

Les caractéristiques géotechniques et hydrauliques des déchets ultimes de classe II (ménagers et industriels)

Franck OLIVIER
Consultant - Gérant d'Ecogeos
Sarl hébergée au LTHE à Grenoble

*Journée technique du Comité Français de Mécanique des Sols
“Géotechnique et protection de l’environnement”, Paris, 23 janvier 2008*

SOMMAIRE

1. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES DECHETS

1.1. Comportement en conditions normales

- Compression initiale sous l'effet du compactage
- Tassement primaire sous l'effet du chargement
- Tassement secondaire sous l'effet du temps
- Fluage latéral aux abords des talus de déchets

1.2. Comportement en conditions limites

- Analyse à la rupture au travers de la cohésion et de l'angle de frottement interne

2. CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DES DECHETS

2.1. Propriétés hydro-statiques

- Teneur en eau, capacité au champ

2.2. Propriétés hydro-dynamiques

- Porosité utile
- Conductivité hydraulique

2.3. Exemple d'application : optimisation de la vidange de casiers saturés en lixiviat

DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES DECHETS

- *Problématique*

DECHETS

Problématique plus complexe que dans le cas des sols :

- Déchet



Composition et structure : **matériau hétérogène, anisotrope** et dont les constituants solides changent de propriété en fonction de la teneur en eau.

- Vieillessement



Dégradation des propriétés géotechniques sous l'effet du vieillissement (biodégradation de la matrice organique, combustion lente, désagrégation progressive des nappes de renforcement).

- *Enjeux associés*

Enjeu économique



Estimation des capacités de stockage
Optimisation du phasage d'exploitation
Raidissement des talus

Enjeu environnemental



Pérennité des couvertures
Stabilité des talus
Interactions déchets - structures

INITIALE SOUS L'EFFET DU COMPACTAGE

Masse des engins : 25 à 55 T

Bomag BC 772 RB / 36 t / 330 kW



Caterpillar 826 G / 37 t / 253 kW



Vandel Quantum 350 / 37 t / 261 kW



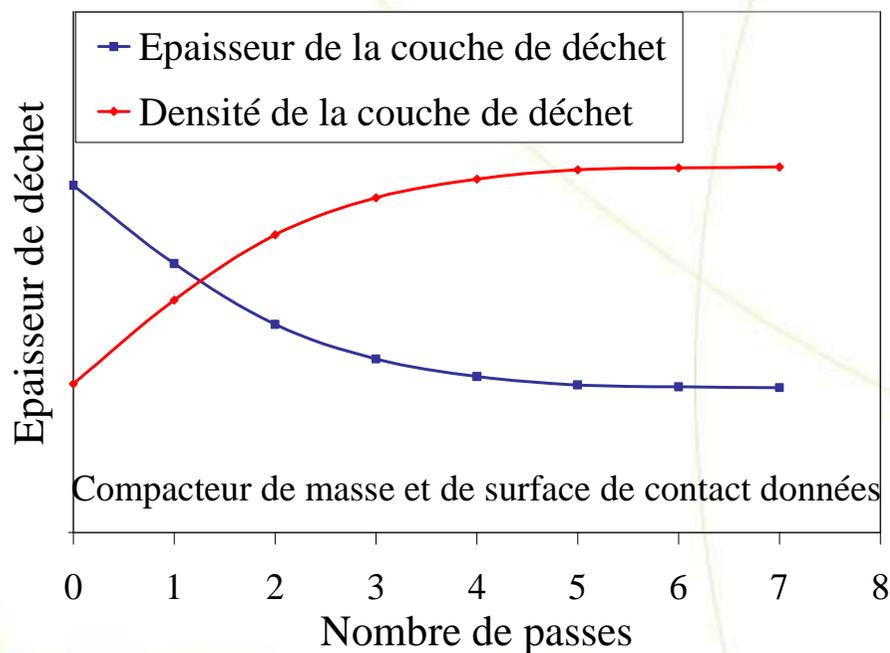
INITIALE SOUS L'EFFET DU COMPACTAGE



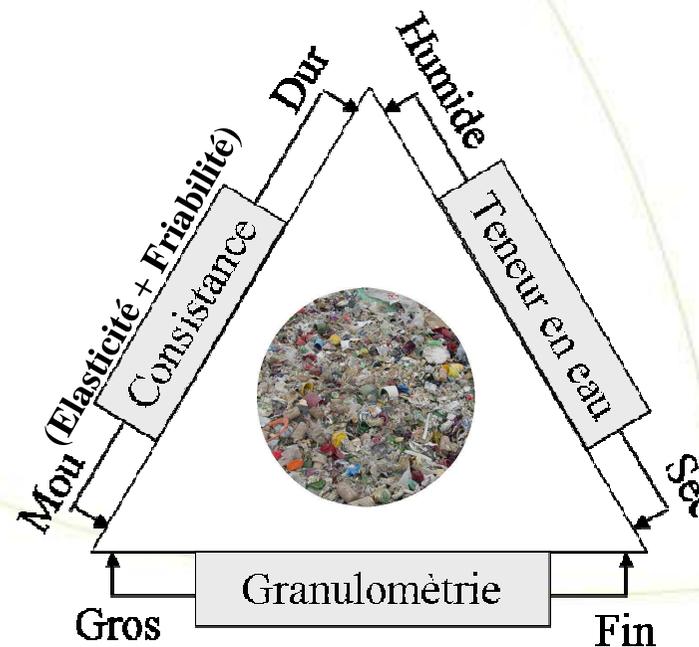
Dents à double alignement



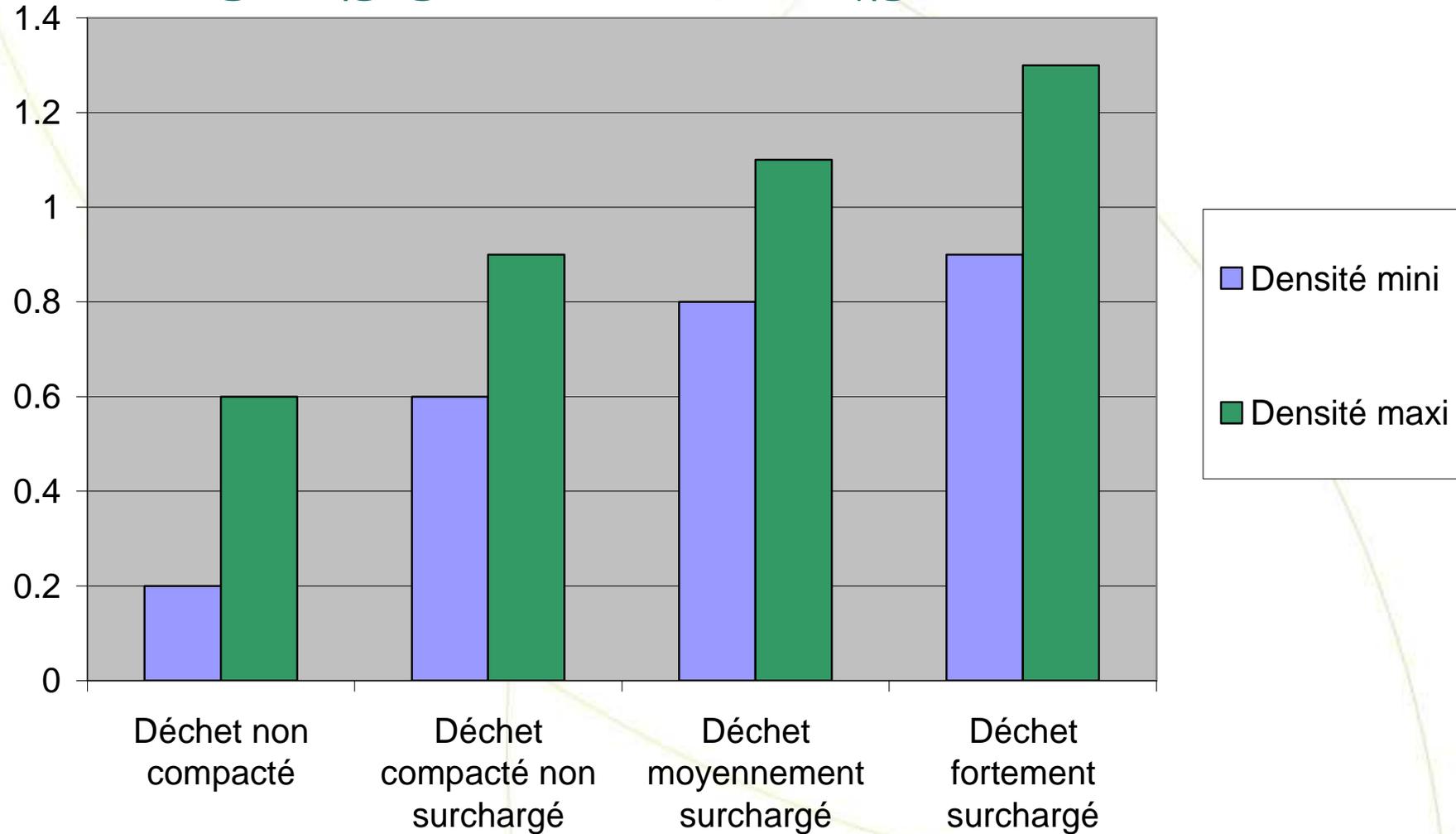
Couteaux (DIB)



Densité du déchet



COMPRESSION INITIALE SOUS L'EFFET DU COMPACTAGE : IMPACT SUR LA DENSITE



COMPACTAGE : CAS PARTICULIER DU MBT

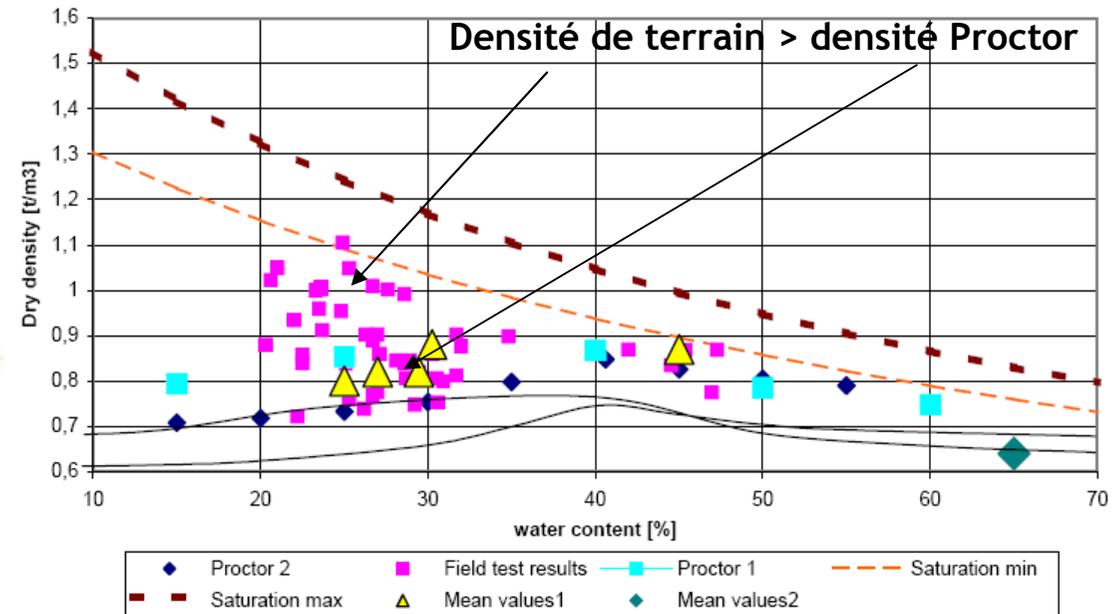
Biological Treatment') Entermann et Wendt (2007)



MBT :
chaîne de process comprenant tri, broyage et compostage (aérobie) ou méthanisation (anaérobie)



Mode de gestion très répandu en Allemagne notamment



DEUX COMPOSANTES DE TASSEMENT : PRIMAIRE / SECONDAIRE

Tassement primaire

- fonction de la charge
- supposé instantané



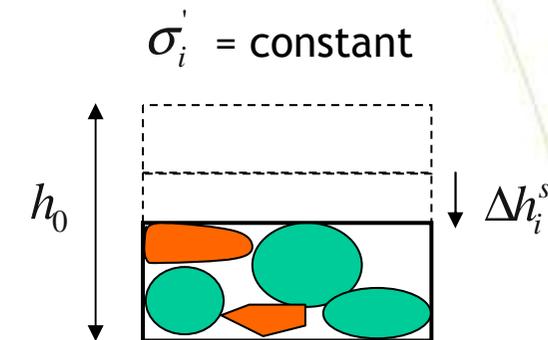
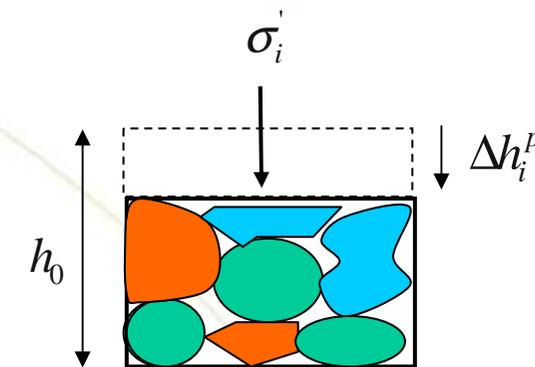
Distorsion, écrasement
et réarrangement des particules

Tassement secondaire

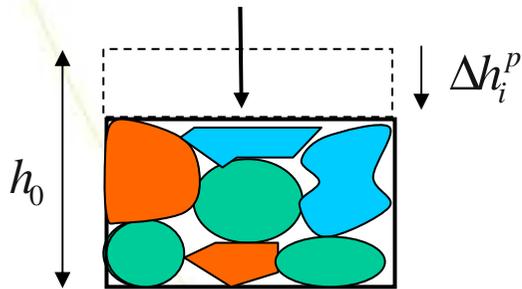
- fonction du temps écoulé
- supposé indépendant de la charge



Fluage, perte de masse et tamisage des
éléments fins au travers des éléments
plus grossiers



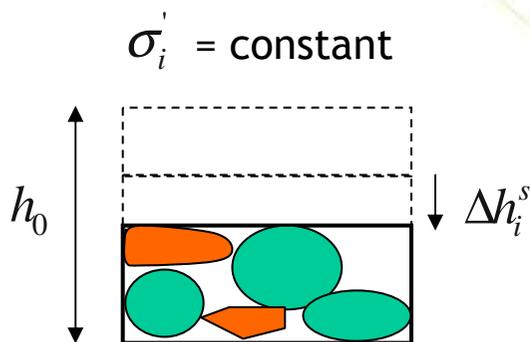
EQUATIONS PROPOSEES DANS LE MODELE ISPM (*'Incremental Settlement Prediction Model'*)



Tassement primaire

$$\frac{\Delta h_i^P}{h_0} = C_R^* \cdot \log \frac{\sigma_c + \Delta \sigma'_i}{\sigma_c} = C_R^* \cdot \log \frac{\sigma'_i}{\sigma_c}$$

où C_R^* est le coefficient de compression
primaire intrinsèque

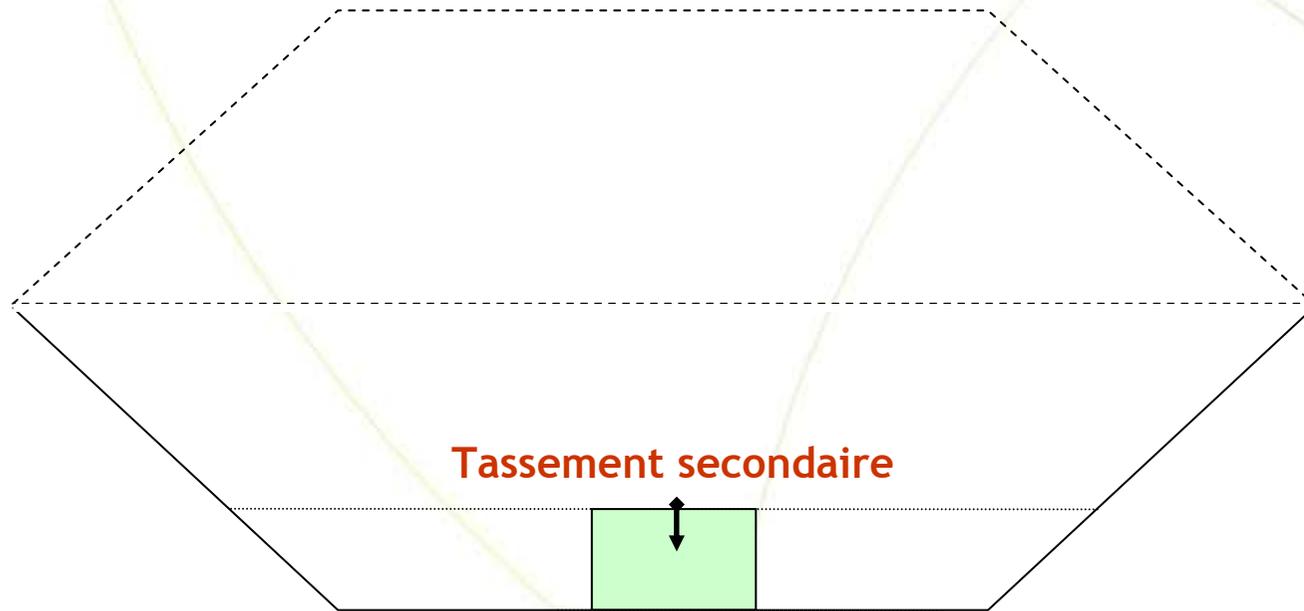


Tassement secondaire

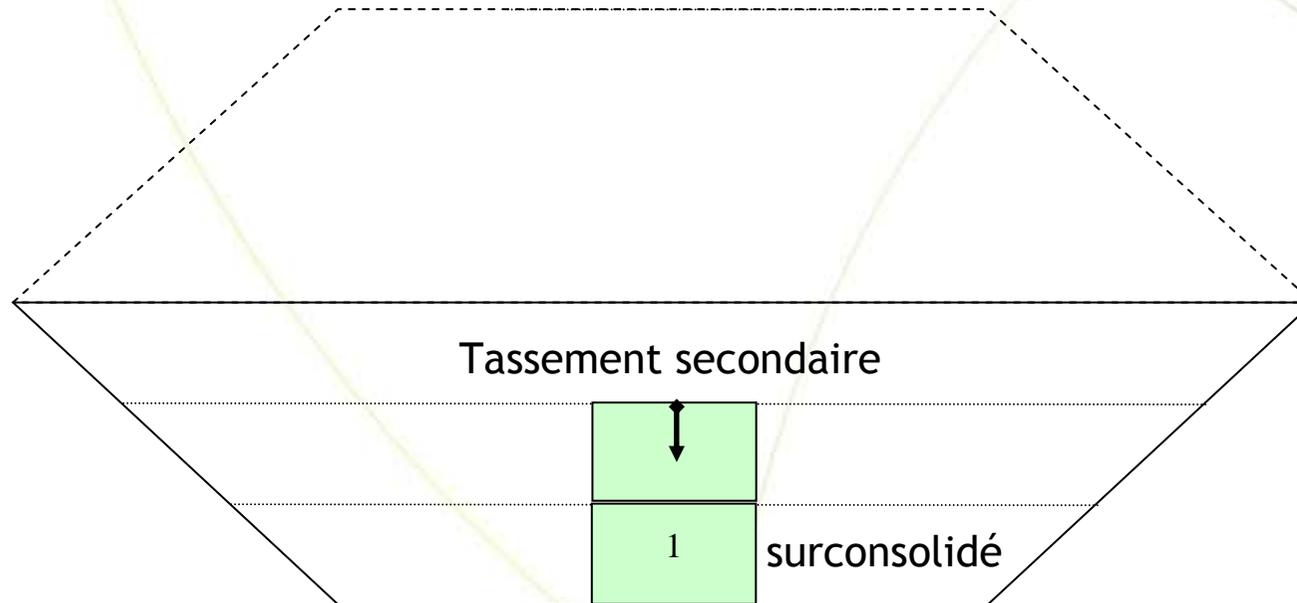
$$\frac{\Delta h_i^S}{h_0} = C_{\alpha\varepsilon}^* \cdot \log \frac{\tau}{\tau_i} = C_{\alpha\varepsilon}^* \cdot \log \frac{t - \sum_{j=1}^{i-1} \tau_j}{\tau_i}$$

où $C_{\alpha\varepsilon}^*$ est le coefficient de compression
secondaire intrinsèque

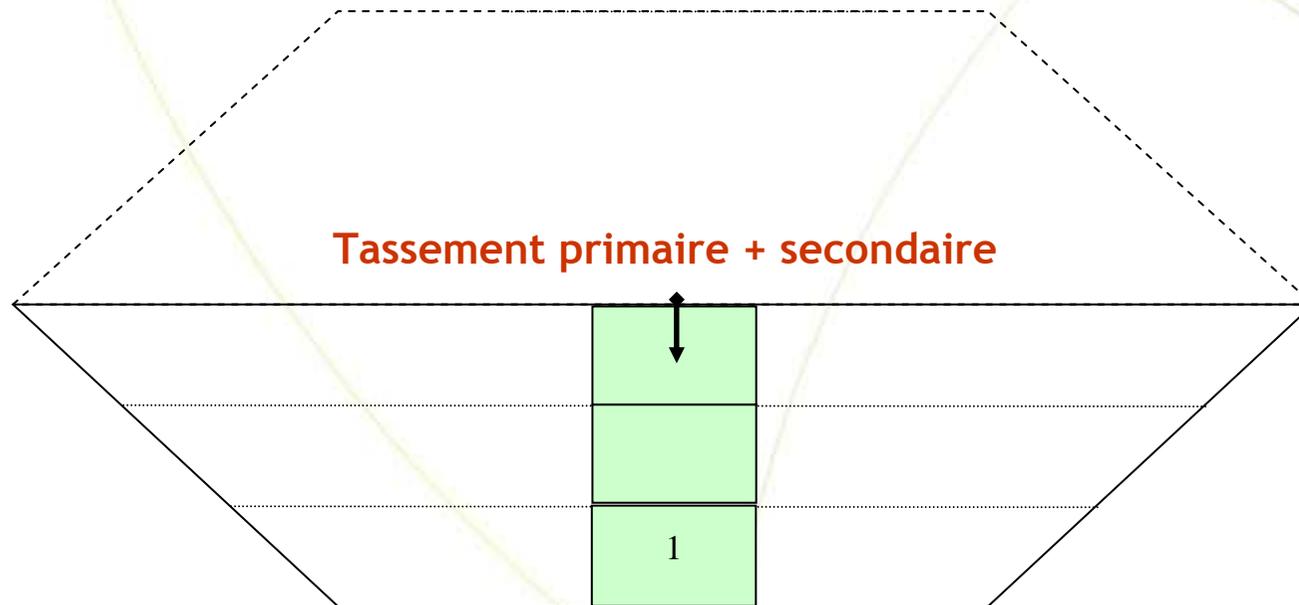
TASSEMENT DES DECHETS EN PHASE D'EXPLOITATION



