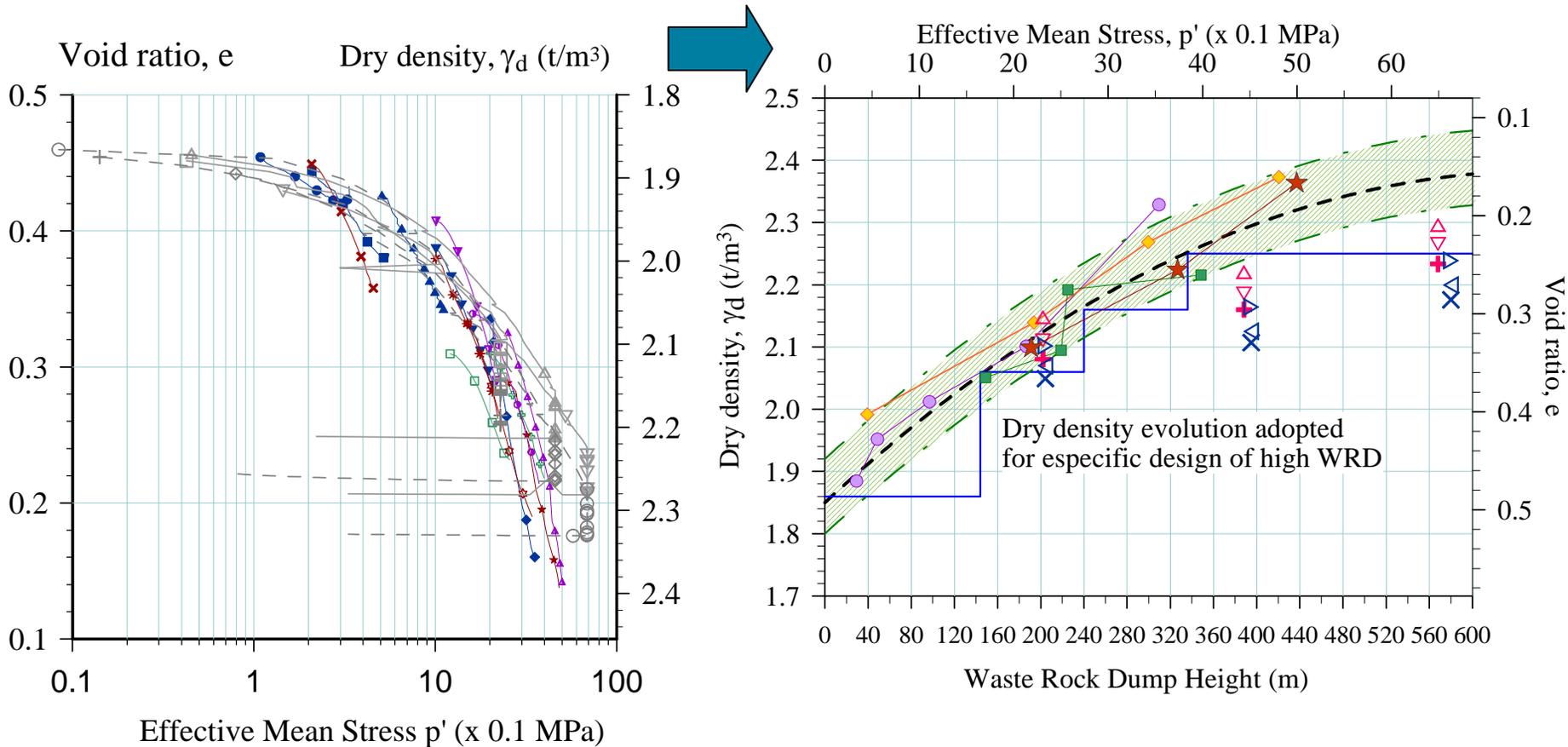


Comportement Mécanique de Stériles Odomètre à hautes pressions: ROM

(%) Passant

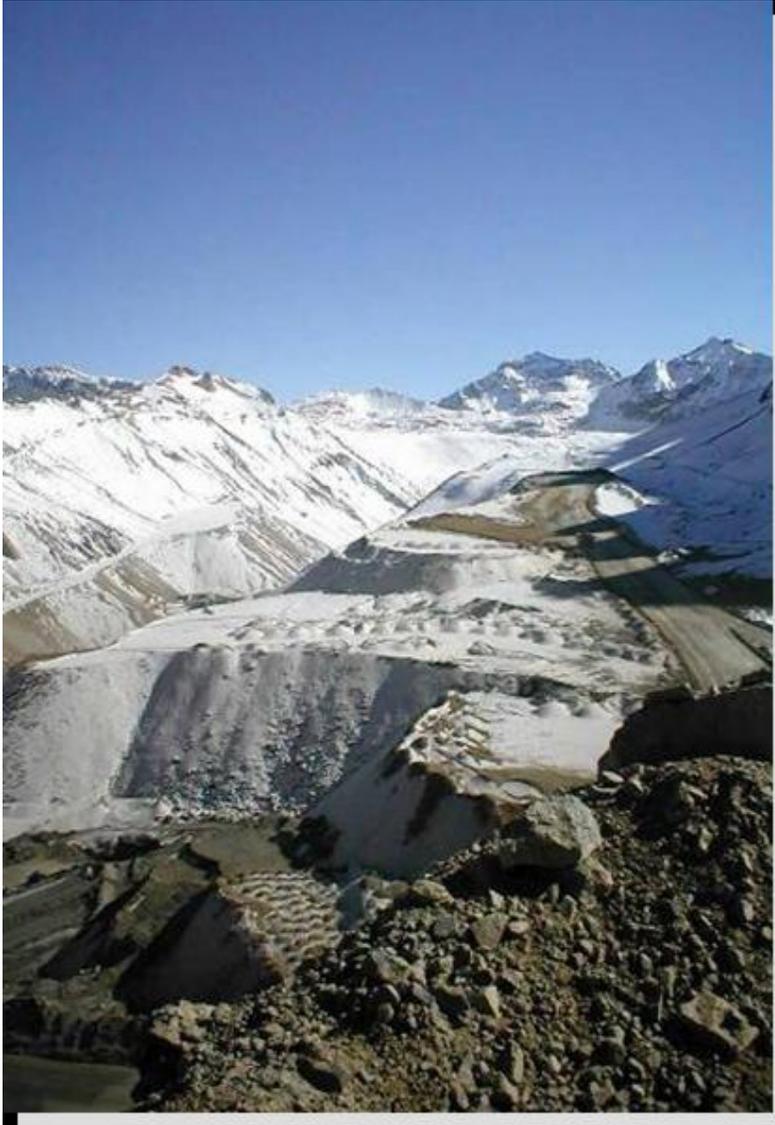


Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions: Evolution de la Densité.



Comparaison de la compressibilité de stériles porphyriques sous chemins triaxiaux et odométriques à hautes pressions. E évolution de la densité avec la hauteur du dépôt.