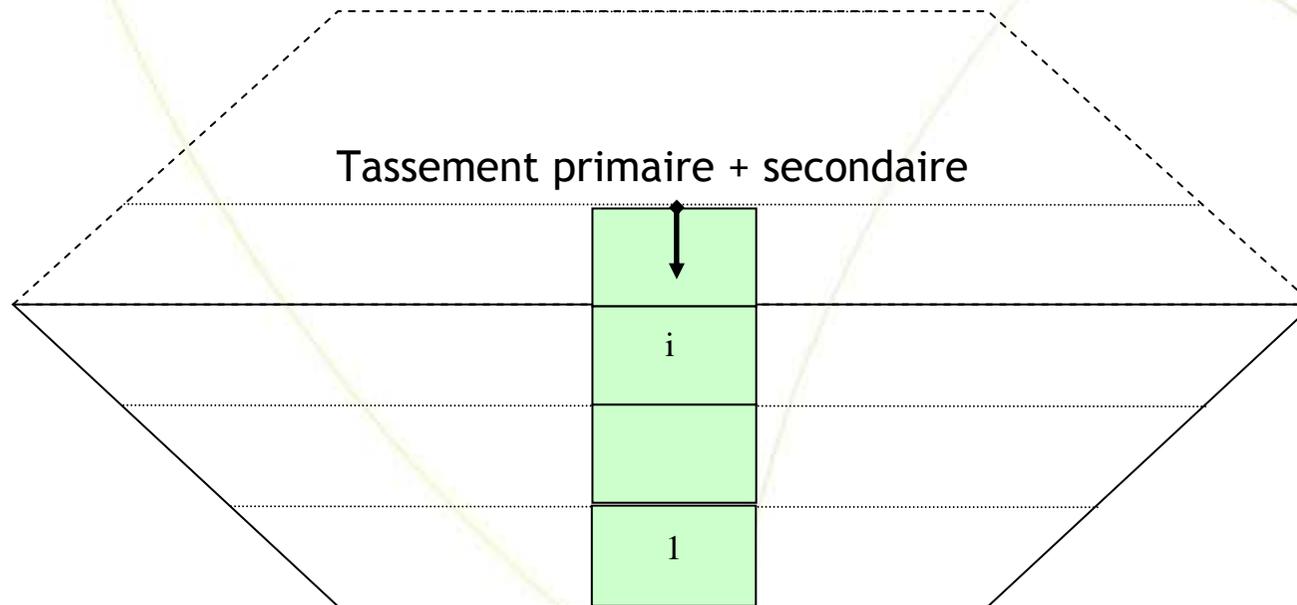
TASSEMENT DES DECHETS EN PHASE D'EXPLOITATION



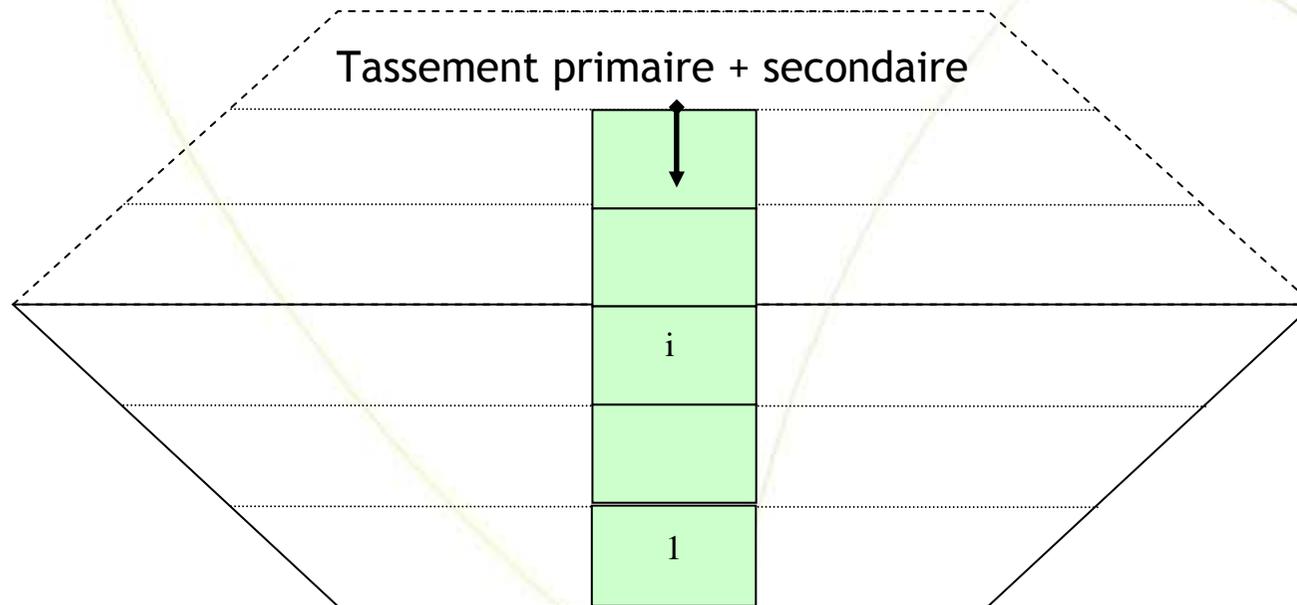
TASSEMENT DES DECHETS EN PHASE D'EXPLOITATION



TASSEMENT DES DECHETS EN PHASE D'EXPLOITATION

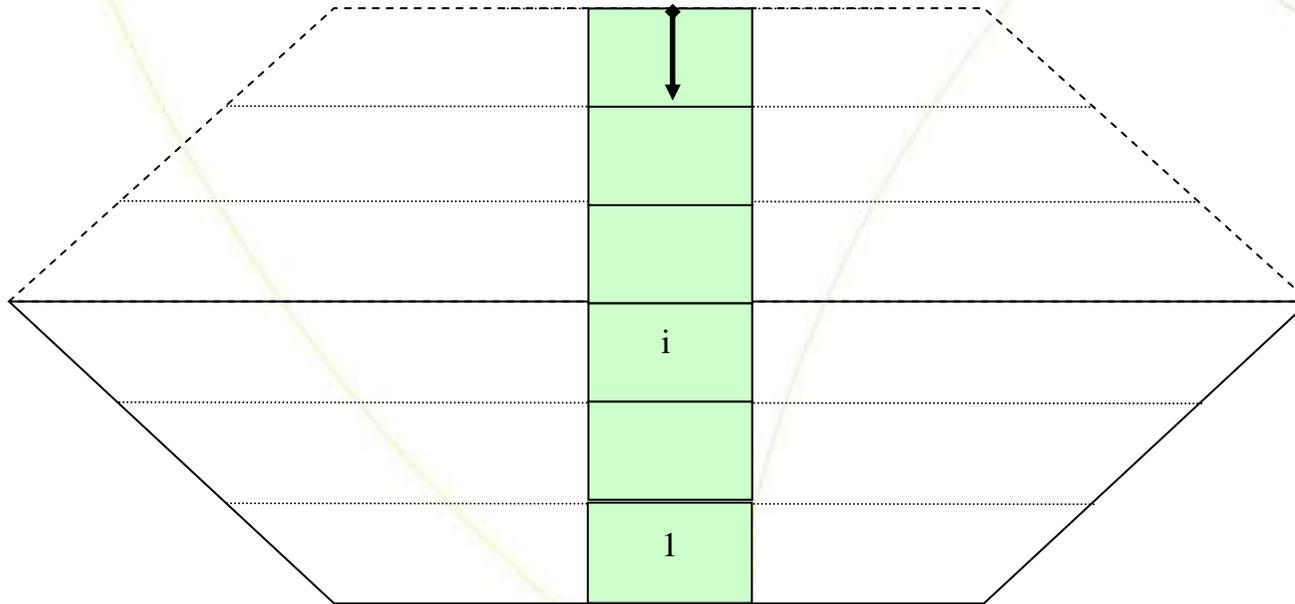


TASSEMENT DES DECHETS EN PHASE D'EXPLOITATION



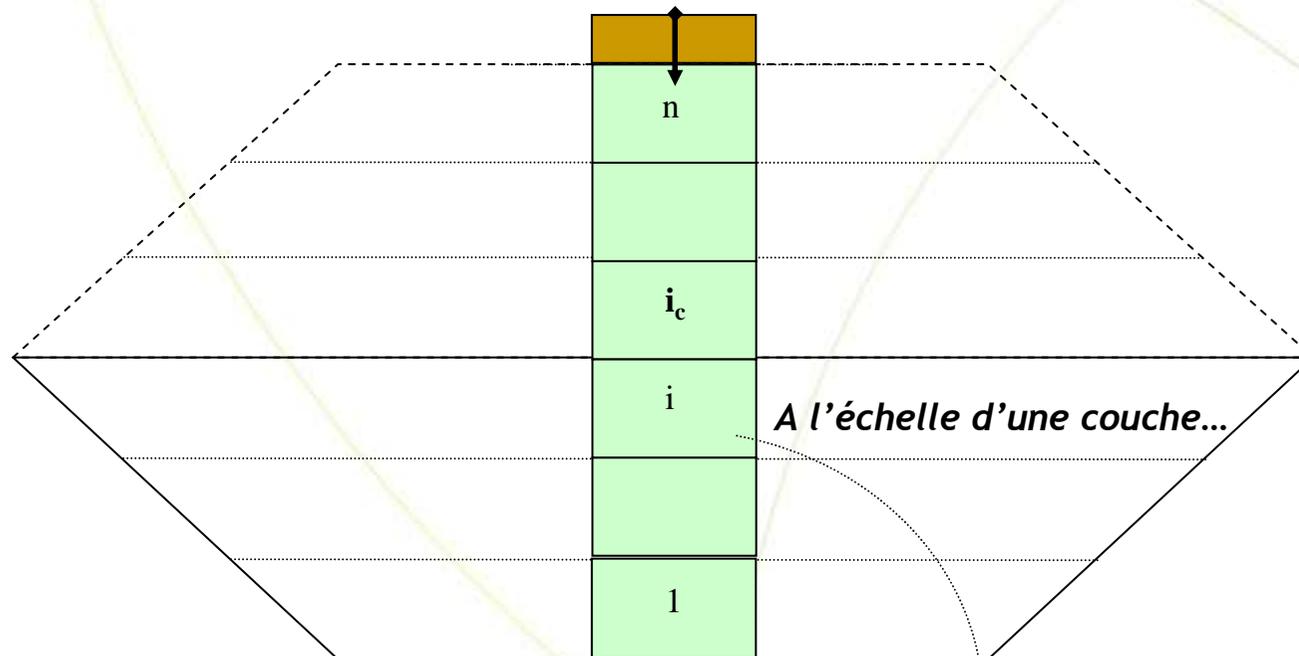
TASSEMENT DES DECHETS EN PHASE D'EXPLOITATION

Tassement primaire + secondaire



TASSEMENT DES DECHETS EN PHASE D'EXPLOITATION

Tassement primaire + secondaire



Amplitude du tassement primaire

0 % (couches sup. surconsolidées)
à 20 % (très fort chargement)

$$0,12 < C_R^* < 0,20$$

Amplitude du tassement secondaire

0 % (couche supérieure)
à 25 % (en cas de montée pluri-annuelle)

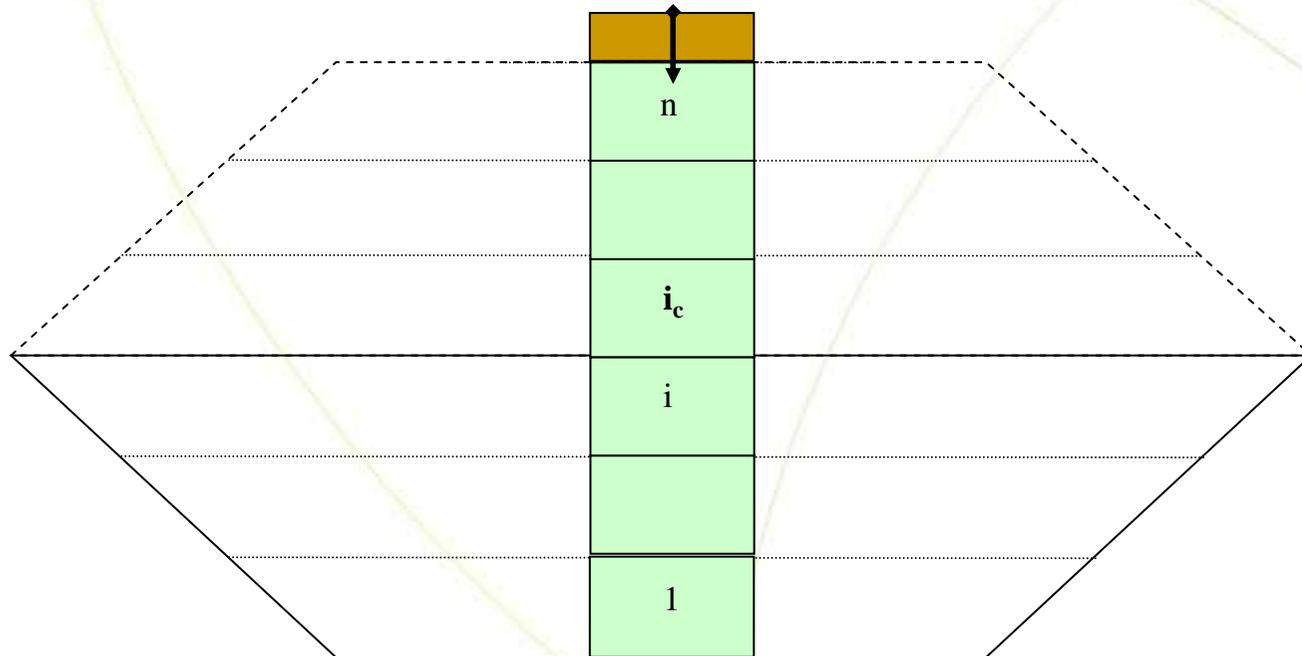
$$0,03 < C_{\alpha\epsilon}^* < 0,20$$

TASSEMENT DES DECHETS EN

PHASE DE POST-

EXPLOITATION

Tassement secondaire



TASSEMENTS DES DÉCHETS EN PHASE DE POST-EXPLOITATION

L'amplitude des tassements post-exploitation est importante :
10 à 25 % de la hauteur initiale des déchets



Sommet de casier en forme de cuvette résultant d'une mauvaise conception

**Les tassements sont longs à se stabiliser :
Généralement plus de 30 ans après la fin d'exploitation !**

CONSECUTIFS A Dépressions L'APPARITION DES

sur la
TASSEMENTS
Risque
couverture
d'infiltrations
sommitaire
d'eau à

Points bas le

long des tubes
de collecte des
Risque de blocage
du gaz par
biogaz
accumulation



Pour toutes ces raisons, un suivi des tassements est souhaitable !

CARTE DES SITES INSTRUMENTÉS EN FRANCE PAR LE LTHE AVEC LE SOUTIEN DE L'ADEME



Dispositifs de mesure :

- Bornes de surface
- Tassomètres
- Profilomètres
- Tiges télescopiques
- Plaques enterrées
- Extensomètres

**10 sites instrumentés en France,
parmi lesquels :**

2 bioréacteurs

DISPOSITIFS INTERNES :

MESURE TASSEMENT

PRIMAIRE + SECONDAIRE

Equipment

Tassomètre

Profilomètre

Plaque enterrée

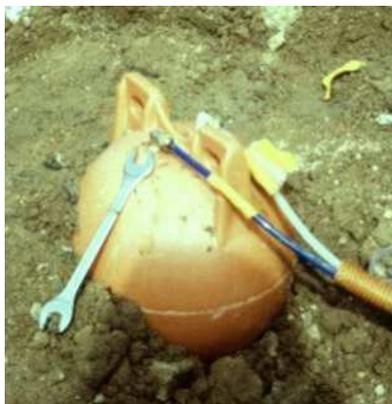
Extensomètre

Hydro-pneumatique
Corde vibrante

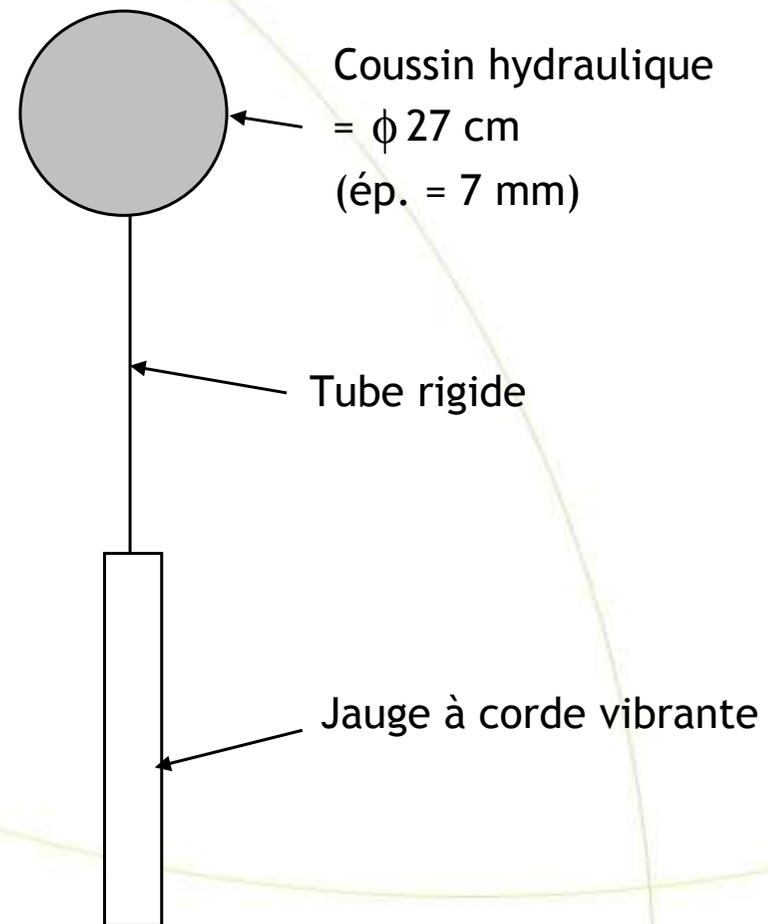
Hydraulique
Accélérométrique

Tige flottante
Tige télescopique

Magnétique
Mécanique

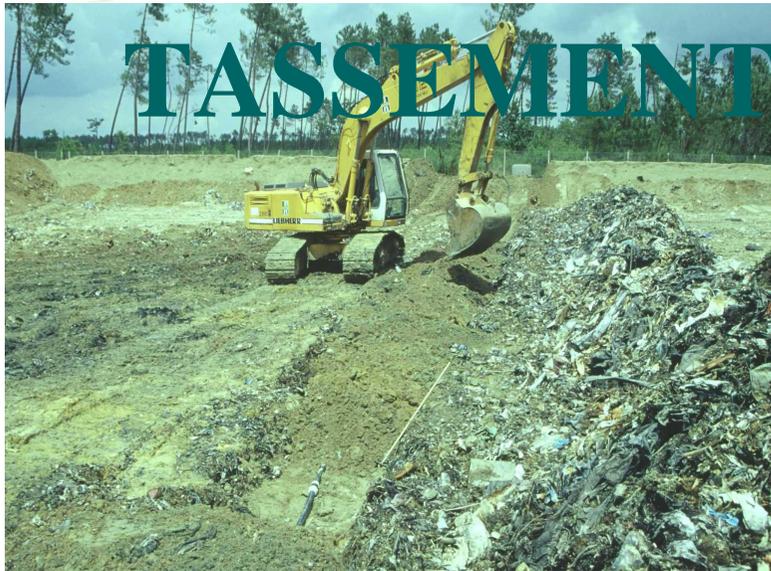


TASSOMETRES ASSOCIES A DES CELLULES DE CONTRAINTE



PROFILOMETRE DE SURFACE OU ENTERRE : PROFILS 2D DES

TASSEMENTS



Installation du
profilomètre et
mesure de référence

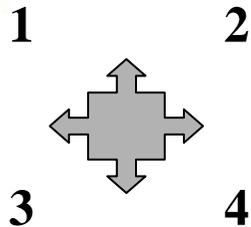


Illustration d'une
mesure courante



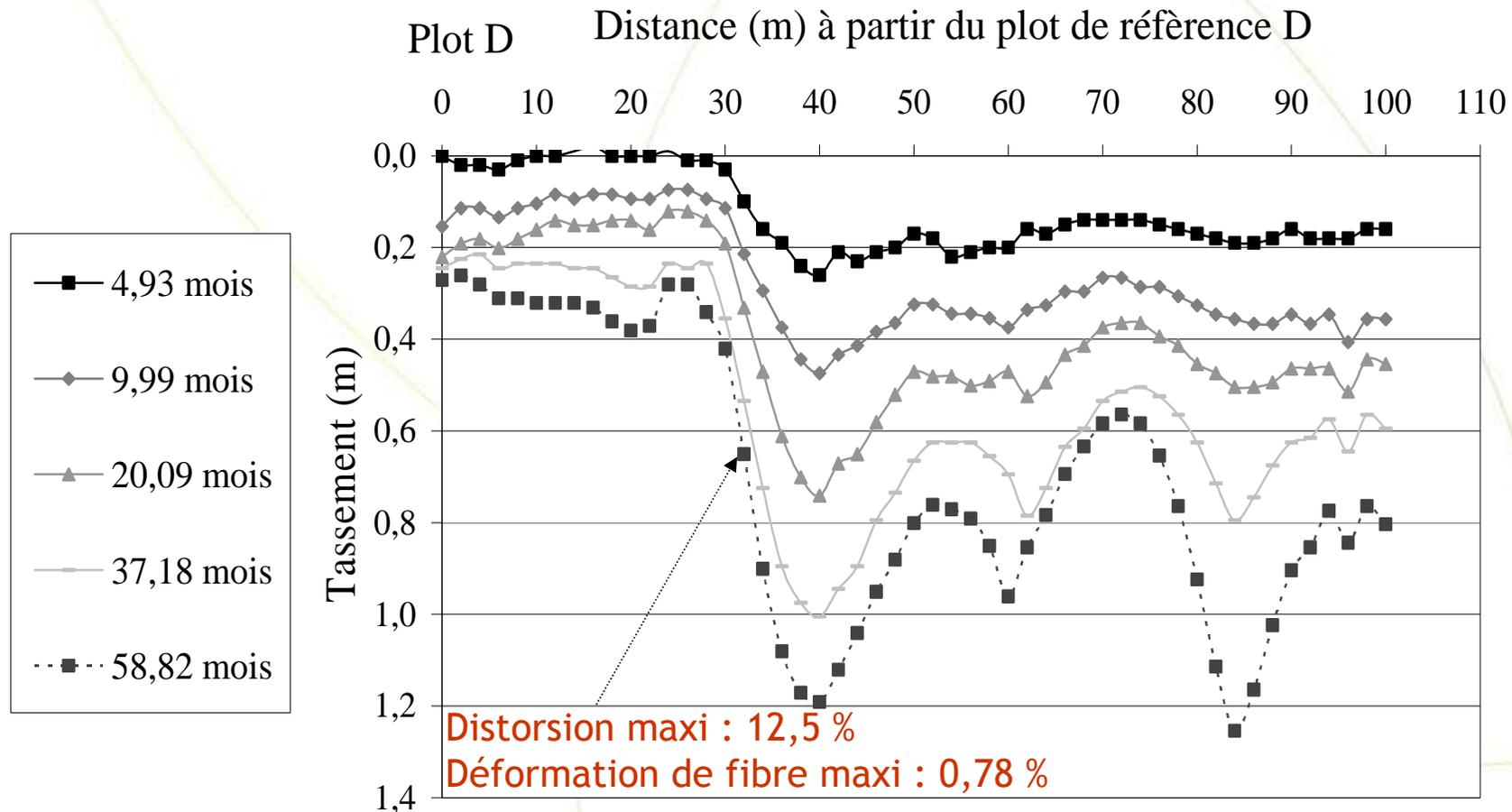
APPLICATION A L'INTERFACE ENTRE 2 CASIERS D'AGE DIFFERENT



Ancien casier

Nouveau casier

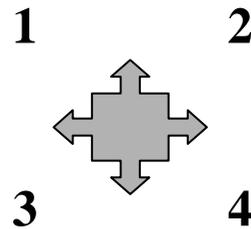
PROFIL DE TASSEMENT 1 OBTENU A PARTIR DE 2 PROFILOMETRES



PLAQUES ENTERREES ET TIGES FLOTTANTES



Installation d'une
plaque enterrée et
forage post-
exploitation

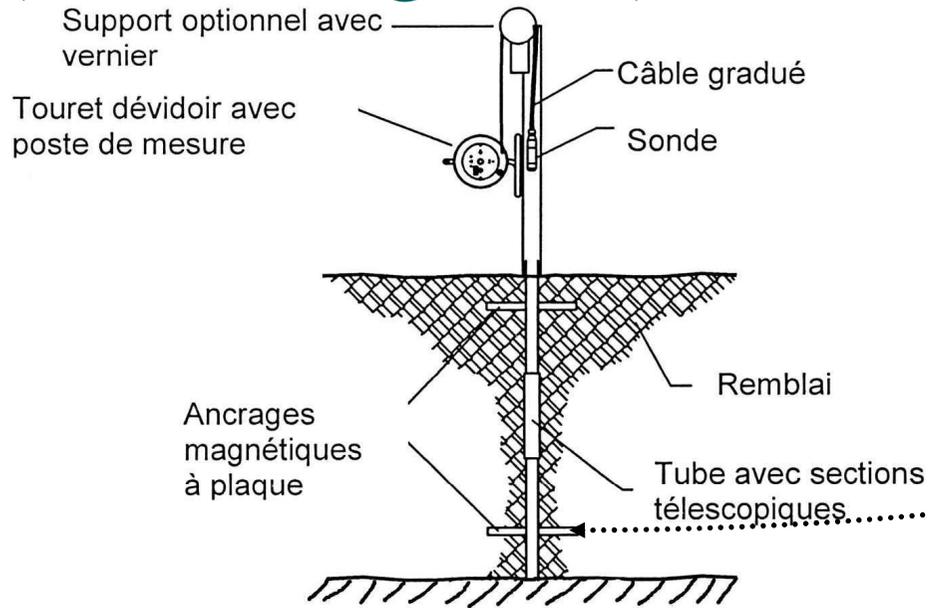


Groupe de 3 tiges
après exploitation
/ 1 an plus tard



EXTENSOMETRE MAGNETIQUE

(A PLAQUES)



MESURE DU TASSEMENT SECONDAIRE POST- EXPLOITATION



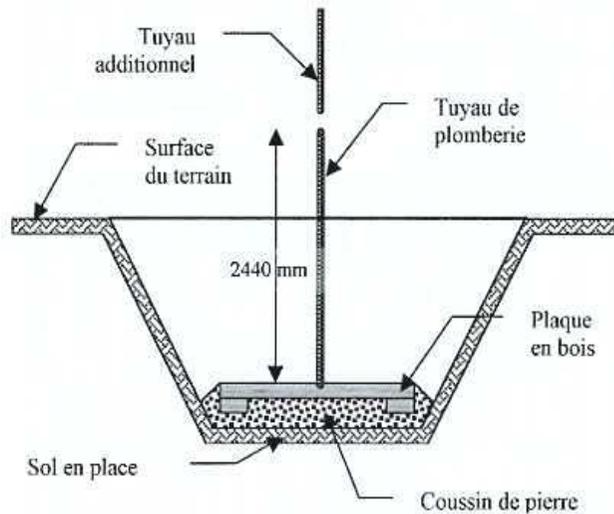
Piquet de bois



Borne à ergots



Repère cimenté



Plaque de surface



Profilomètre

TOPOGRAPHIQUE HAUTE RESOLUTION SANS BORNE DE TERRAIN

Photogrammétrie, GPS et depuis peu... scanner laser 3D



Technique puissante donnant accès à :

Cartographie digitale 3D

Analyses géométriques
(estimation fine du “vide de fouille” restant)

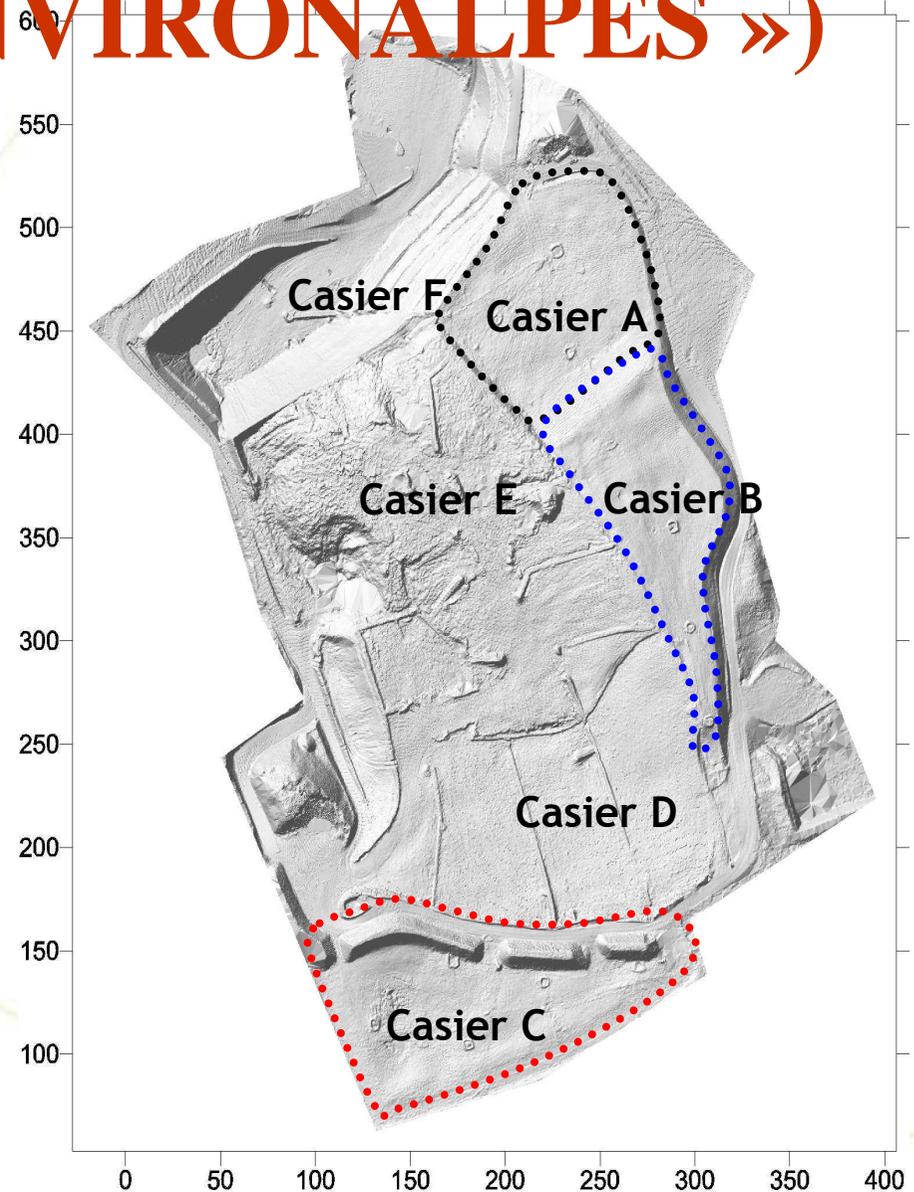
Imagerie de synthèse, animations vidéo

EXPERIMENTATION SUR LE SITE DE CHATUZANGE (SITE PILOTE DU

PROGRAMME « ENVIRONALPES »)

Caractéristiques principales

- Ouvert depuis fin 1992
- 6 casiers exploités à ce jour
- 200 000 tonnes de déchets / an
- Hauteur > 35 m



INSTRUMENT LASER 3D

Scanner Riegl LMS Z420i

- Distance : jusque 800 m
- Angle de vue : 360°
- Acquisition : 8 000 points / sec
- Résolution : jusque 4 mm

Scanner sur trépied



Nikon D100 (6 Méga-Pixels)



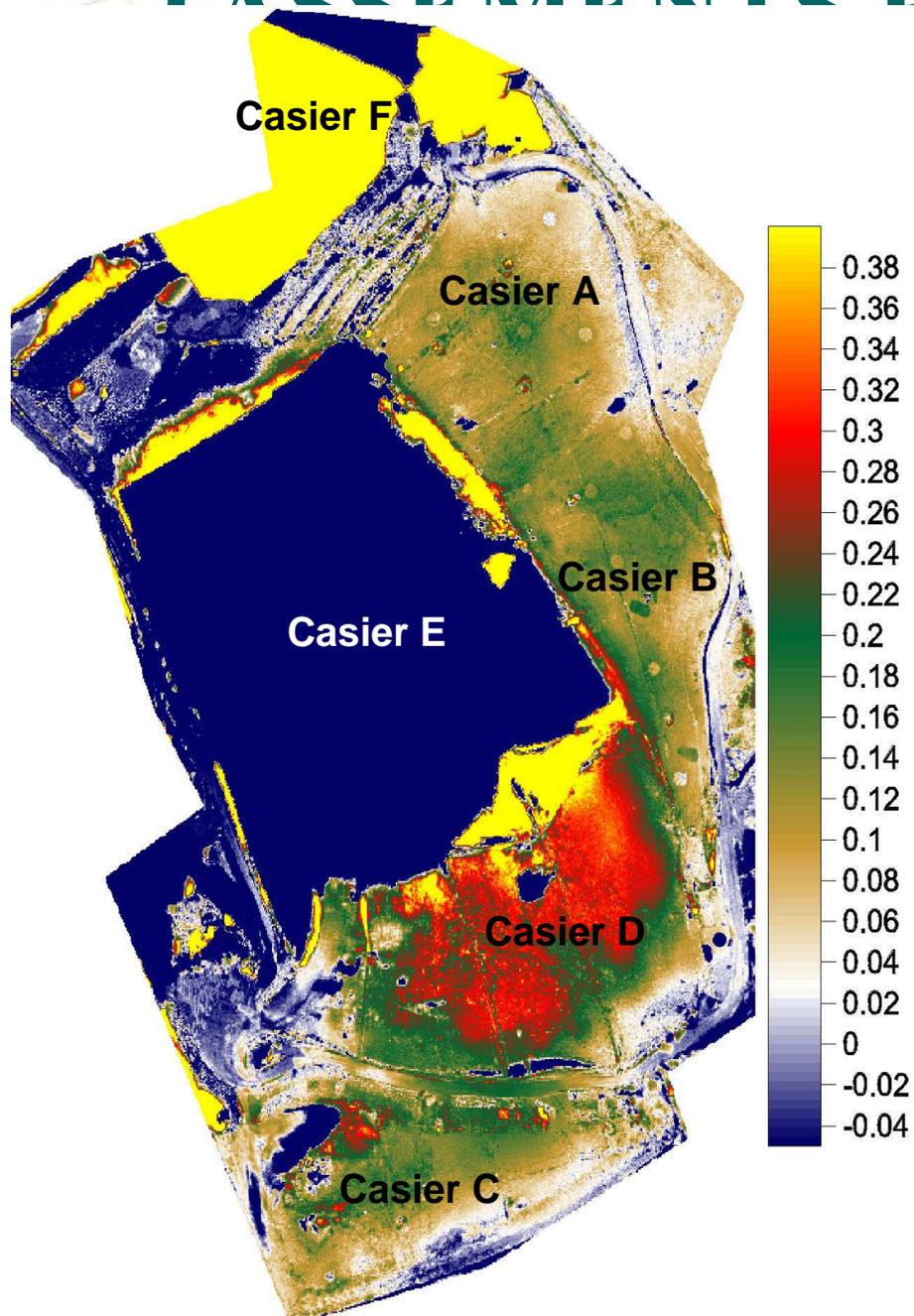
Portable (Riscan Pro™)



Scanner embarqué



CARTOGRAPHIE DES TASSEMENTS ENTRE 2



CARTOGRAPHIE DES

TASSEMENTS ENTRE

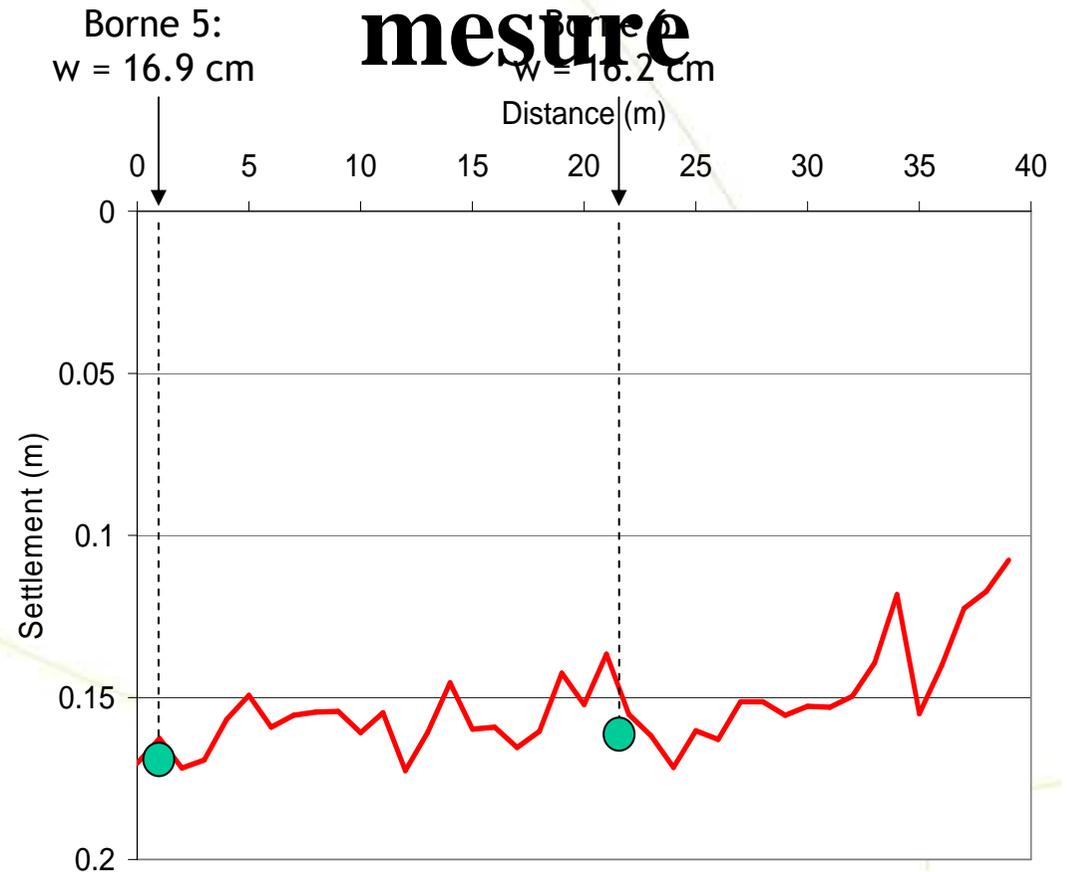
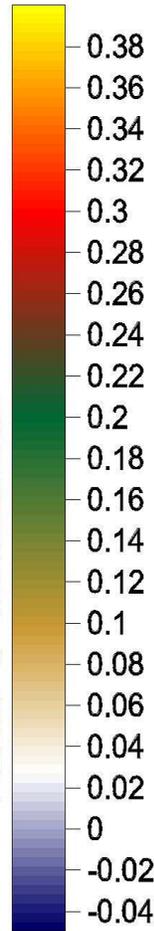
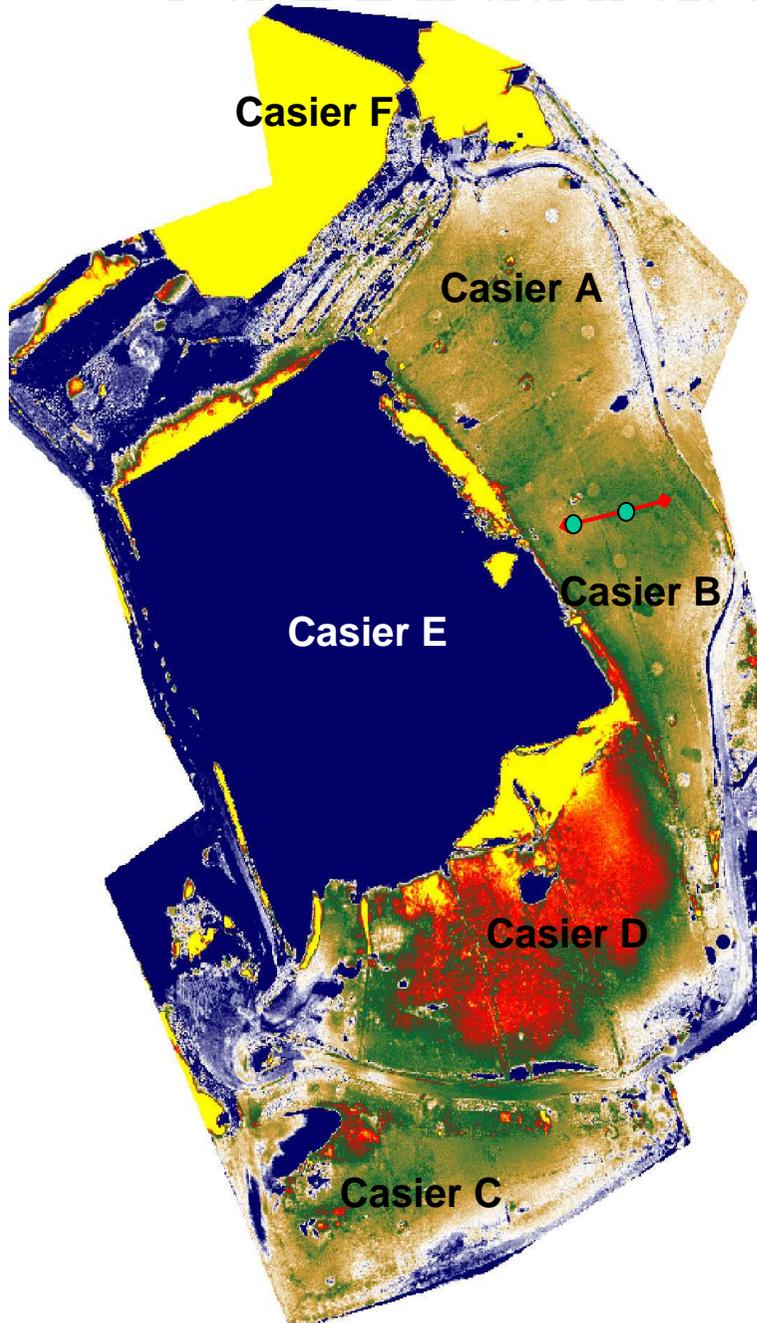
ENTRE 2

topographique le
long d'une coupe

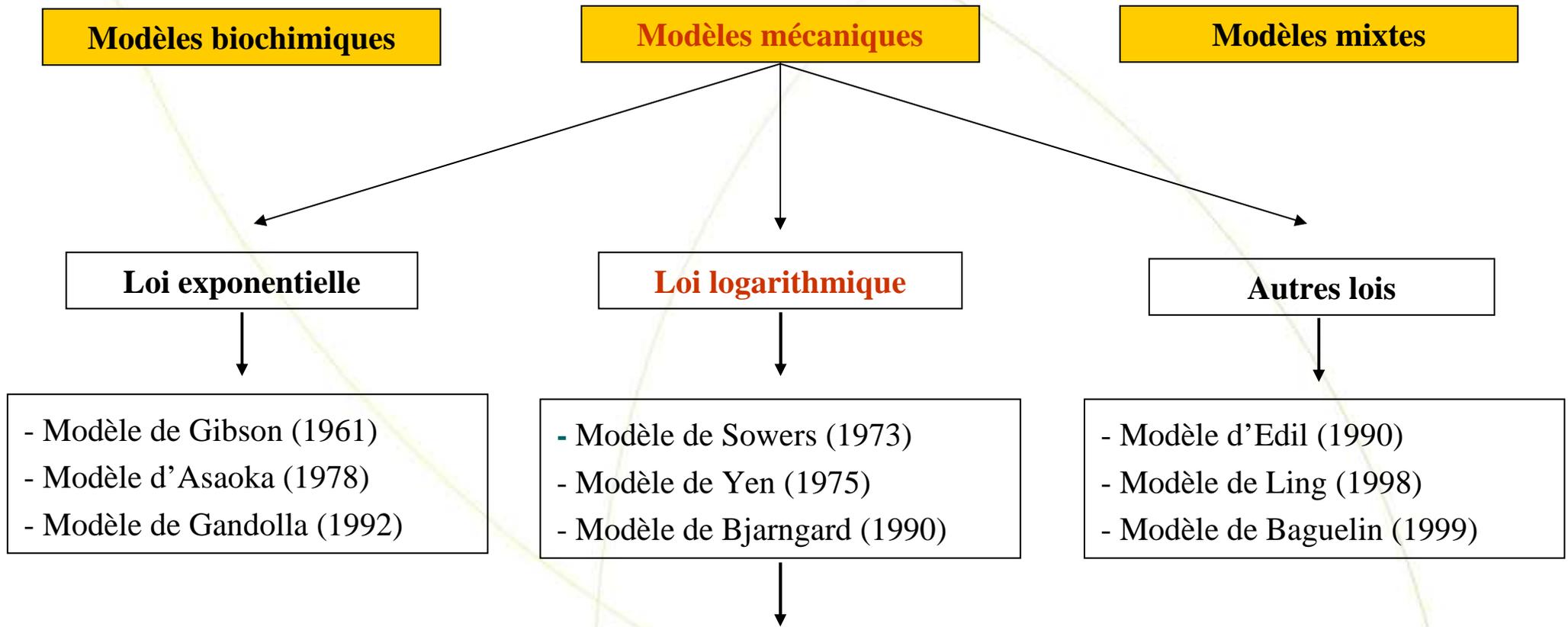
donnée entre 2

campagnes de

mesure



ETAPE FINALE : PREDICTION DES TASSEMENTS... TOUR D'HORIZON DES MODELES EXISTANTS



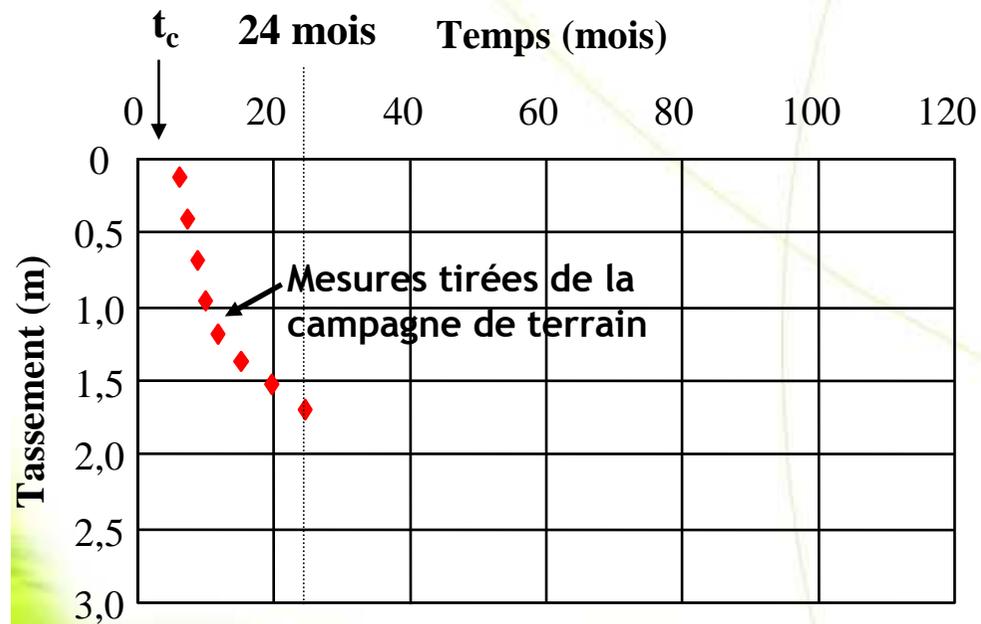
Tous ces modèles ont en commun d'être des modèles globaux : aucune prise en compte de l'historique de remplissage

Le modèle incrémental ISPM remédie à cela.