Dépôts de Stériles en Haute Montagne



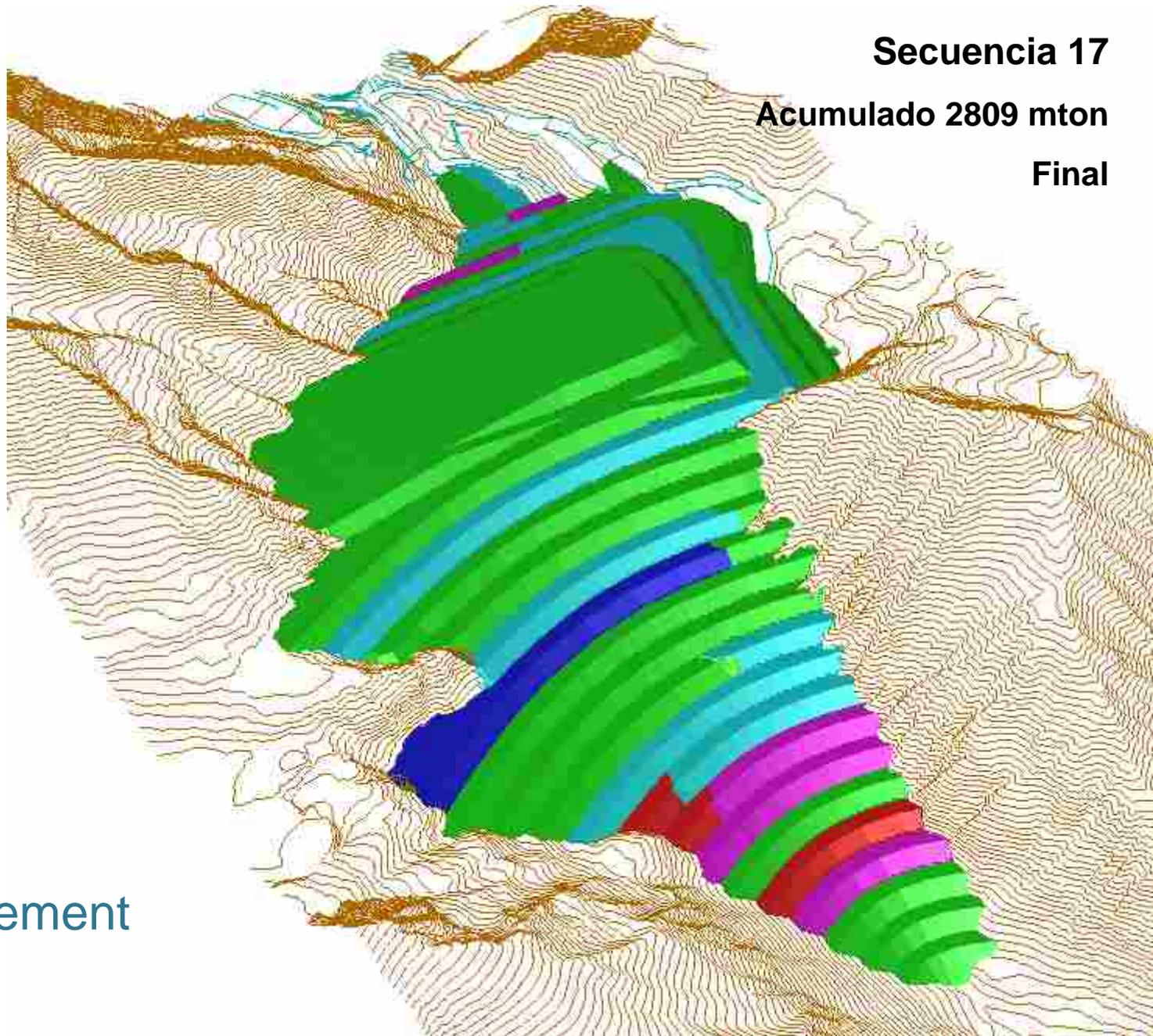
Analyses de Stabilité et Considérations de Dimensionnement

- **Dépôts de grande hauteur : des structures qui impliquent un défi**
 - les pratiques actuelles de construction doivent être améliorées (dépôt avec ingénierie),
 - adopter des mesures défensives: réduire les instabilités potentielles,
- **Dimensionnement consistant avec les critères de stabilité adoptés**
 - vallées à fortes pentes : couches de hauteur limitée
 - réduire la hauteur de la face d'avancement,
 - réduire une ségrégation excessive
- **Critères de dimensionnement en accord avec les plans d'abandon (clôture):**
 - éviter une manipulation ultérieure excessive de stériles,
 - éviter des considérations restrictives:
 - critères de déformations au lieu d'un certain FS