PREDICTION DES TASSEMENTS PAR ANALYSE INVERSE : ETAPE

N°1

Mesure de tassement

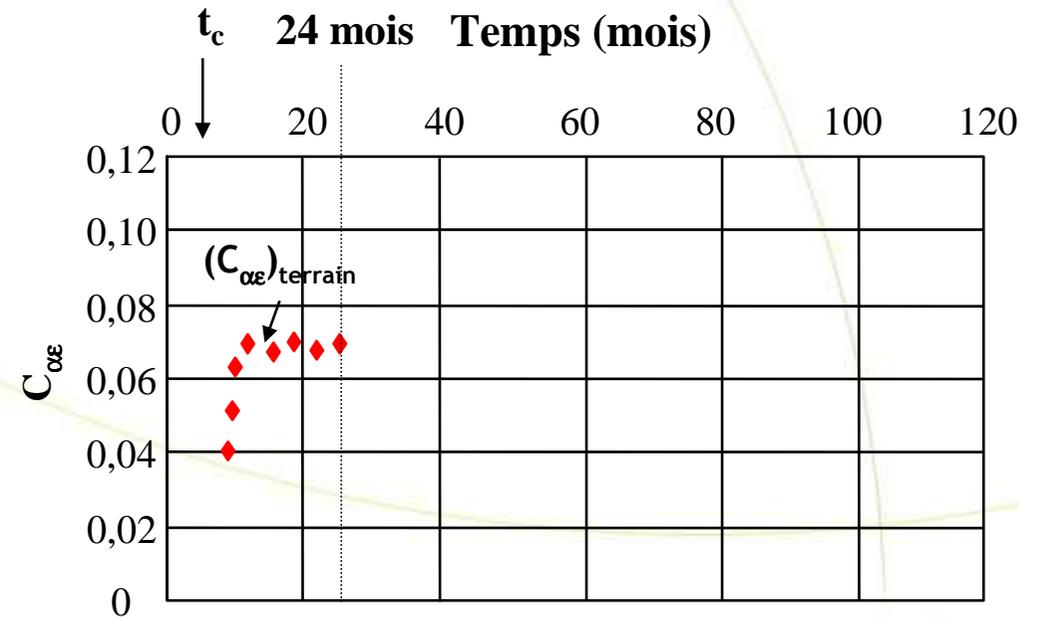
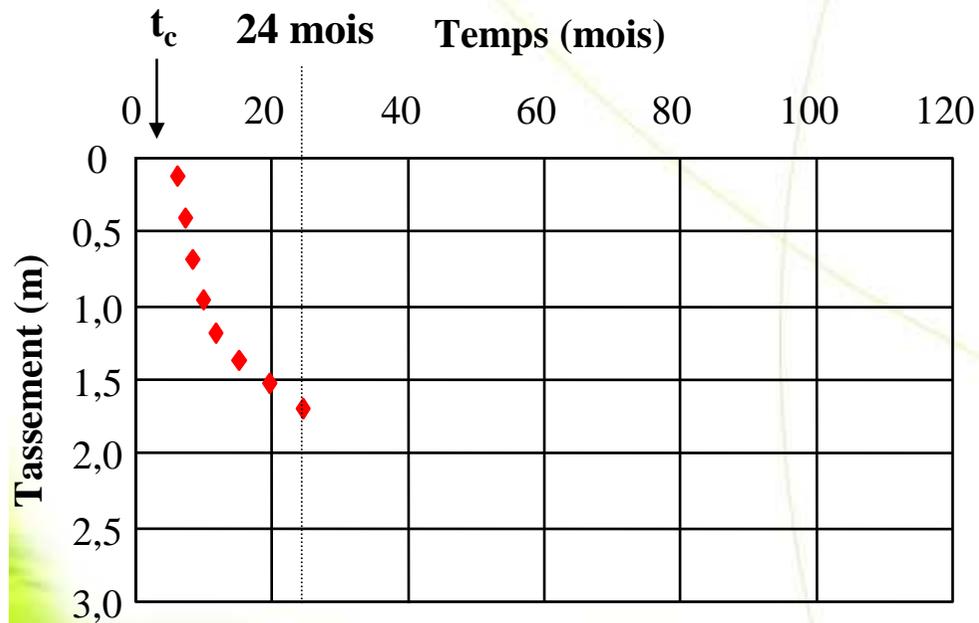


PREDICTION DES TASSEMENTS PAR ANALYSE INVERSE : ETAPE

N°2

Mesure de tassement

Valeur de $C_{\alpha\varepsilon}$

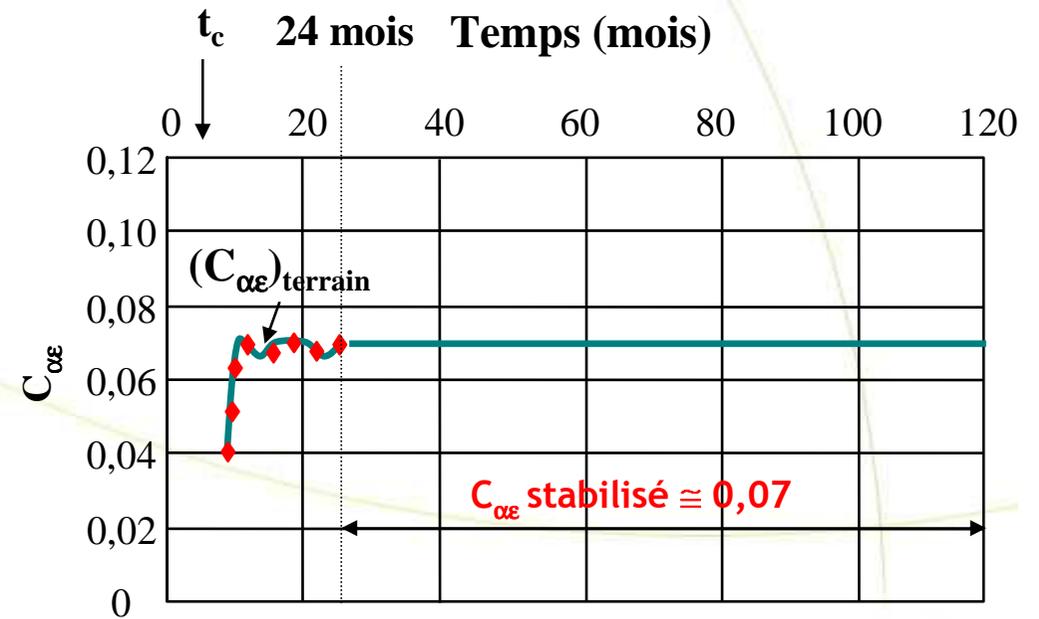
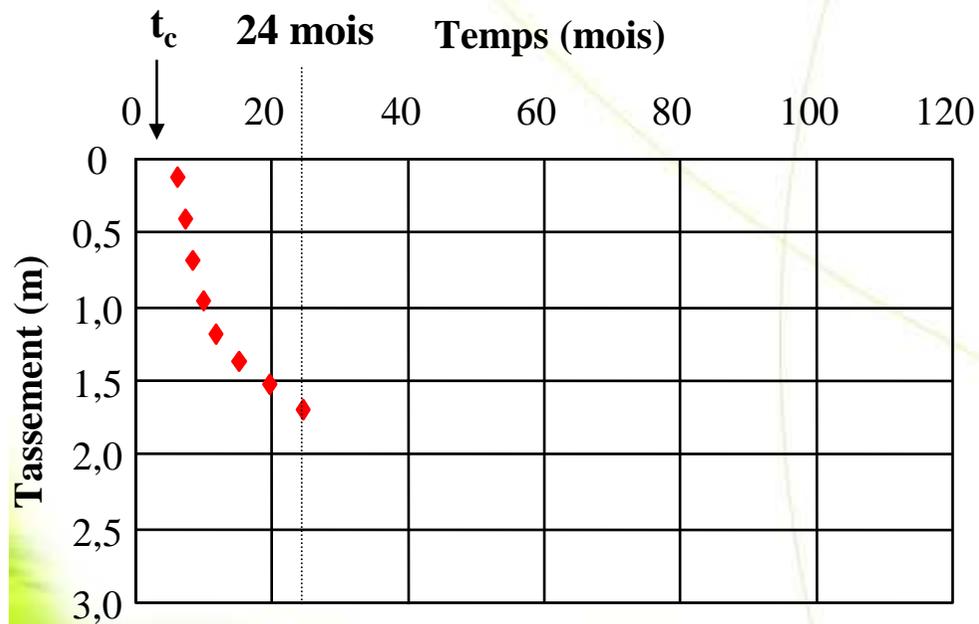


PREDICTION DES TASSEMENTS PAR ANALYSE INVERSE : ETAPE

N°2

Mesure de tassement

Valeur de $C_{\alpha\varepsilon}$



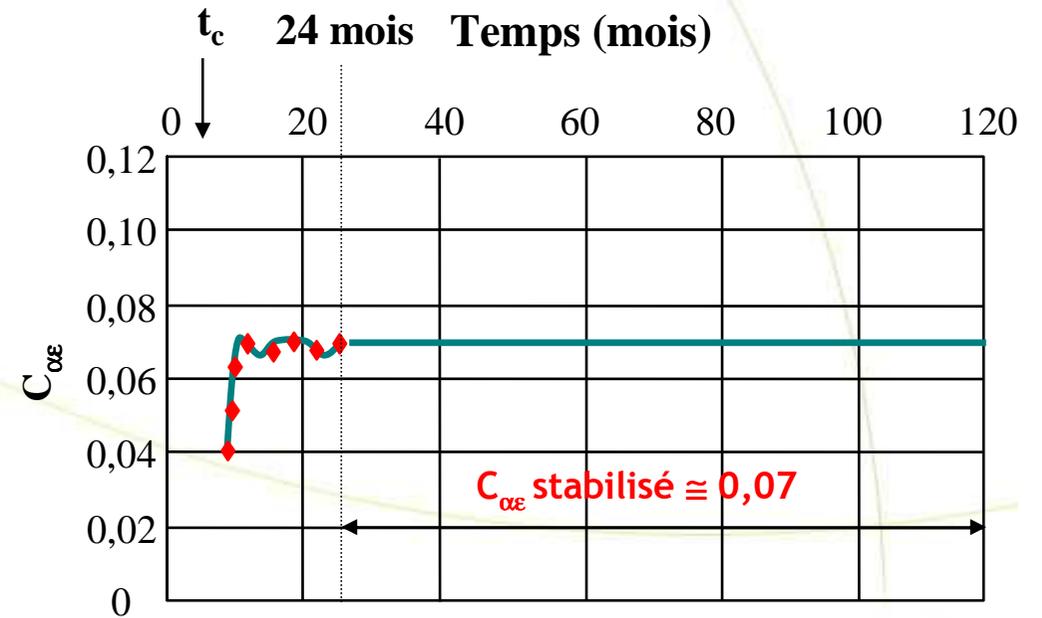
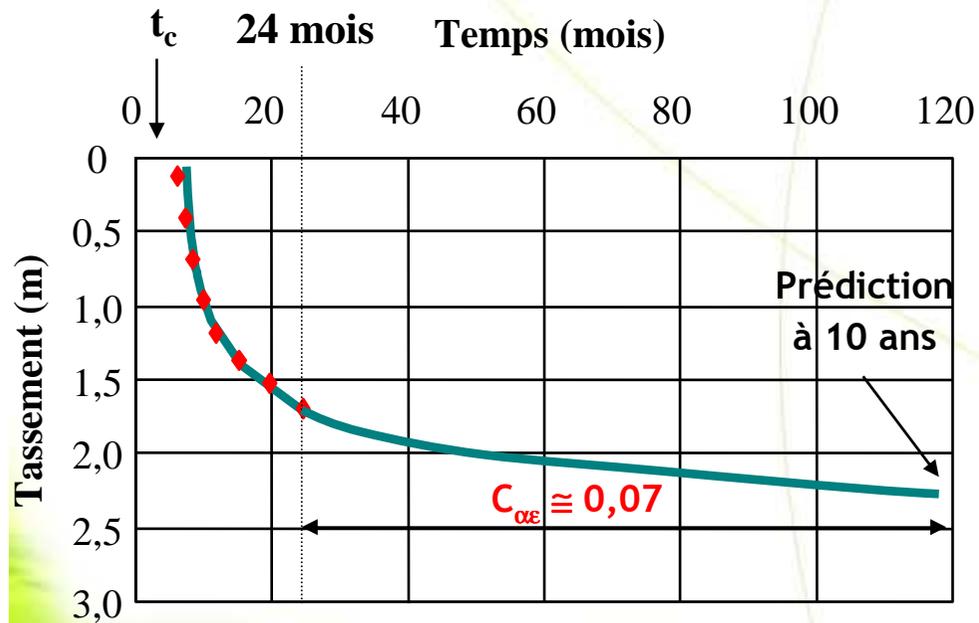
PREDICTION DES TASSEMENTS PAR ANALYSE INVERSE : ETAPE

N°4

Mesure de tassement

Prédiction de tassement

Valeur de $C_{\alpha\varepsilon}$



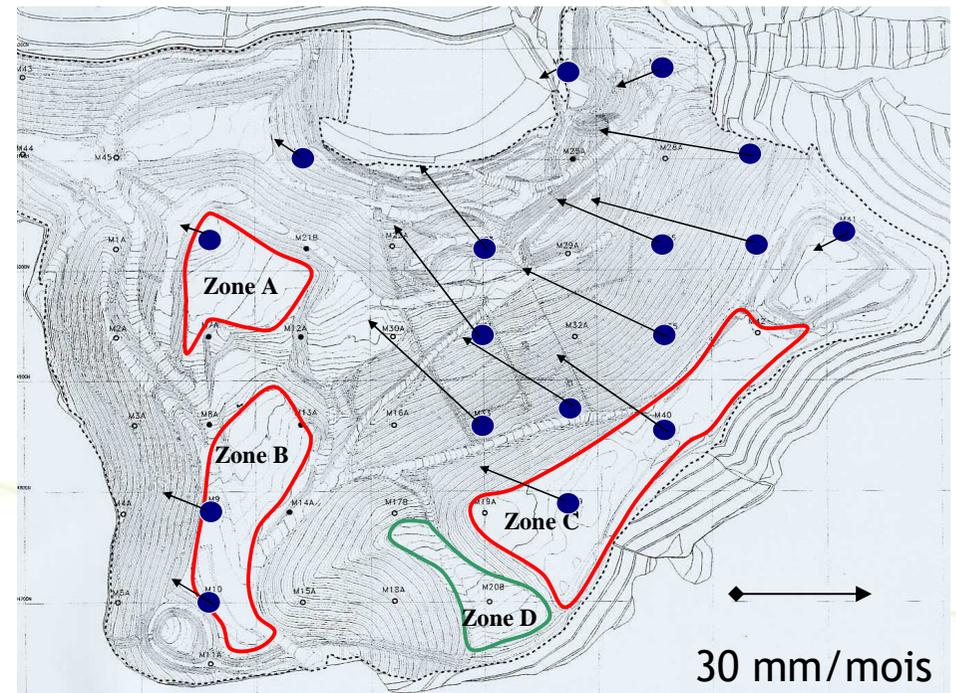
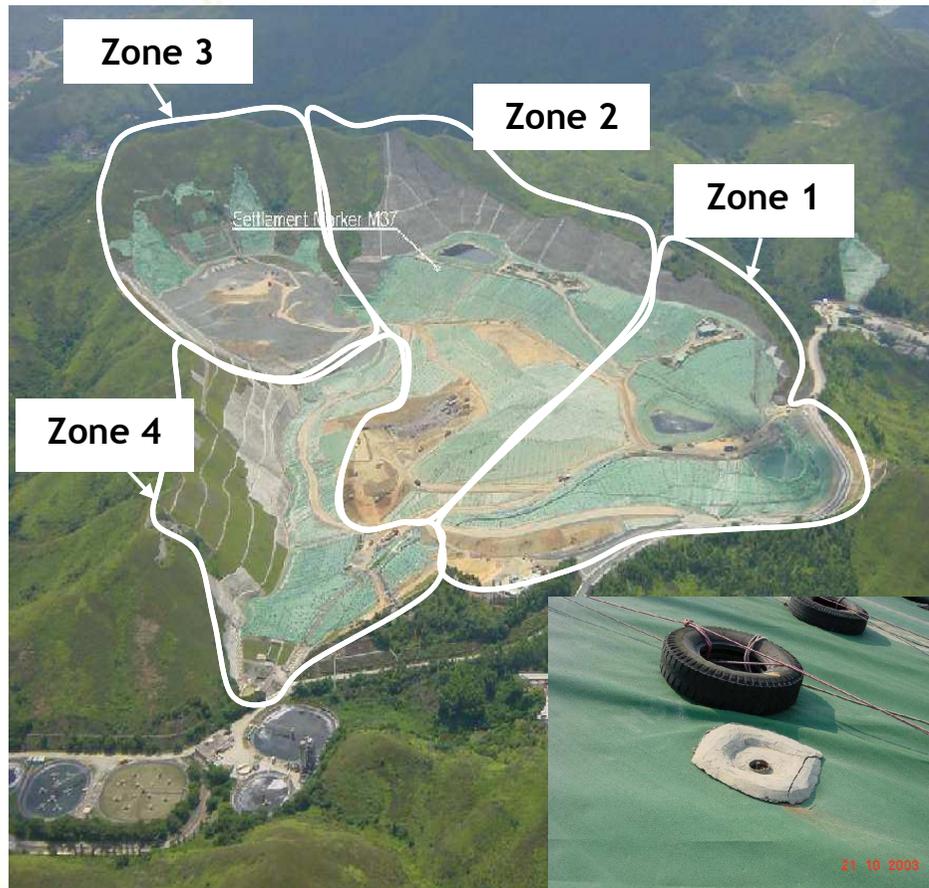
SITES A FLANC DE COLLINE : UN SUIVI DES DEPLACEMENTS 3D EST VIVEMENT CONSEILLE

Site de N.E.L.T. (Hong-Kong)

 50 repères topographiques suivis selon (x, y, z) ⇒ u, v, w

verticaux,
 suivi du déplacement horizontal des bornes (rapporté au déplacement)