Dépôt de
Stériles de
Grande
Hauteur

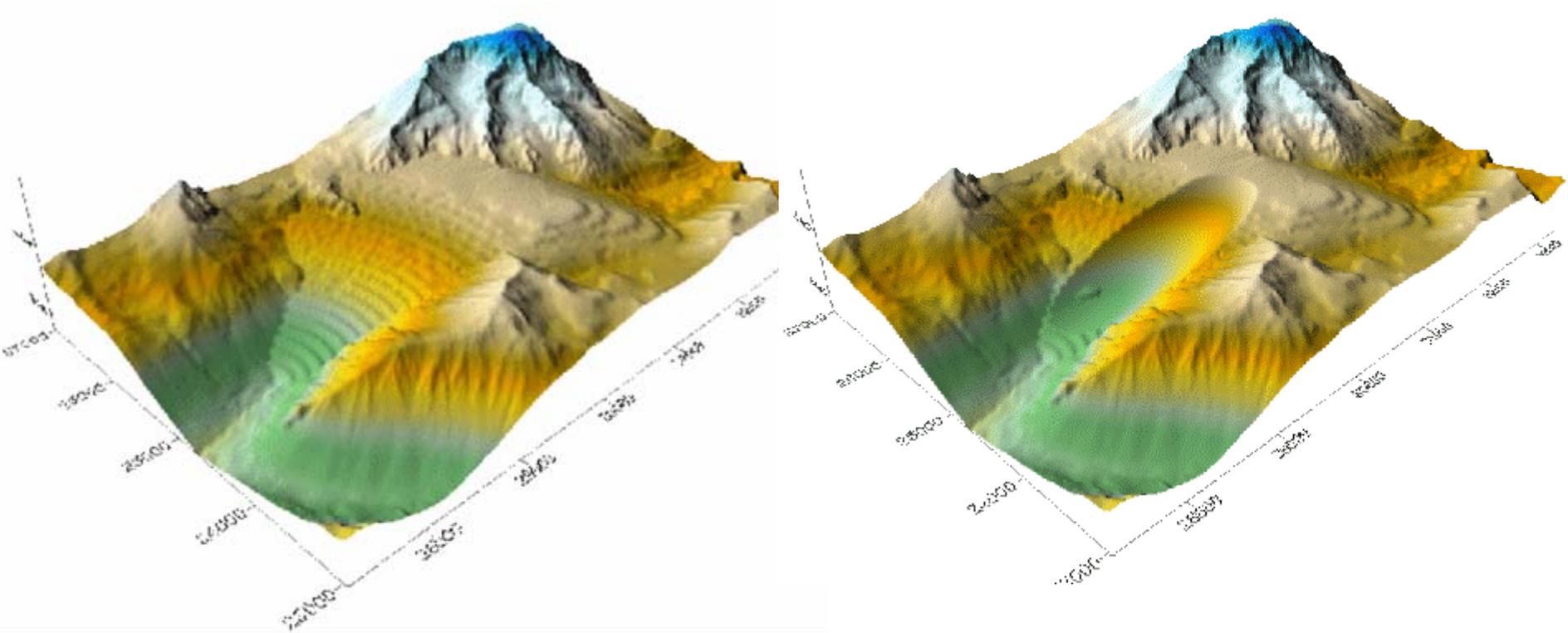
Dépôt
Nord

Dimensionnement



Analyses de Stabilité et Considérations de dimensionnement

Méthode d'Equilibre Limite: 3-D



F.S. static= 1.93

F.S. pseudo= 1.42 $k_h=0,12$

Analyses de Stabilité et Considérations de dimensionnement

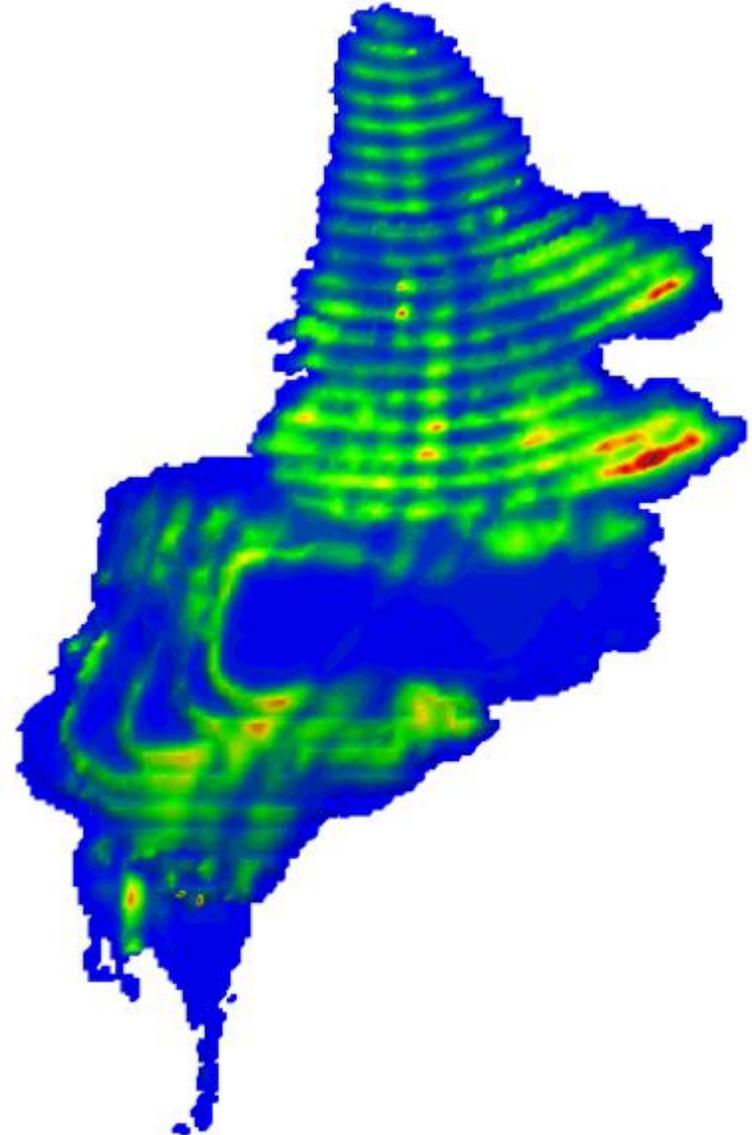
- Analyse formelle de stabilité **3D (FLAC)**

- **Géométrie Finale de Dépôt**

- **MCE**

Déplacements horizontaux rémanents maximales (8 – 10 m) avec déplacements locaux de 25 m, MCE

Déplacements concentrés principalement dans les bermes intermédiaires.



Conclusions: Stériles Porphyriques

- Stériles ROM présentent des résistances au cisaillement appropriées aux hautes pressions,
- Comportement mécanique ne diffère pas sensiblement d'autres matériaux granulaires utilisés dans la construction de barrages,
- Propriétés mécaniques permettent d'aborder la construction de dépôts de grandes hauteurs,
 - l'enveloppe de résistance s'incurve à mesure que la pression moyenne croît,
 - lié à l'augmentation de la compressibilité du squelette granulaire,
 - associé au phénomène de rupture de particules, notamment pour des pressions moyennes >1 MPa.

Conclusions: Stériles Porphyriques

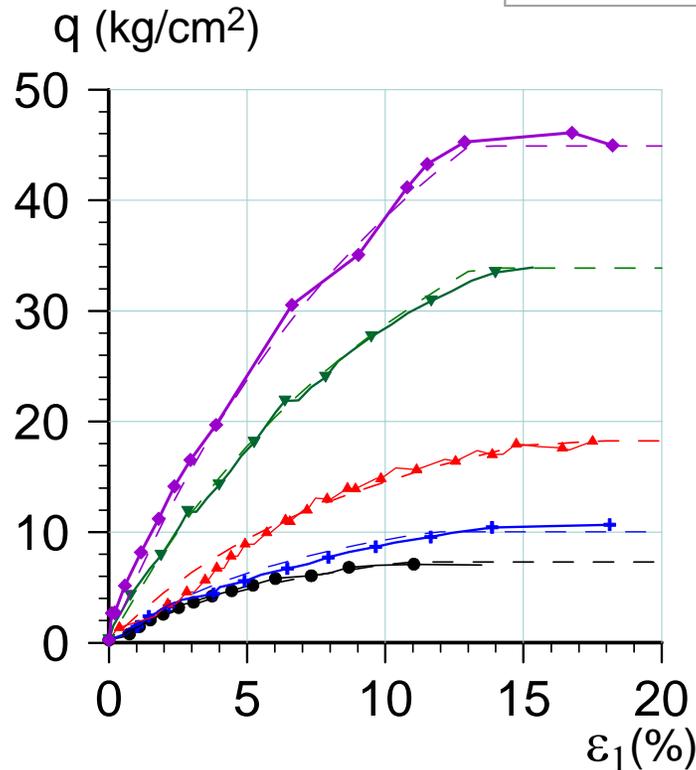
- Les granulométries obtenues à hautes pressions pour ces matériaux tendent vers une granulométrie finale semblable,
- Recommandation de dimensionnement: dépôts de grande hauteur en haute montagne: talus final avec un angle global de 22° pour:
 - générer une zone peu chargée destinée à créer un « contrefort » de haute résistance et haute perméabilité,
 - réduire l'action concomitante de dégradation mécanique et chimique (eaux acides)
 - risques d'avalanches pendant l'opération et l'abandon,
 - créer le talus d'abandon définitif pendant l'opération.