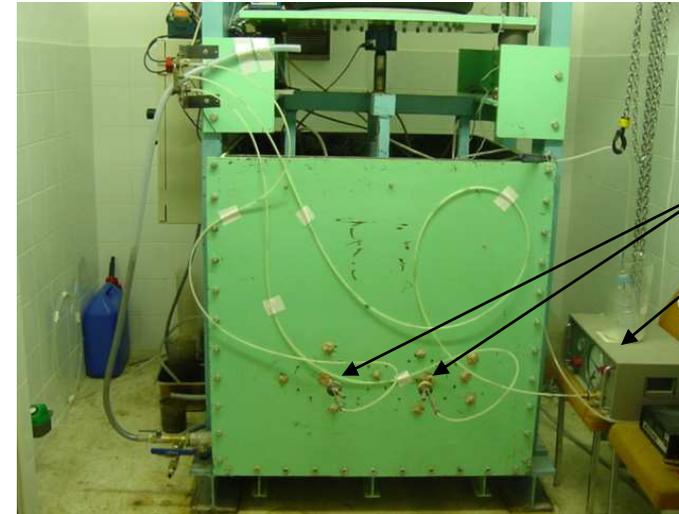
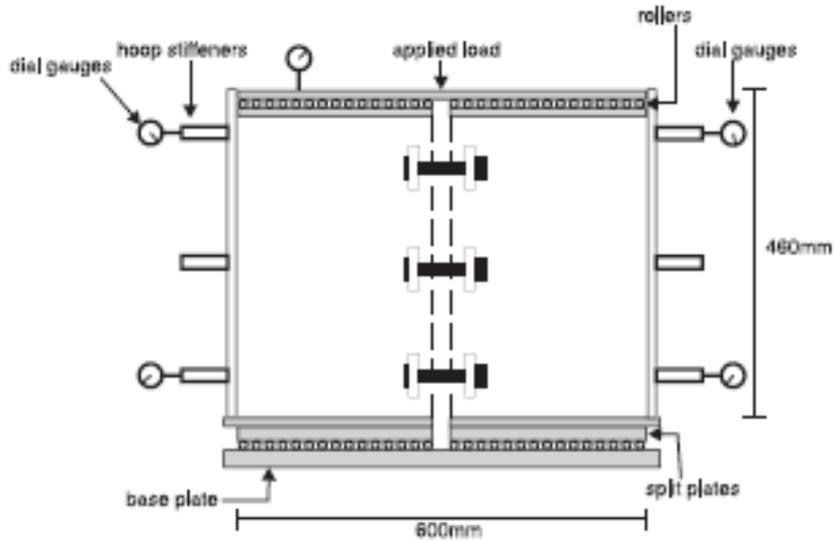
$$(\Delta u + \Delta v) / \Delta w = f(x, y, dz, t)$$

$$10\% \leq \|\Delta \vec{u} + \Delta \vec{v}\| / \Delta w \leq 60\%$$


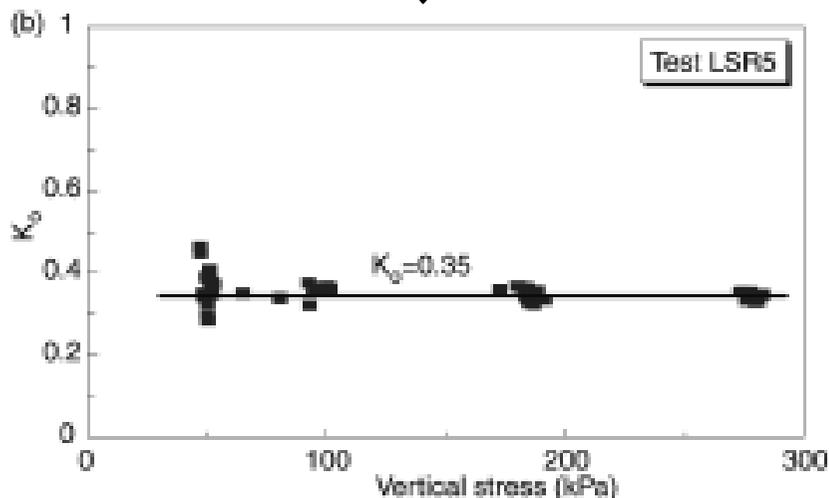
ESTIMATION DES CONTRAINTES LATERALES DANS LES DECHETS : ESSAIS EN LABORATOIRE

Boulons de force (Landva et al., 2000)

Jauges Glötzl (LTHE Grenoble)



Jauges
Manomètre



Auteur	Appareillage	K_0
Jones et al. (1997)	Essais triaxiaux	0,20 - 0,30
Landva et al. (2000)	Cuve cylindrique à boulons de force	0,23 - 0,40
Olivier et Gourc (2003)	Jauges Glötzl	0,18 - 0,36

SOMMAIRE

1. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES DECHETS

1.1. Comportement en conditions normales

- Compression initiale sous l'effet du compactage
- Tassement primaire sous l'effet du chargement
- Tassement secondaire sous l'effet du temps
- Fluage latéral aux abords des talus de déchets

1.2. Comportement en conditions limites

- Analyse à la rupture au travers de la cohésion et de l'angle de frottement interne

2. CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DES DECHETS

2.1. Propriétés hydro-statiques

- Teneur en eau, capacité au champ

2.2. Propriétés hydro-dynamiques

- Porosité utile
- Conductivité hydraulique

2.3. Exemple d'application : optimisation de la vidange de casiers saturés en lixiviat

CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES A LA RUPTURE : MAXI-TRIAxIAL

$\Phi = 45 \text{ cm} - H = 80 \text{ cm}$

Zwanenburg et al. (Geodelft, 2007)



CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES A LA RUPTURE : MAXI-BOITE DE CISAILLEMENT

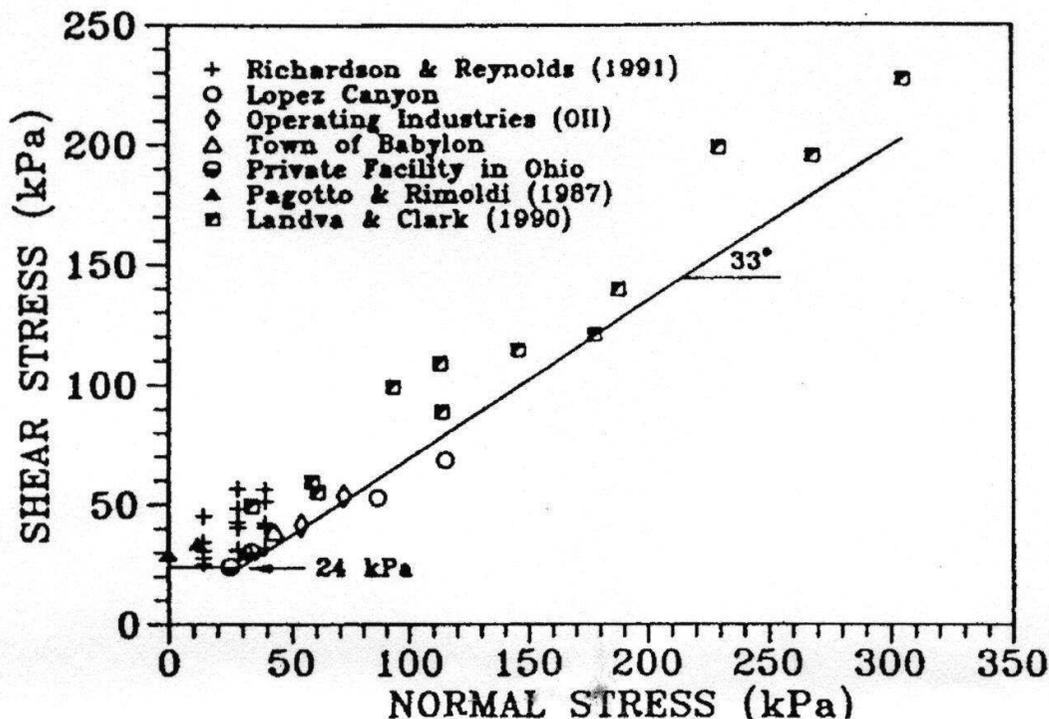
LTHE, Grenoble

Section carrée 100 * 100 cm

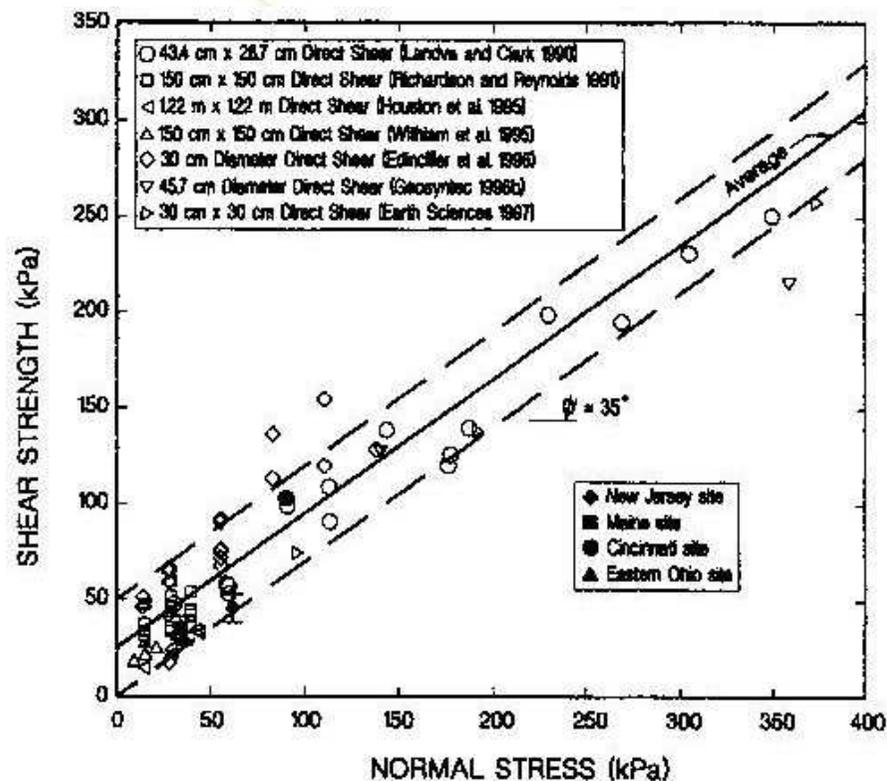


CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES A LA RUPTURE : A QUELLES VALEURS SE FIER ?

Kavazanjian (2001) : rétro-analyses de ruptures ; Li et al. (2005) : essais de cisaillement



$c' = 24 \text{ kPa}$
 $\Phi' = 33^\circ$



$20 < c' < 50 \text{ kPa}$
 $\Phi' = 35^\circ$

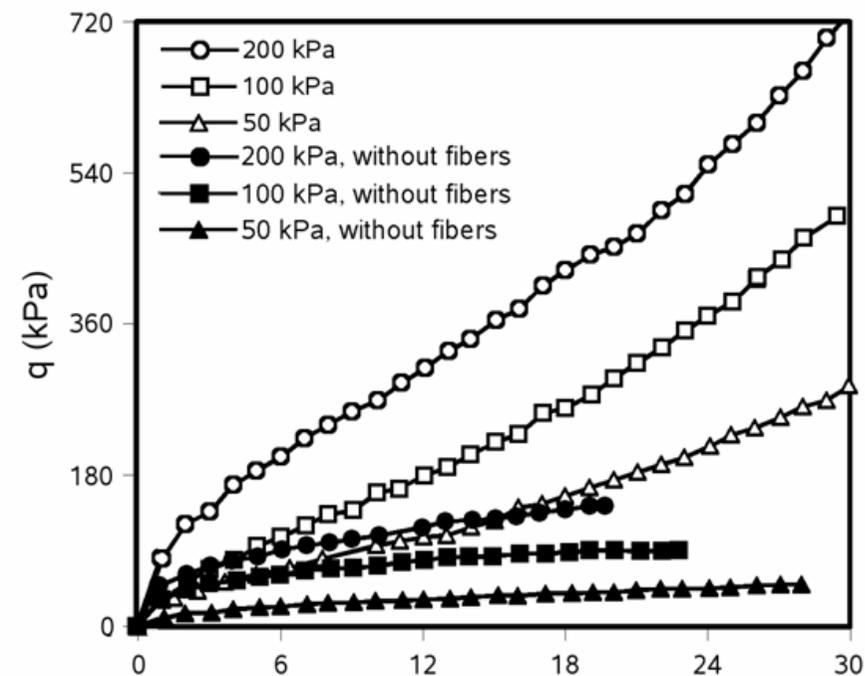
ILLUSTRATIONS SUR LE TERRAIN...

Isenberg (2003)



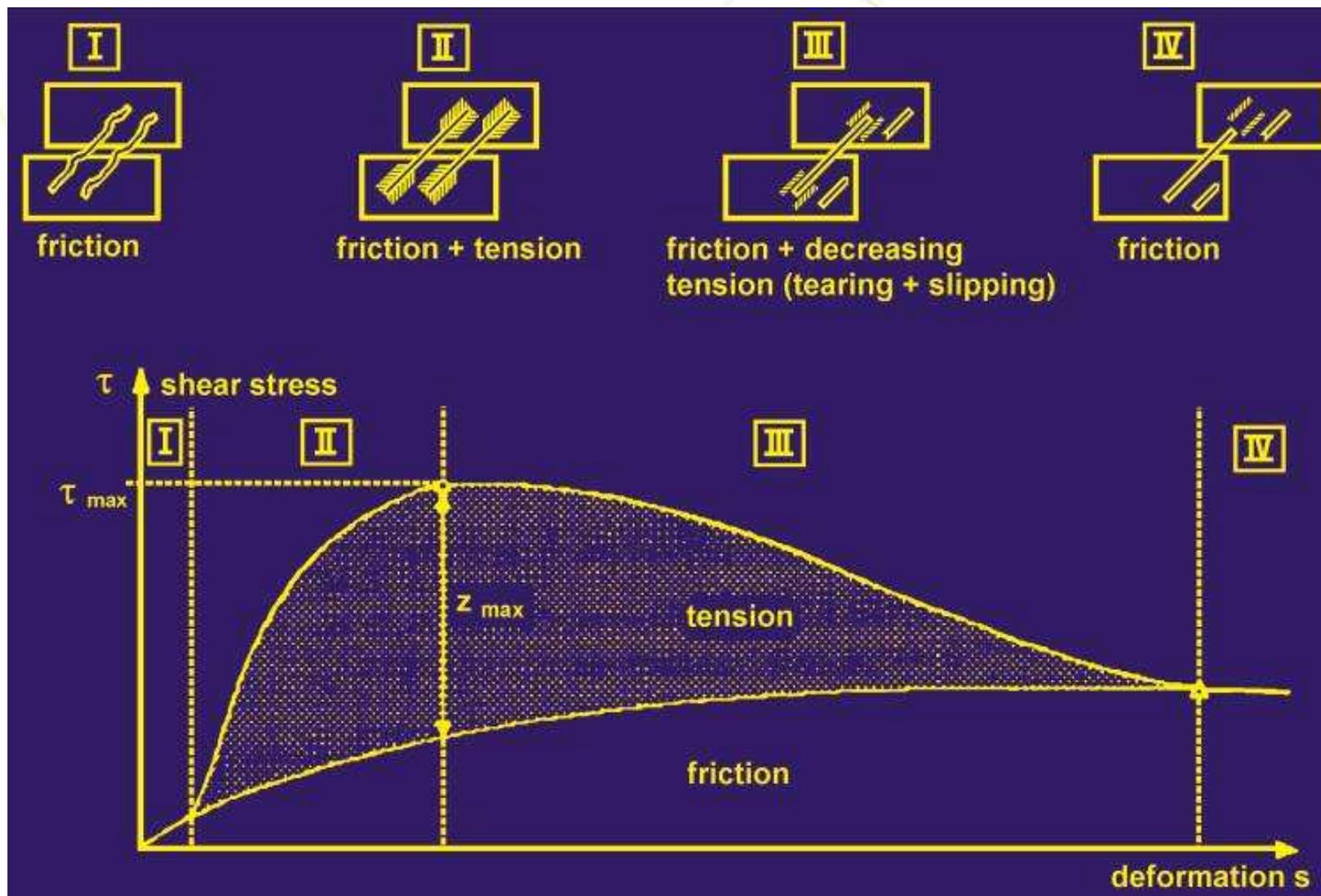
INFLUENCE DE LA TENSION DE FIBRES DANS LA RESISTANCE A LA RUPTURE

Machado (2007)



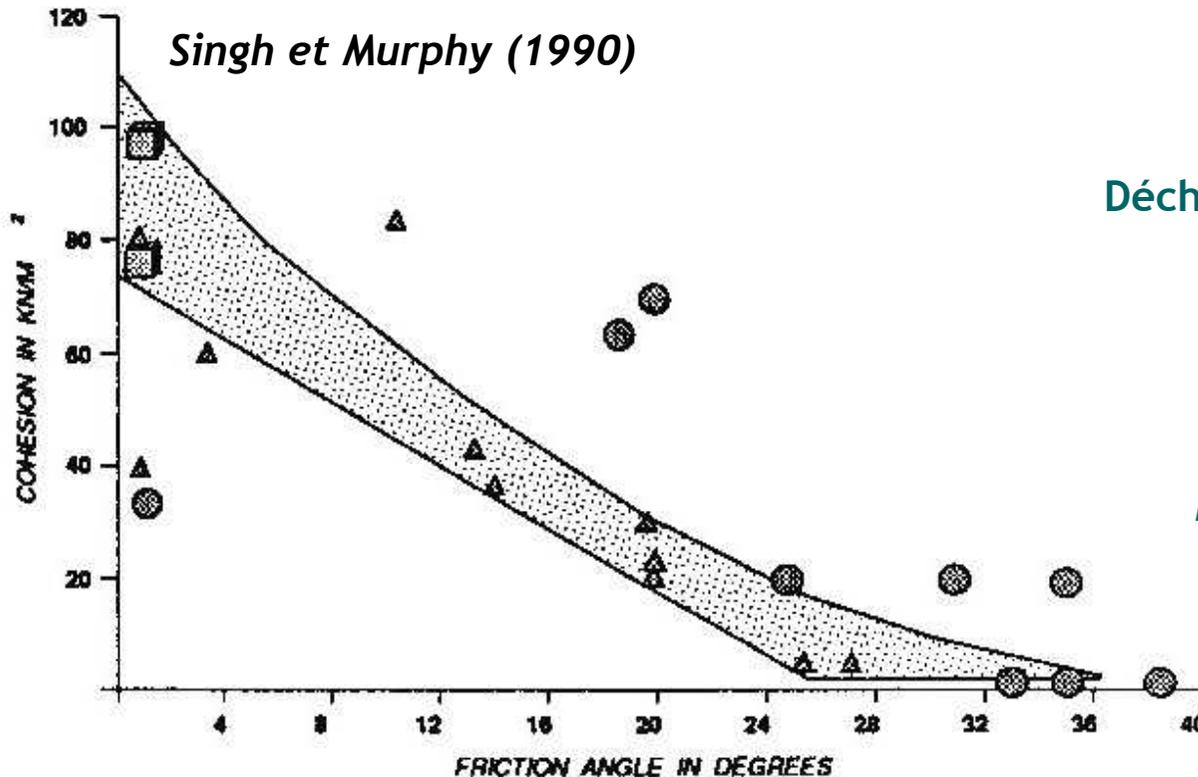
INFLUENCE DE LA TENSION DE FIBRES DANS LA RESISTANCE A LA RUPTURE

Kolsch (1996)



CARACTÉRISTIQUES GEOTECHNIQUES A LA RUPTURE : A QUELLES VALEURS SE FIER ?

Angle de frottement interne plus faible



↓

Déchet dépourvu de fibres de renforcement ?

Déchet sous compacté ?

Déchet dégradé, hétérogène ?

Mode d'évaluation : prise en compte
des pressions interstitielles ?
Mesure en contraintes totales ?

↓

**Valeurs couramment retenues
par les bureaux d'études :**

$$10 < c' < 20 \text{ kPa}$$

$$20^\circ < \Phi' < 25^\circ$$

SOMMAIRE

1. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES DECHETS

1.1. Comportement en conditions normales

- Compression initiale sous l'effet du compactage
- Tassement primaire sous l'effet du chargement
- Tassement secondaire sous l'effet du temps
- Fluage latéral aux abords des talus de déchets

1.2. Comportement en conditions limites

- Analyse à la rupture au travers de la cohésion et de l'angle de frottement interne

2. CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DES DECHETS

2.1. Propriétés hydro-statiques

- Teneur en eau, capacité au champ

2.2. Propriétés hydro-dynamiques

- Porosité utile
- Conductivité hydraulique

2.3. Exemple d'application : optimisation de la vidange de casiers saturés en lixiviat

PROBLEMATIQUE ET ENJEUX DES CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DES DECHETS

- Problématique

Problématique là encore très complexe :

- Déchet → Propriétés hydrodynamiques évoluant très sensiblement en fonction du niveau de chargement et du temps.
- Etat hydrique → Si apports trop importants, grandes quantités de lixiviat à traiter. Si au contraire recharge d'eau faible, déchet sec incompatible avec l'objectif de stabilisation à l'échelle d'une génération.

- Enjeux associés

Enjeu économique



Limitation des volumes
de lixiviat à traiter

Enjeu environnemental



Drainage des lixiviats / biogaz
Minimisation des rejets non contrôlés

APPAREILLAGES DE MESURE EN LABORATOIRE (LTHE - GRENOBLE)

**Cellule Alpha
(9l)**



Aeschlimann (2005)

**Oedo-perméamètre
(15l)**



Stoltz (2007)

**Transmissivimètre
(100l)**



Mugnier (2006)

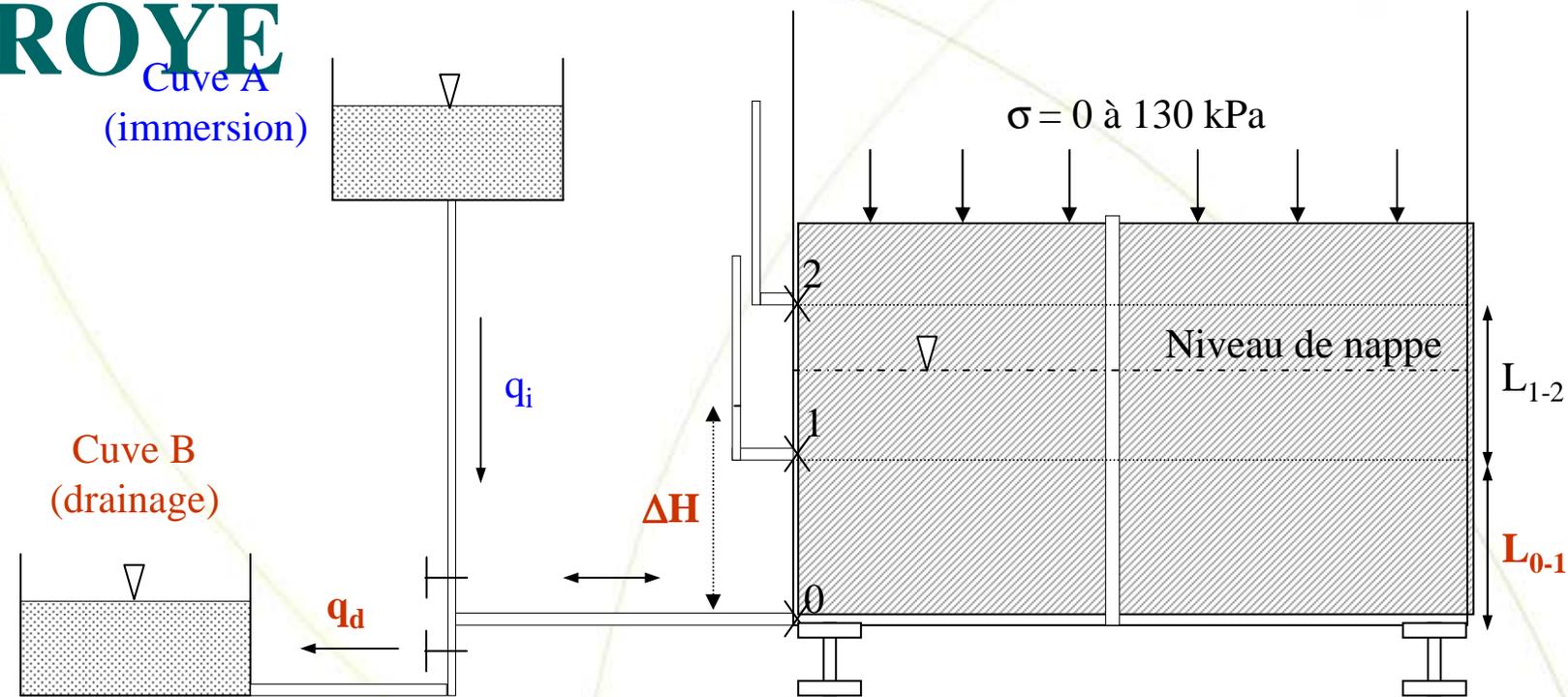
**Cellule C4DC
(1000l)**



Olivier (2003)

CELLULE C4DC : CYCLES REPETES DE SATURATION – VIDANGE SUR DECHE BROYE

BROYE



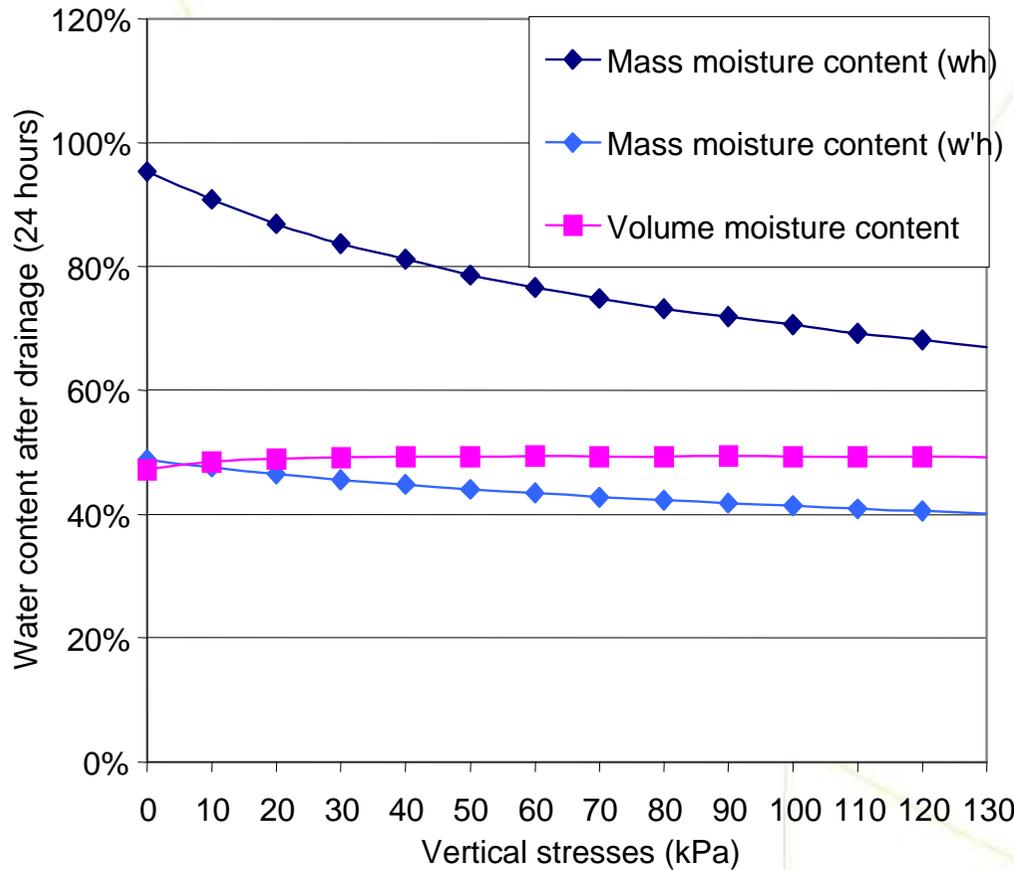
**Teneur en eau à l'équilibre
(capacité au champ)**

**Porosité utile
de drainage**

**Conductivité hydraulique
(en conditions immergées)**

CELLULE C4DC : EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU EN FONCTION DE LA CHARGE

Phase 1. $(w_h, \theta_h) = f(\sigma)$

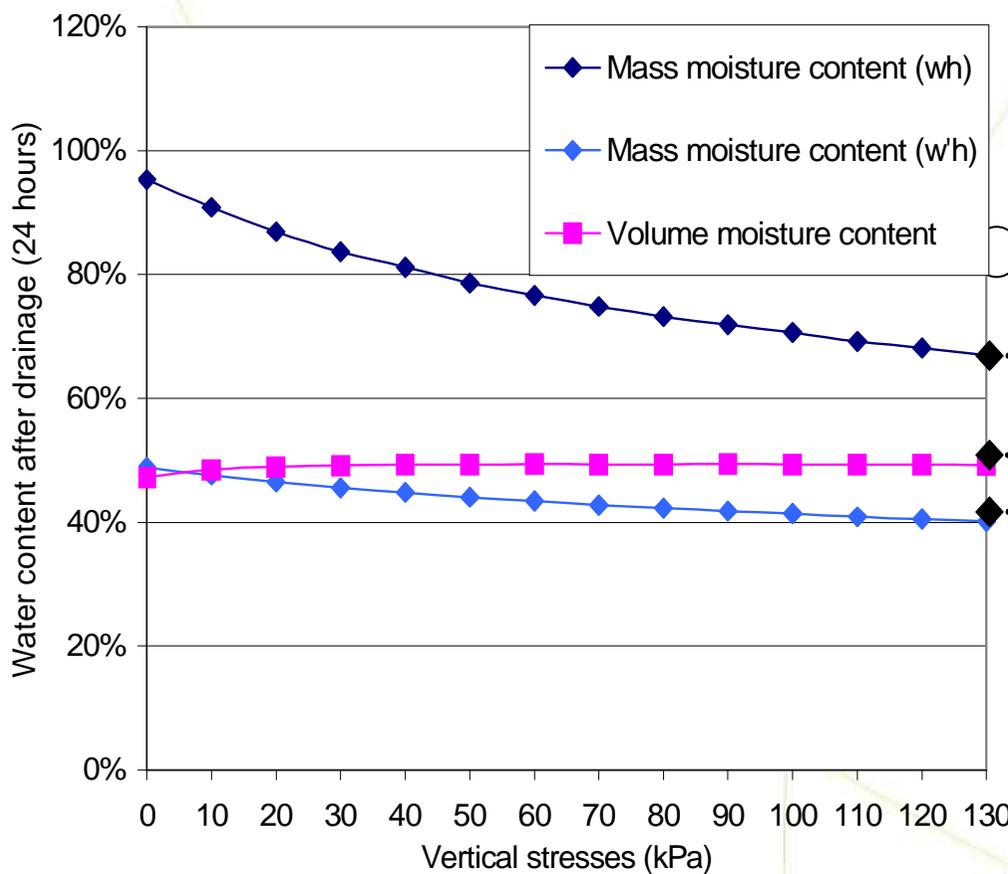


La teneur en eau volumique ne varie pas avec la charge

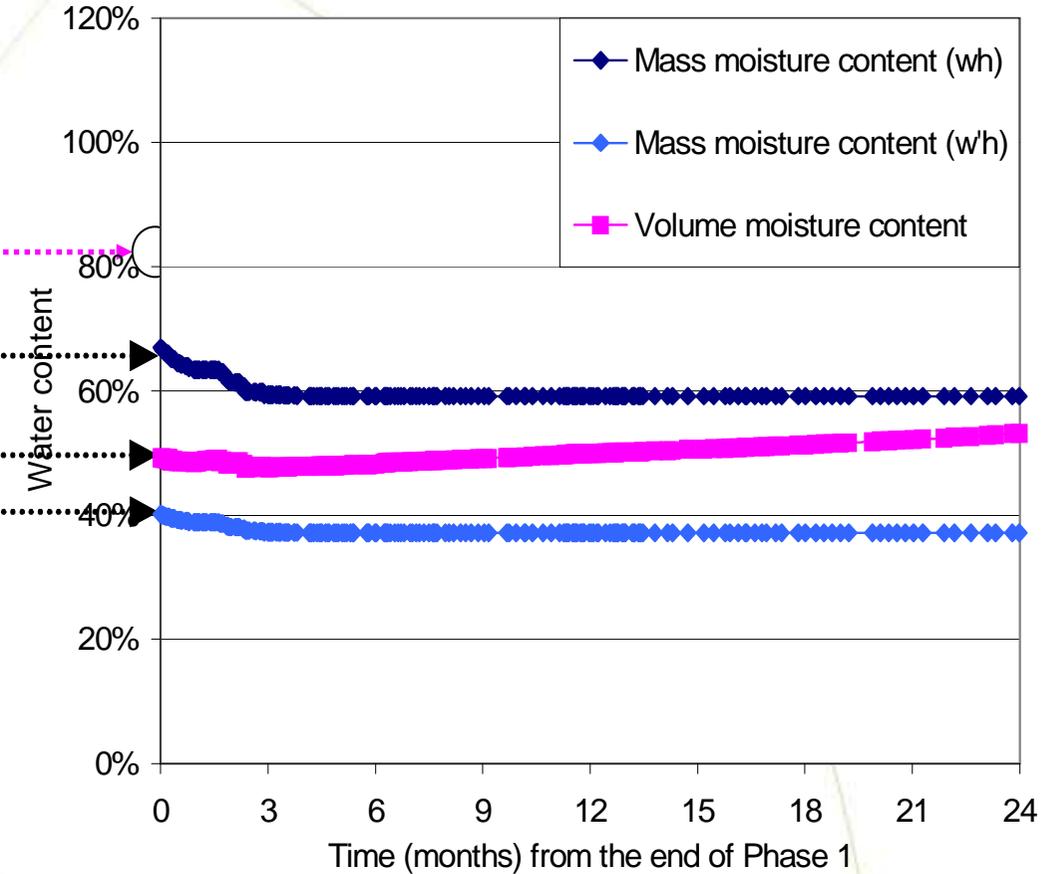
CELLULE C4DC : EVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU EN FONCTION DE LA CHARGE ET DU TEMPS

Phase 1: $(w_h, \theta_h) = f(\sigma)$

Phase 2: $(w_h, \theta_h) = f(t)$



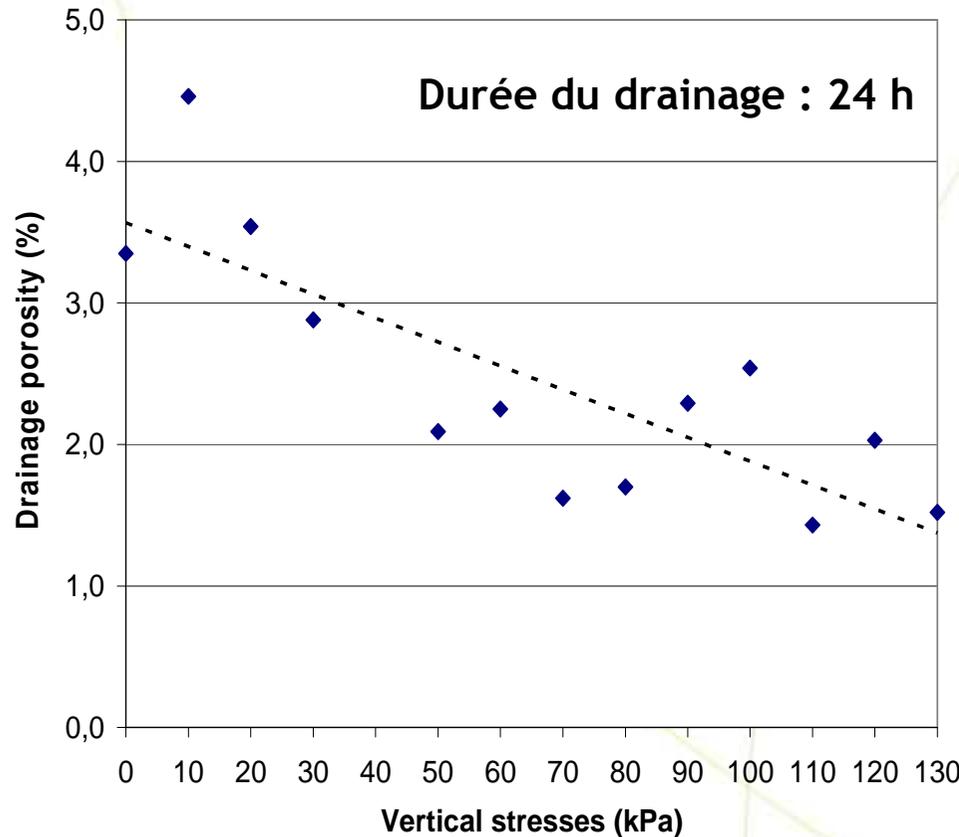
La teneur en eau volumique ne varie pas avec la charge



La teneur en eau pondérale ne varie pas au cours du temps

CELLULE C4DC : EVOLUTION DE LA POROSITE UTILE EN FONCTION DE LA CHARGE

Phase : $n_d = f(\sigma)$

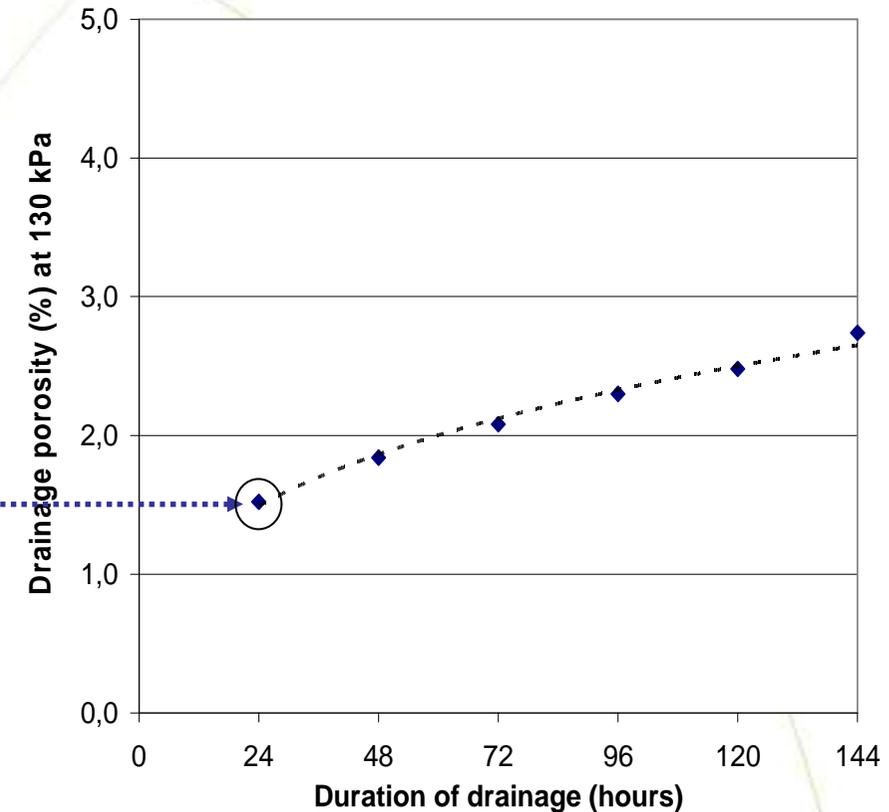
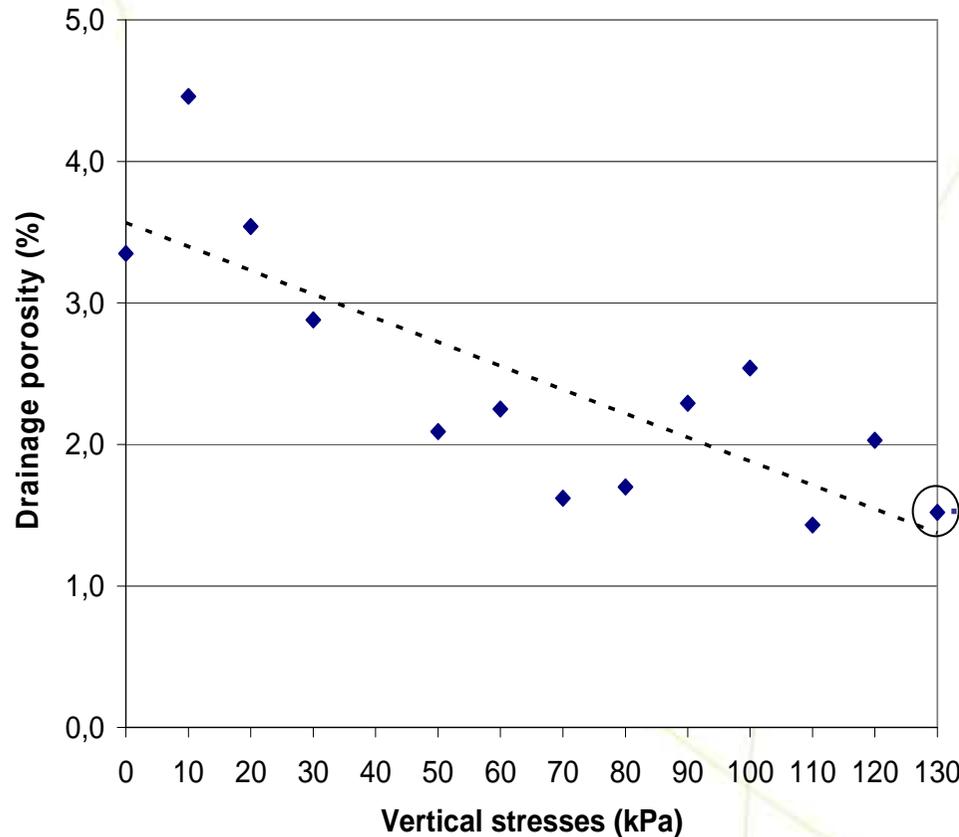


1. n_d diminue avec le niveau de chargement
2. Pourrait expliquer la montée subite de nappes de lixiviat en fond de casier en cas de drainage défectueux

CELLULE C4DC : EVOLUTION DE LA POROSITE UTILE EN FONCTION DE LA CHARGE ET DU TEMPS

Phase 1: $n_d = f(\sigma)$

Phase 2: $n_d = f(t)$

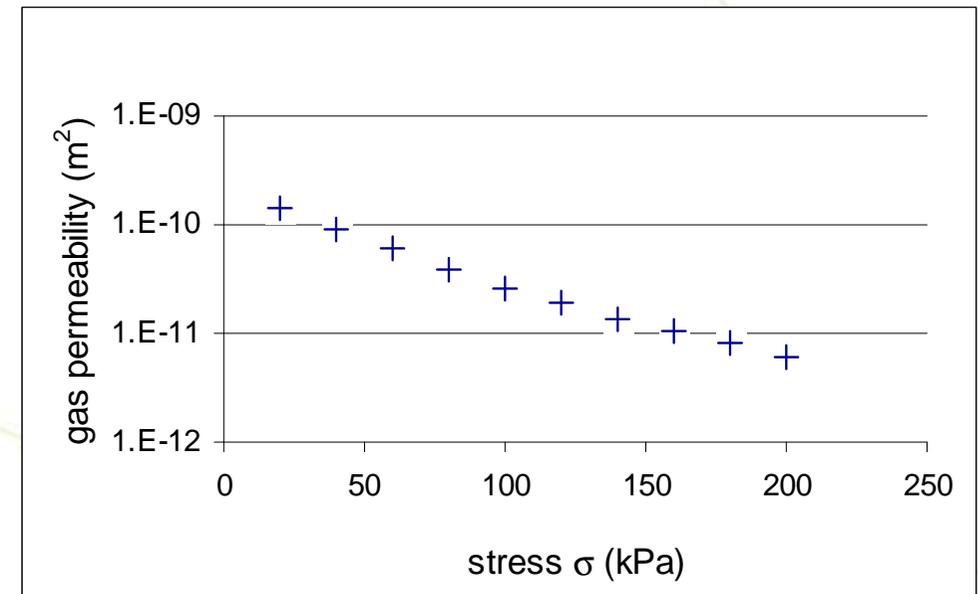
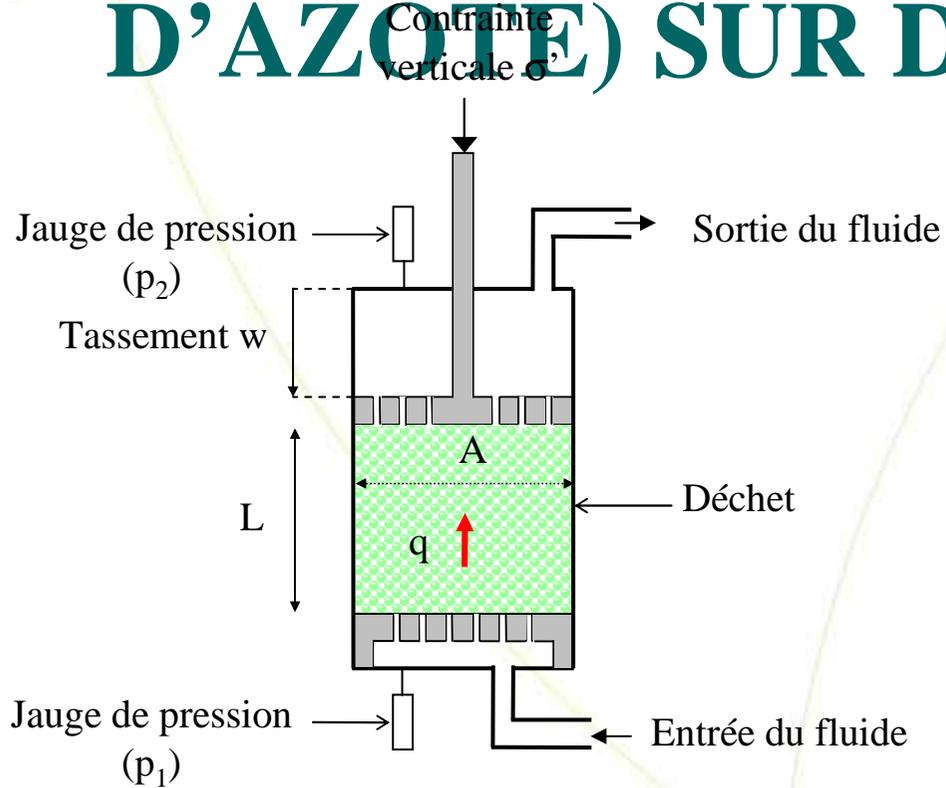