Gracias

Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions: Module de Déformation.

$$E_i = k \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma'_3}{P_a} \right)^n$$

| | |
|---------------|---|
| Konder et al. | E _i = module de déformation tangent |
| | K = constante adimensionnelle |
| | n = exposant adimensionnel |
| | P _a = pression atmosphérique (0.1 MPa) |
| | σ' ₃ = pression effective de confinement |



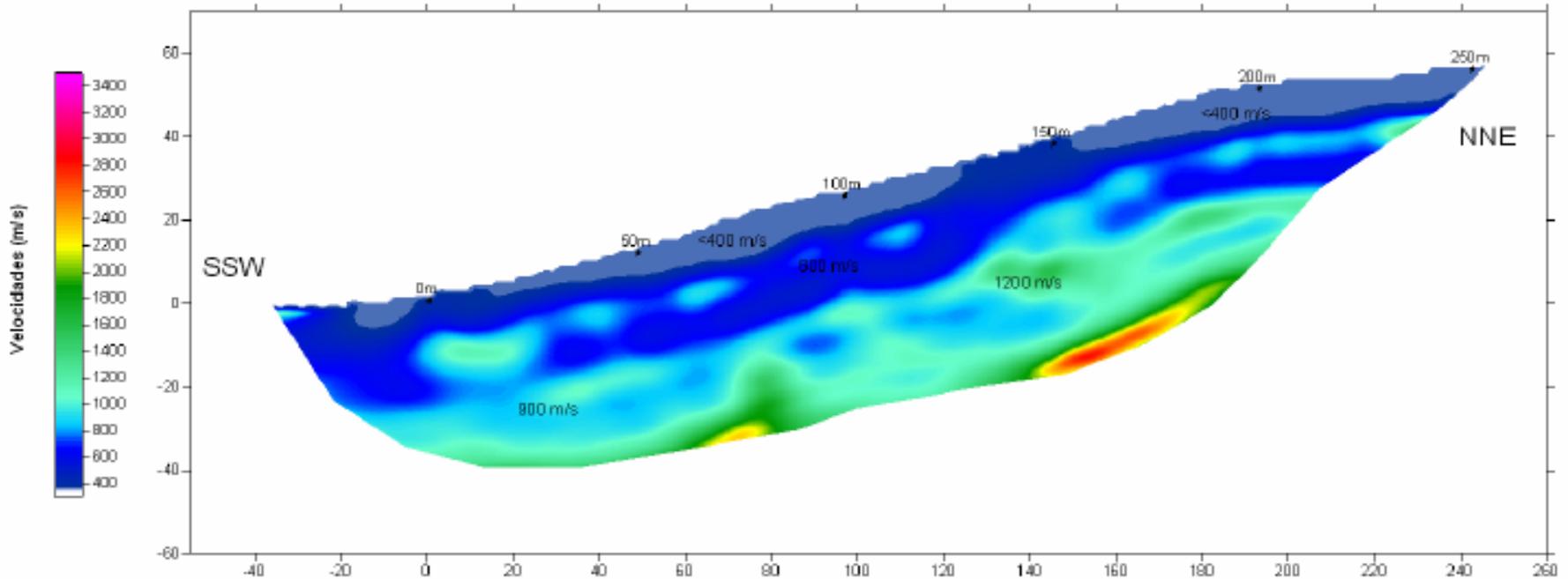
- Ensayos Triaxial $\sigma'_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$
- Ensayos Triaxial $\sigma'_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$
- ▲ Ensayos Triaxial $\sigma'_3 = 5 \text{ kg/cm}^2$
- ▼ Ensayos Triaxial $\sigma'_3 = 10 \text{ kg/cm}^2$
- ◆ Ensayos Triaxial $\sigma'_3 = 20 \text{ kg/cm}^2$
- Modelo hiperbólico $\sigma'_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$
- Modelo hiperbólico $\sigma'_3 = 2 \text{ kg/cm}^2$
- Modelo hiperbólico $\sigma'_3 = 5 \text{ kg/cm}^2$
- Modelo hiperbólico $\sigma'_3 = 10 \text{ kg/cm}^2$
- Modelo hiperbólico $\sigma'_3 = 20 \text{ kg/cm}^2$

Modelo Hiperbólico
k=170, n=0.43

Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions: Module de Déformation.

Profils géophysiques sur un dépôt de Stériles « jeune »

Modèle de propagation des ondes de compression. Echelle 1:000

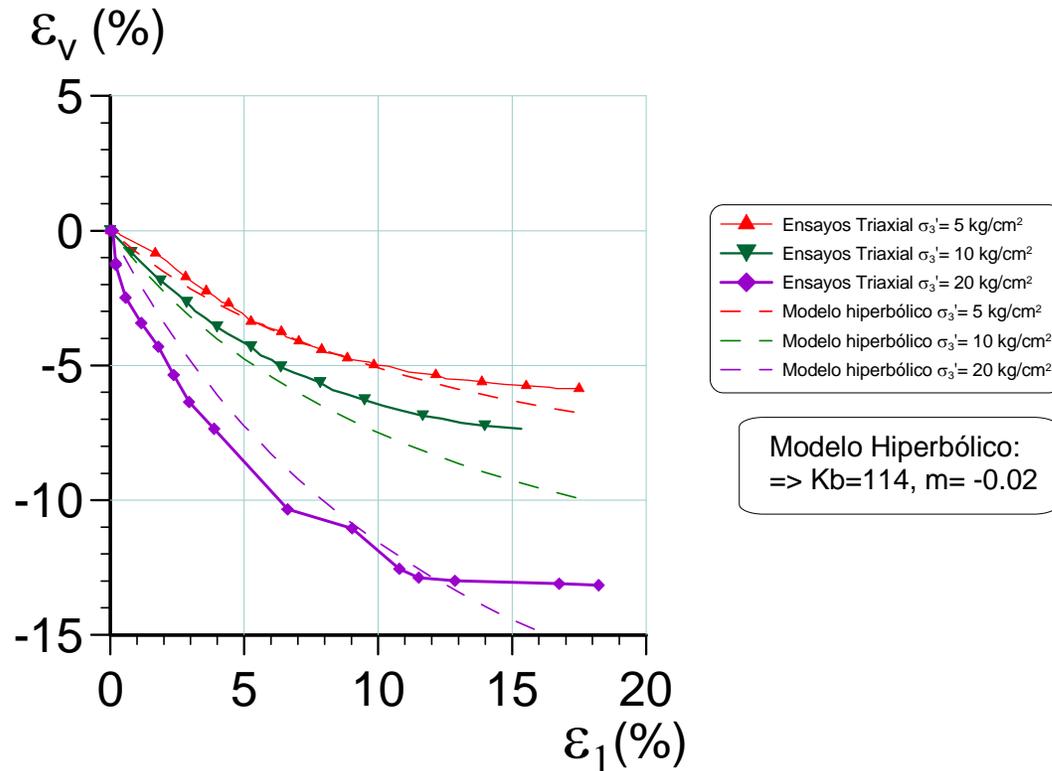


Comportement Mécanique de Stériles à Hautes Pressions: Module Volumétrique B:

Stériles ROM Porphyriques

$$B = kb \cdot Pa \cdot \left(\frac{\sigma'_3}{Pa} \right)^m$$

| | |
|---------------|---|
| Konder et al. | B = module volumétrique |
| | Kb = constante adimensionnelle |
| | m = exposant adimensionnel |
| | Pa = pression atmosphérique (0.1 MPa) |
| | σ'_3 = pression effective de confinement |



=> valeur négative de l'exposant associée aux matériaux qui présentent rupture de particules.