1. n_d diminue avec le niveau de chargement
2. Pourrait expliquer la montée subite de nappes de lixiviat en fond de casier en cas de drainage défectueux

1. Après vidange rapide des macro-pores, vidange retardée des micro-pores
2. Doublement de n_d jusqu'à atteindre l'équilibre après 1 semaine environ

OEDO-PERMEAMETRE : ESSAIS DE PERMEABILITE AU GAZ (PAR FLUX D'AZOTE) SUR DECHET FIN

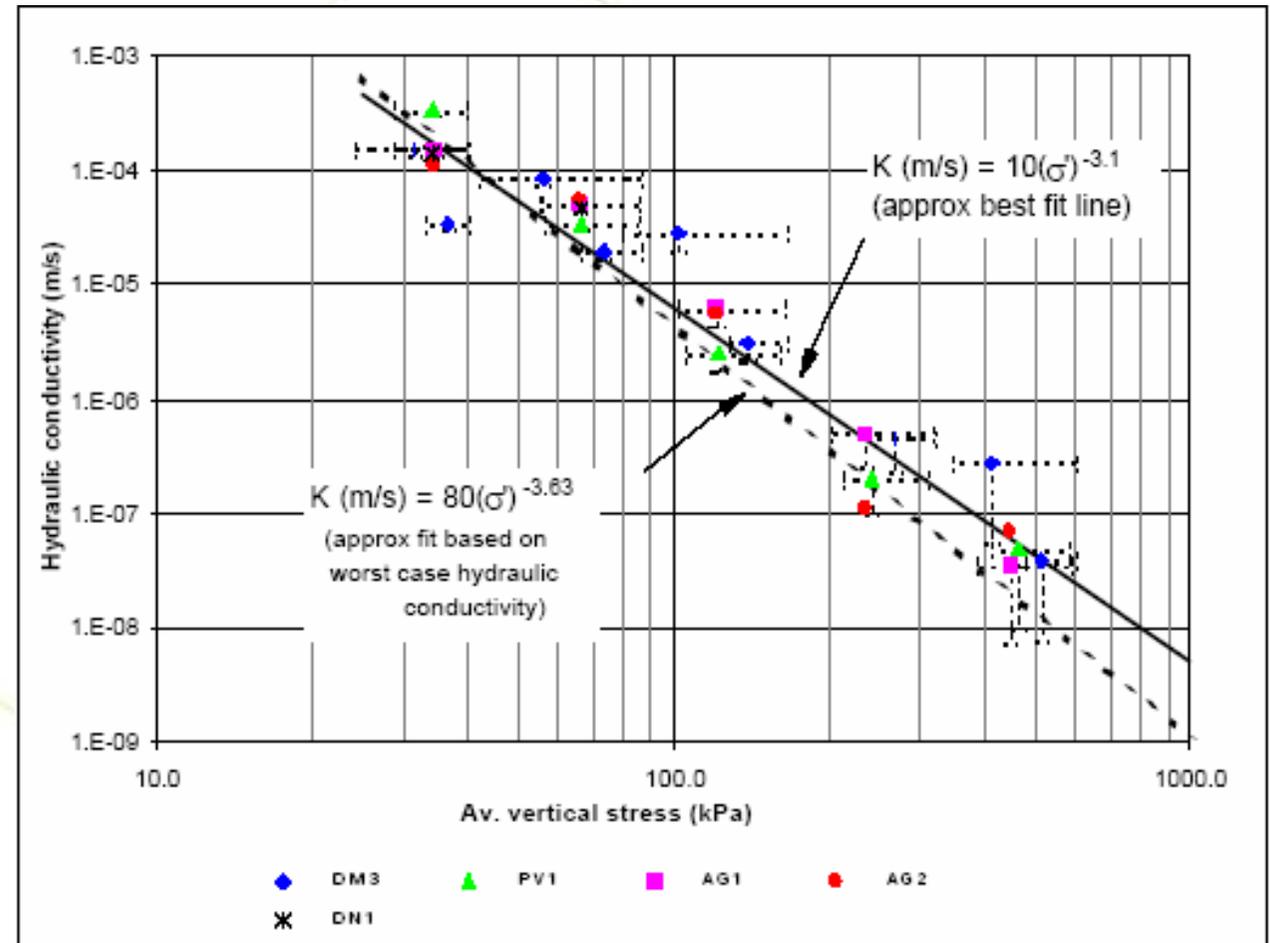
Stoltz et Gourc (2007)



$$\frac{q}{A} = \frac{k_{eg}}{\mu_g} * \frac{1}{2L} * \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_1} \quad (\text{Loi de Darcy})$$

CELLULE PI1SEA (9 m³) : ESSAIS DE PERMEABILITE AU LIQUIDE SUR DECHET GROSSIER

Powrie et Beaven (2005)



ESSAIS EN VRAI GRANDEUR SUR ANCIENNES DECHARGES EN PRESENCE D'UNE NAPPE SATUREE



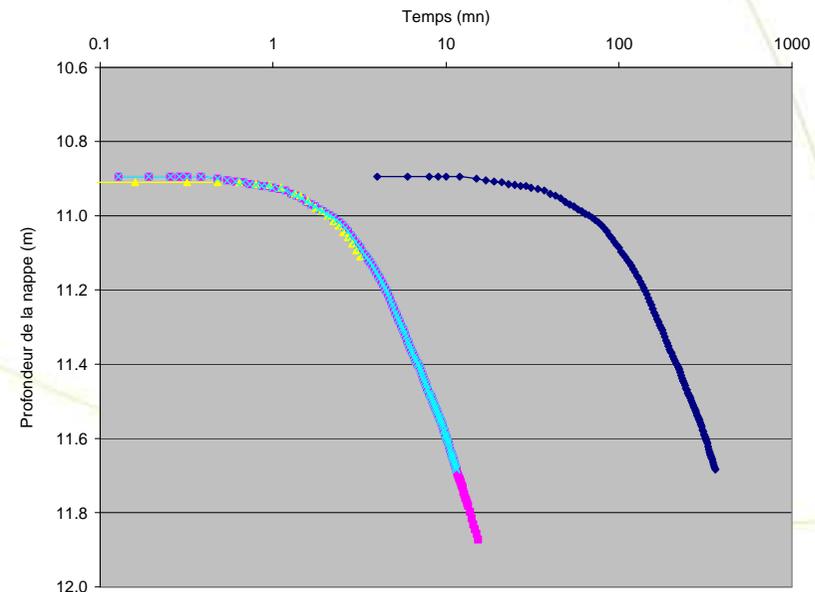
Consiste à mesurer :

- d'une part le débit pompé (m^3/h)
- d'autre part l'évolution du niveau de la nappe par rapport au niveau piézométrique initial (avant début d'essai) dans le puits de contrôle.

Pompe immergée faible débit ($< 1 m^3/h$)



Suivi de niveau de nappe dans le puits de contrôle



CALADE DES PARAMETRES HYDRO-DYNAMIQUES PAR RETRO-ANALYSE

■ ECOULEMENT EN REGIME TRANSITOIRE : FORMULE DE THEIS (1935)

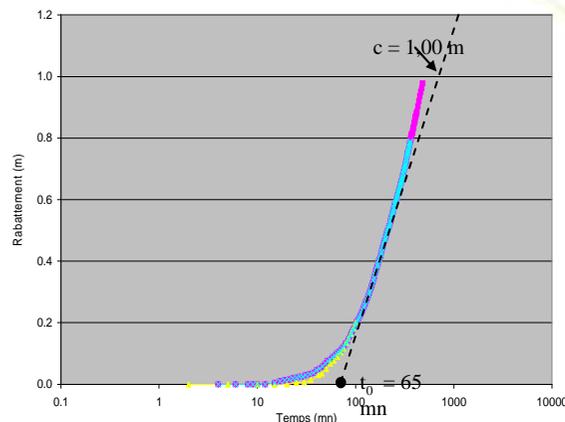
Écoulement d'une nappe souterraine vers un puits (entièrement pénétrant) en régime transitoire, en présence d'un aquifère homogène, isotrope, d'étendue illimitée, à substratum et toit imperméable :

$$\frac{\partial h}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial r}\right) = \left(\frac{S}{T}\right) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)$$

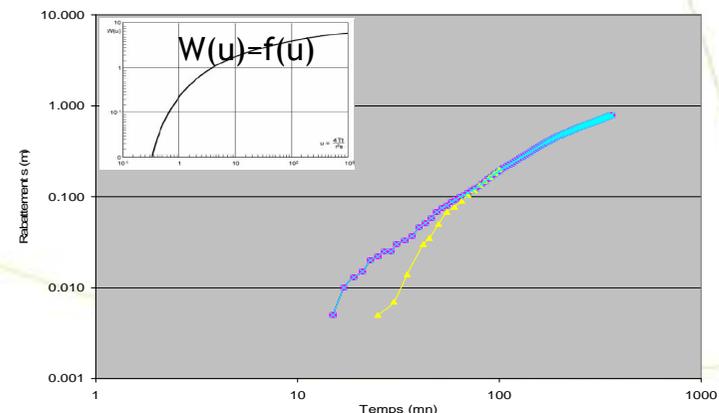


Résolution par 2 méthodes graphiques

Cooper-Jacob (1950)



Theis (1935)



MODELISATION 3D DE LA VIDANGE DE CASIERS DE DECHETS SATURES EN LIXIVIAT

Plusieurs logiciels du commerce désormais disponibles basés généralement :

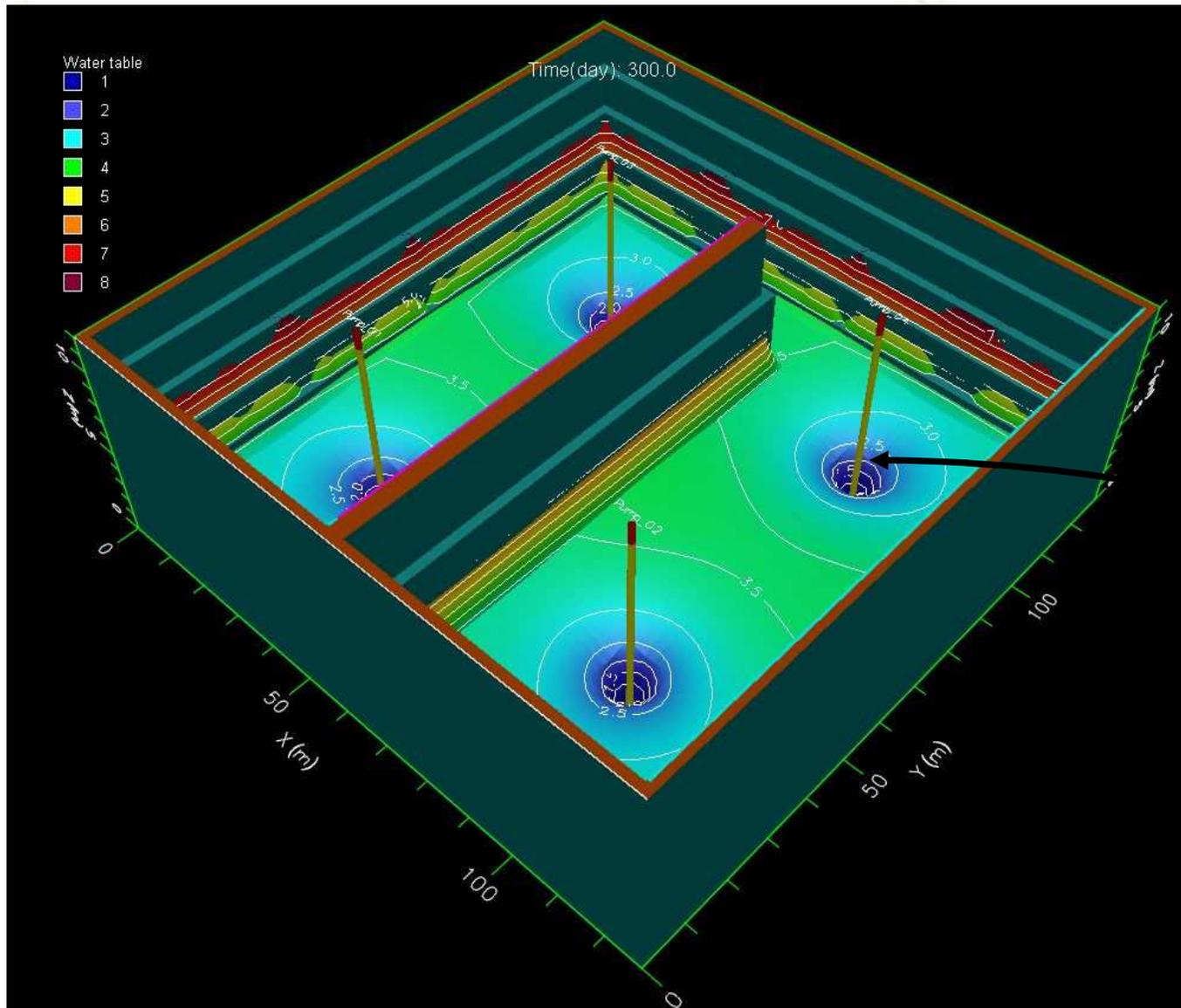
- sur la méthode des éléments finis: **Feflow®**
- sur la méthode des différences finies: **Visual Modflow®, Groundwater-Vistas®**
- sur la méthode des volumes finis: **Porflow®**

- *Méthode d'application : analyse inverse*

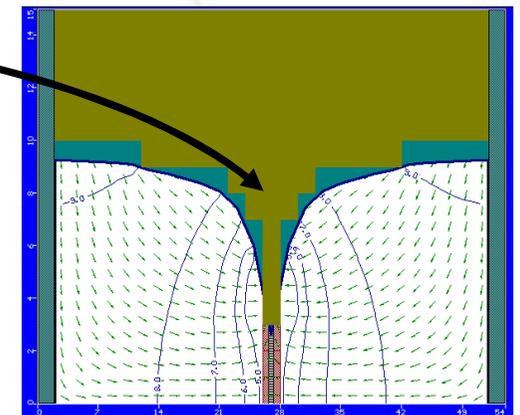
Calibration des paramètres hydrodynamiques du déchet à partir d'essais de pompage

Anticipation sur les conditions de vidange de casiers par pompage répété.

MODELISATION 3D A L'AIDE DU LOGICIEL VISUAL MODFLOW 4.2



Vue en coupe

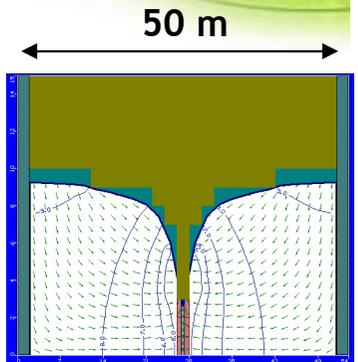
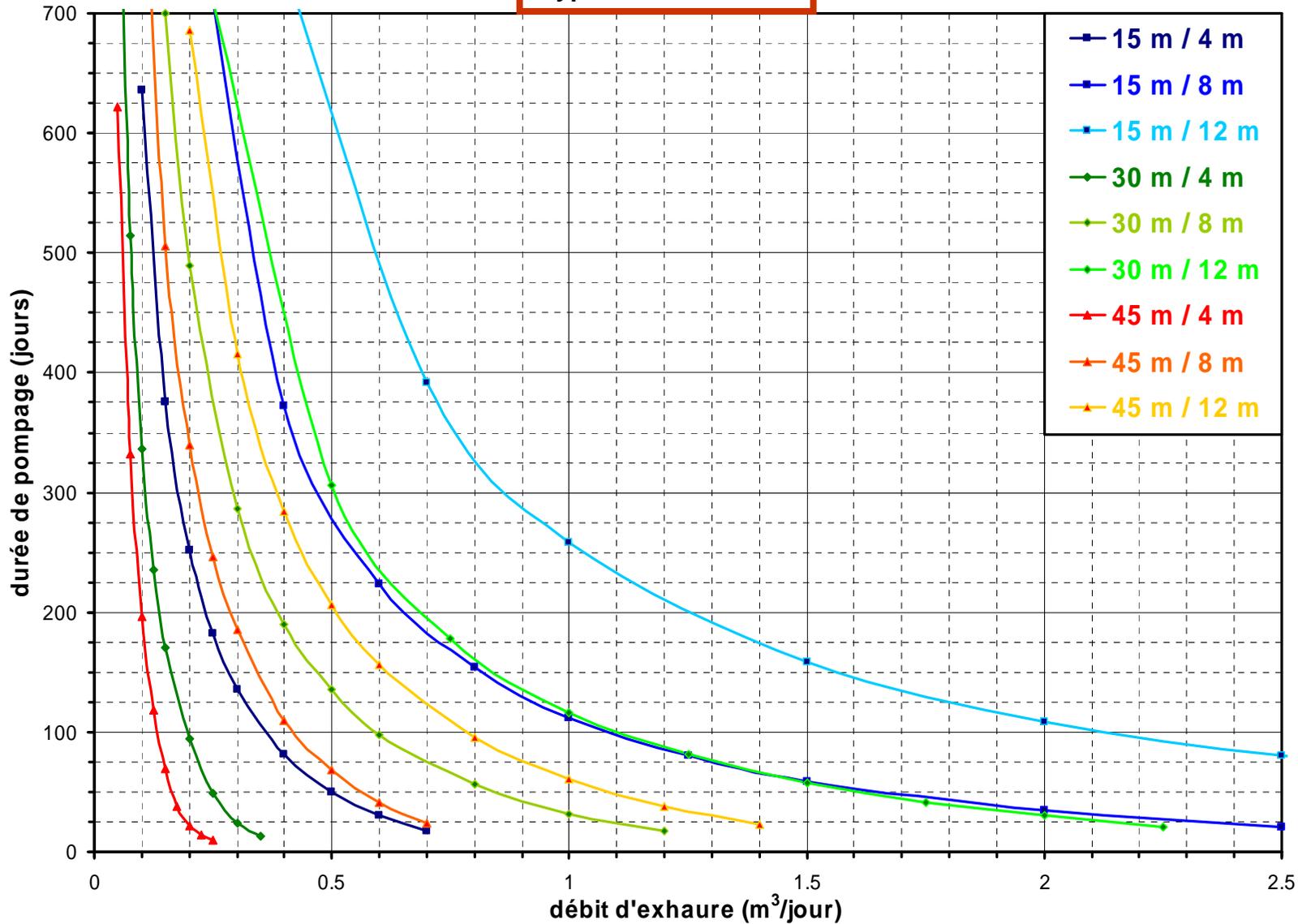


DEVELOPPEMENT D'ABAQUES DE POMPAGE : DUREE DE POMPAGE = f(DEBIT)

Déchet de caractéristiques médiocres (faible porosité & conductivité hydraulique)

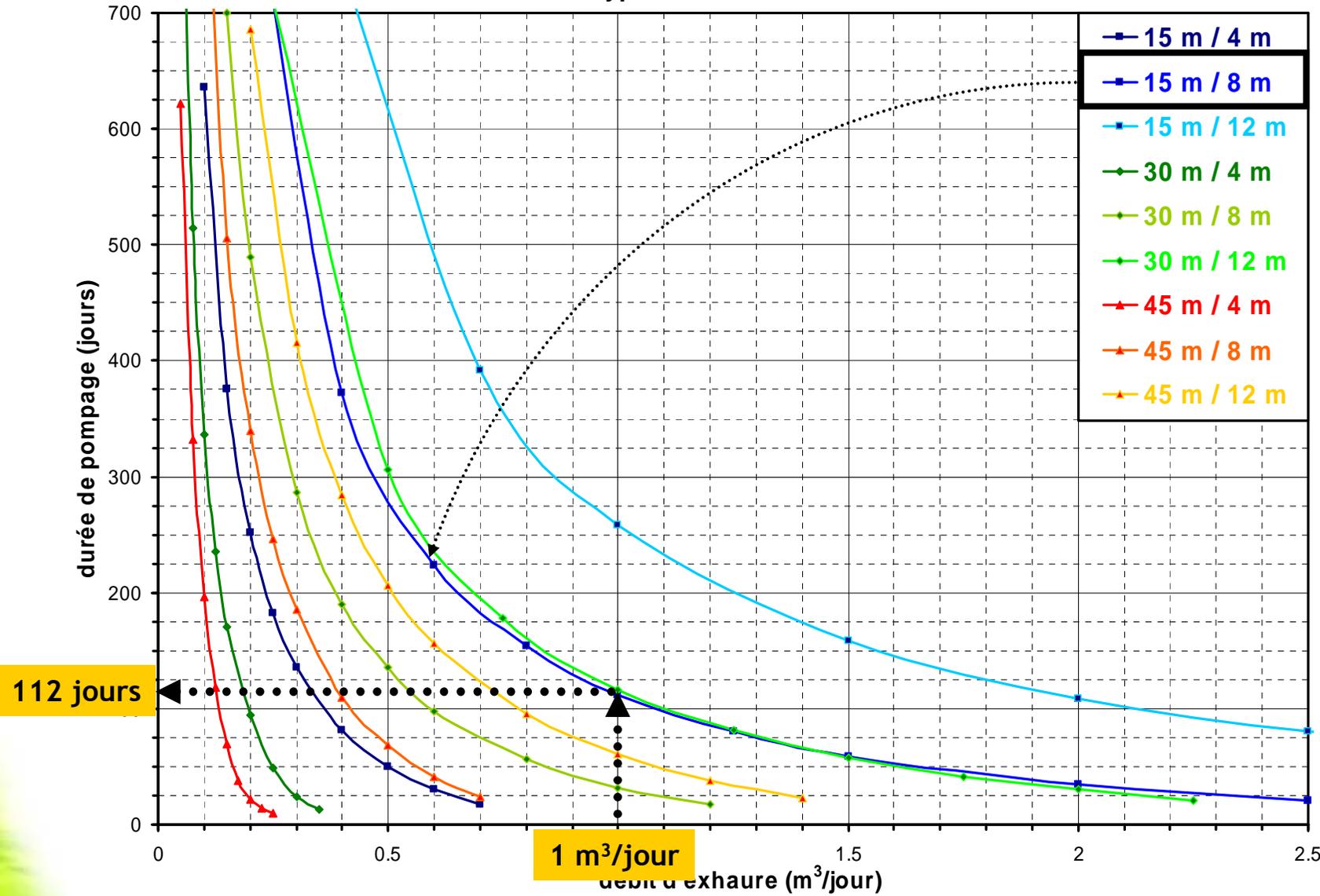
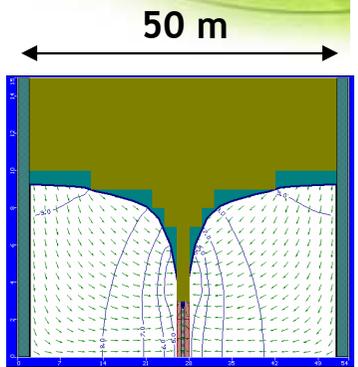
Durée de pompage en fonction du débit d'exhaure

Type de déchet n°3



DEVELOPPEMENT D'ABAQUES DE POMPAGE : DUREE DE POMPAGE = f(DEBIT)

Durée de pompage en fonction du débit d'exhaure
Type de déchet n°3

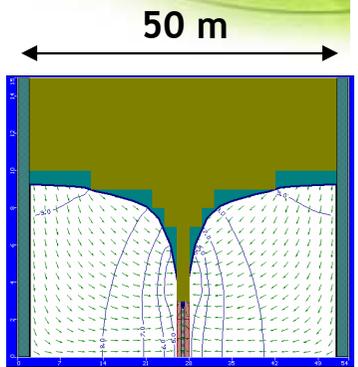
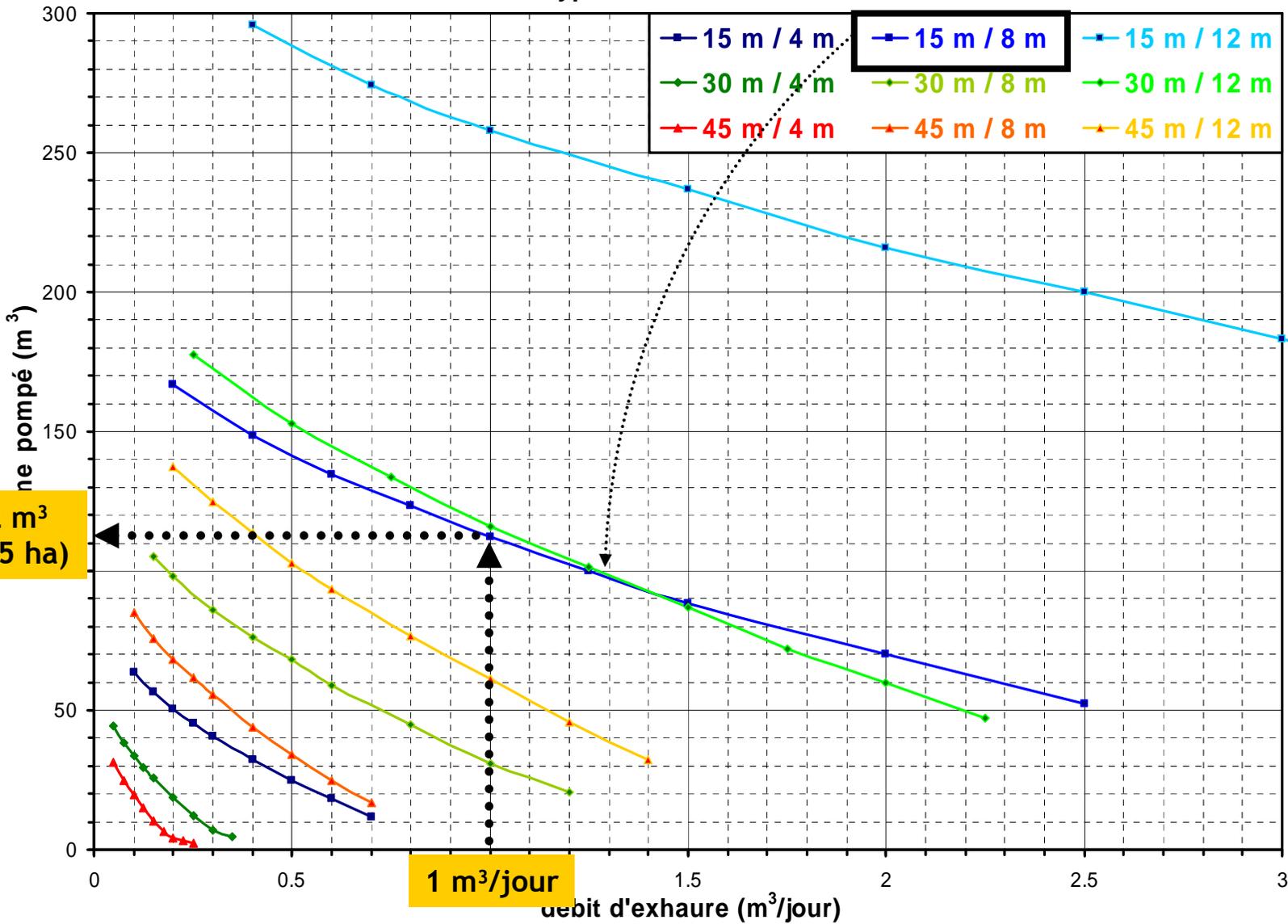


112 jours

1 m³/jour

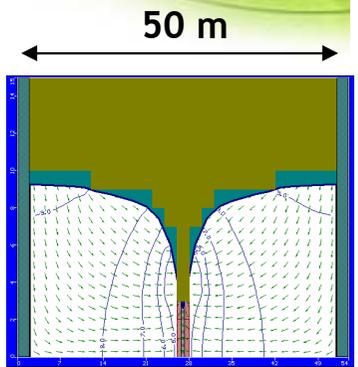
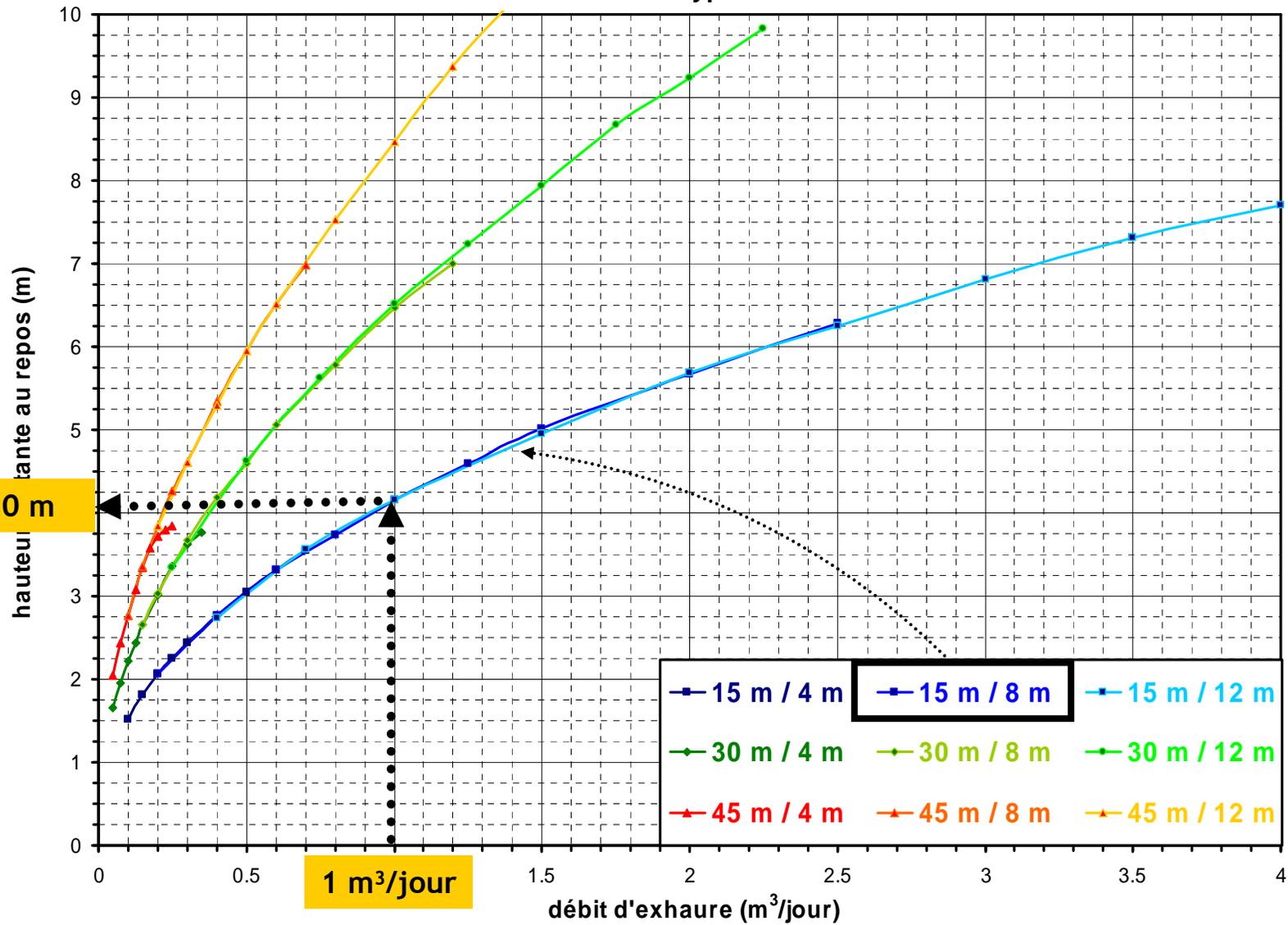
DEVELOPPEMENT D'ABAQUES DE POMPAGE : VOLUME POMPE = f(DEBIT)

Volume pompé en fonction du débit d'exhaure
Type de déchet n°3



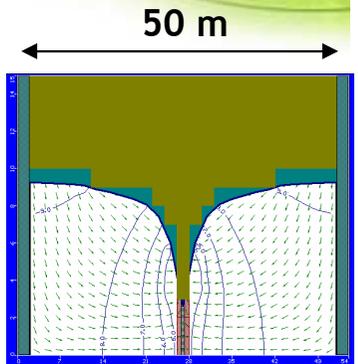
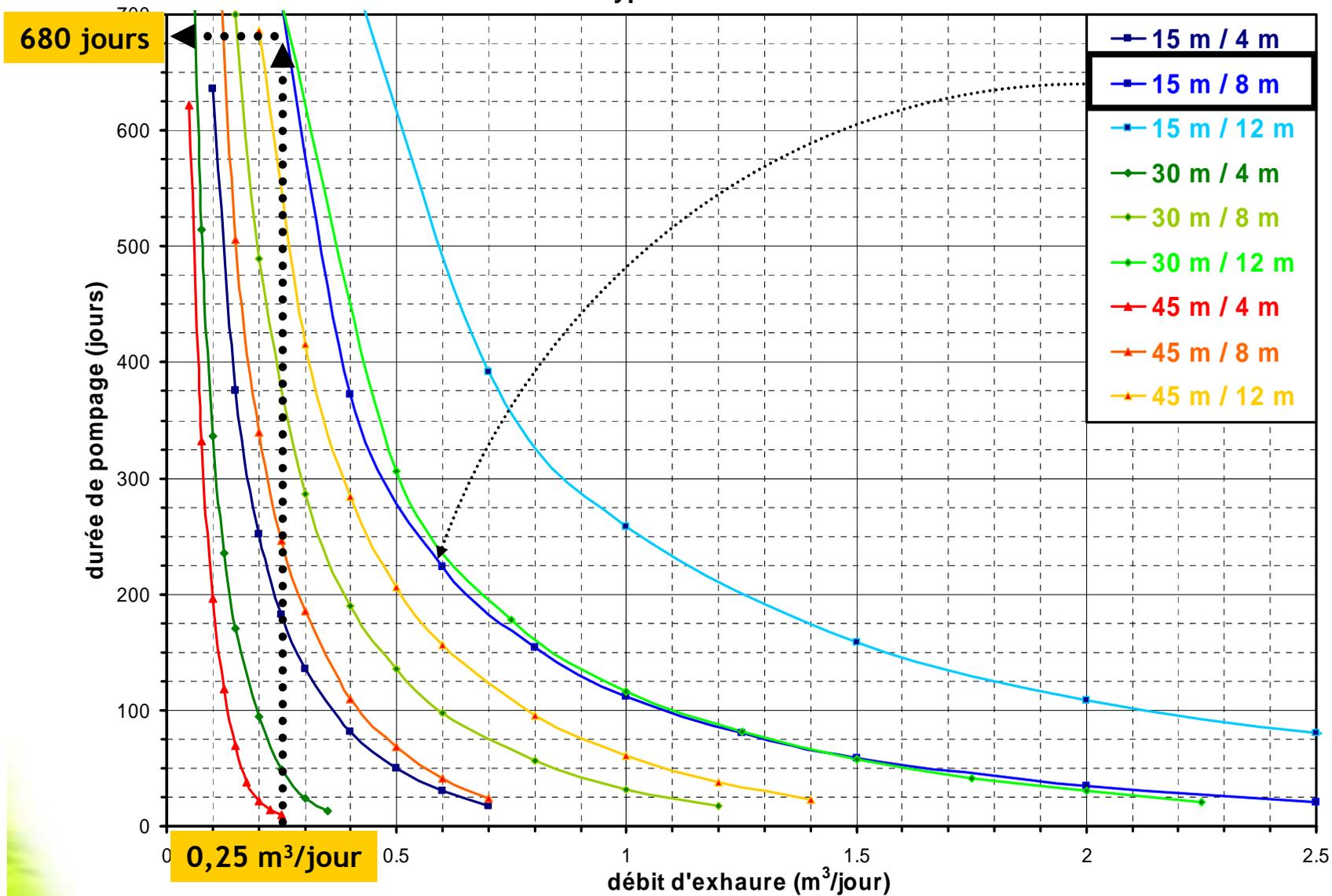
DEVELOPPEMENT D'ABAQUES DE POMPAGE : HAUTEUR RESTANTE = f(DEBIT)

Hauteur d'eau restante en fonction du débit d'exhaure
Déchet type 3



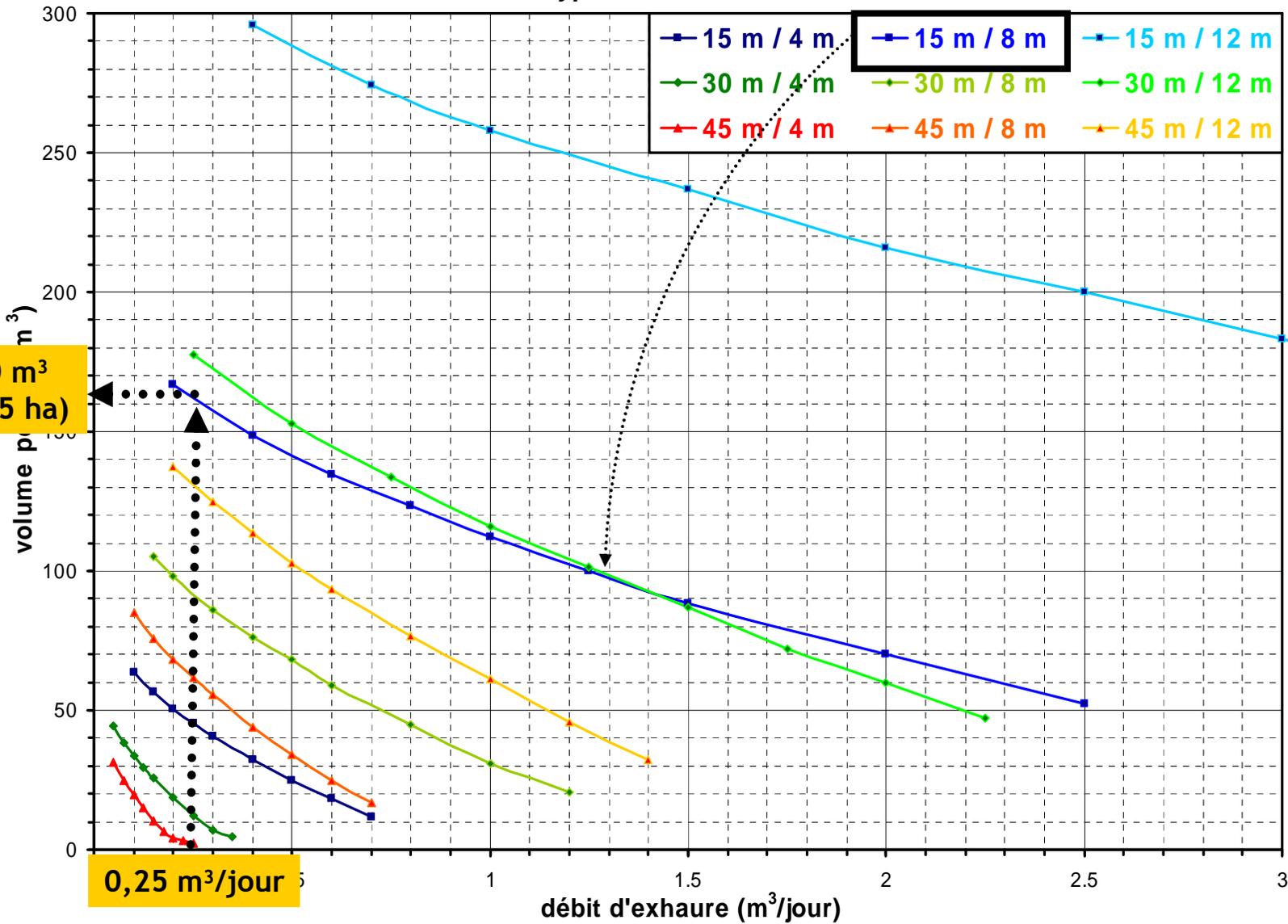
DEVELOPPEMENT D'ABAQUES DE POMPAGE : DUREE DE POMPAGE = f(DEBIT)

Durée de pompage en fonction du débit d'exhaure
Type de déchet n°3



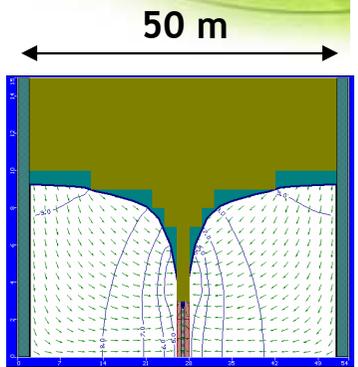
DEVELOPPEMENT D'ABAQUES DE POMPAGE : VOLUME POMPE = f(DEBIT)

Volume pompé en fonction du débit d'exhaure
Type de déchet n°3



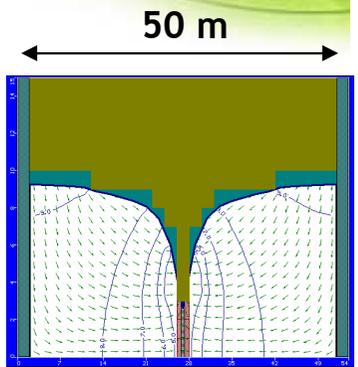
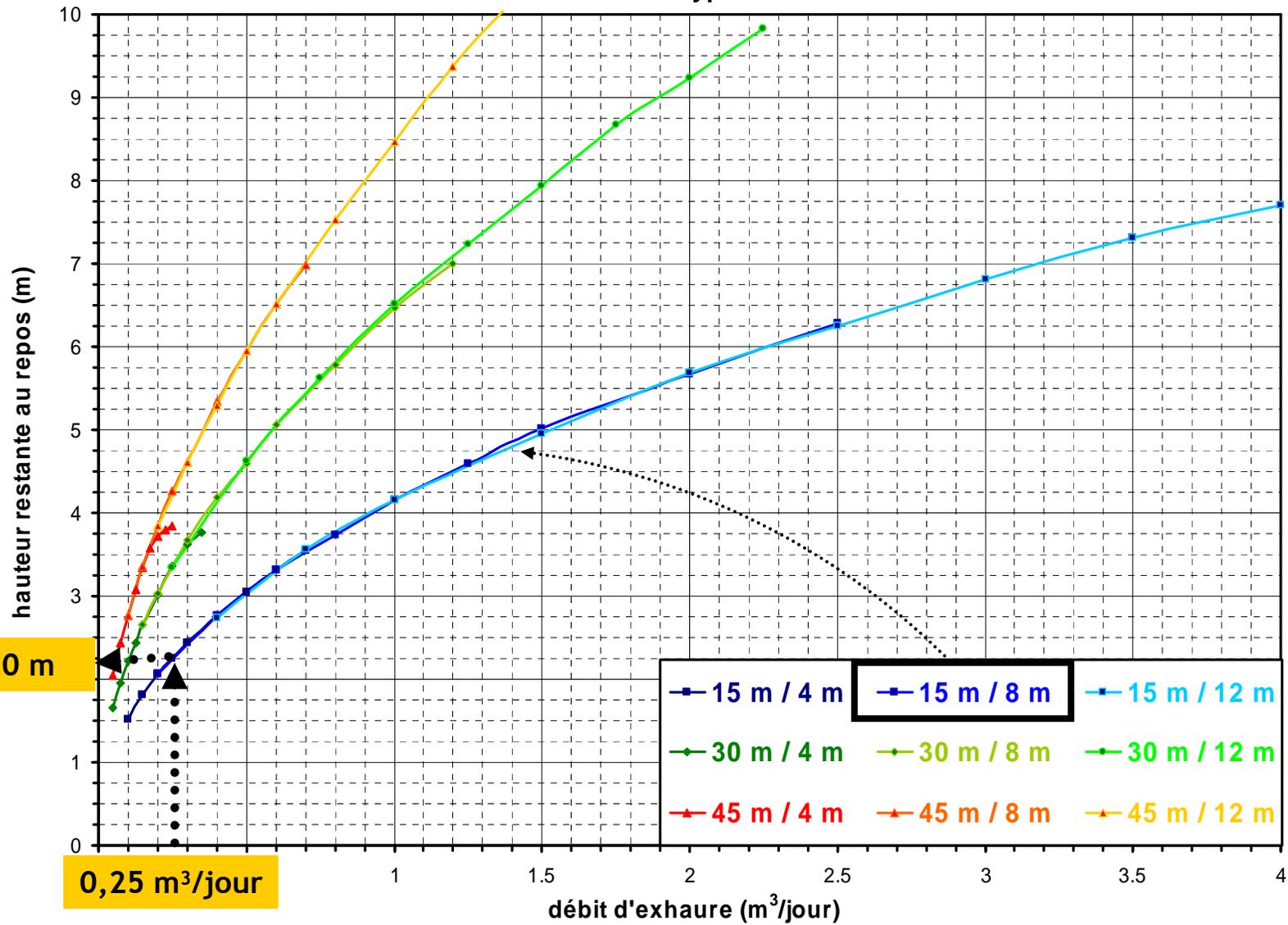
170 m³
(/0.25 ha)

0,25 m³/jour



DEVELOPPEMENT D'ABAQUES DE POMPAGE : HAUTEUR RESTANTE = f(DEBIT)

Hauteur d'eau restante en fonction du débit d'exhaure
Déchet type 3



2,10 m

0,25 m³/jour

Merci de votre attention !

*Vous retrouverez d'autres
informations sur www.ecogeos.fr*