



Formation « Planification, construction, exploitation et fermeture des décharges contrôlées au Maroc »

un projet du

Programme de Gestion et de Protection de l'Environnement en Maroc (PGPE)

en coopération avec



Module 1 : Bases de planification *Code de Bonnes Pratiques (CBP) § 1*

2^{ème} JOUR

- Présentation 7 : Importance de la barrière géologique 09:00 – 09:30
- Présentation 8 : Investigations géotechniques du site retenu 09:30 – 10:15
- Présentation 9 : Essais de laboratoire 10:45 – 11:45
- Présentation 10 : Surveillance de la nappe (piézomètres) 11:45 – 12:00
- Présentation 11 : Essais de perméabilité in-situ 13:30 – 14:00
- Présentation 12 : Exercice – Isopièzes - Méthode des triangles 14:00 – 14:30
- **Présentation 13 : Renforcement de la barrière géologique 14:30 – 15:00**
- Présentation 14 : Exercices – Investigations géotechniques 15:00 – 16:00
- Discussion : Questions / Réponses 16:00 – 16:30



Présentation 13 : Renforcement de la barrière géologique (CBP § 2.2)

1. Exigences requises à la barrière géologique
2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »
3. Amélioration de la barrière géologique en place



01 1. Exigences requises à la barrière géologique

02

Exigences requises au droit du site et aux alentours du site de la future décharge

03

04

Les exigences géologiques que doit satisfaire la **barrière géologique** d'une décharge sont décrites dans la **Directive 1999/31/CE** concernant la mise en décharge des déchets:

05

➤ « **Capacité d'atténuation** suffisante pour éviter tout risque pour le sol et les eaux souterraines »

➤ « **La base et les côtés** de la décharge doivent être constitués d'une couche minérale répondant à des exigences de perméabilité et d'épaisseur dont l'effet combiné, en termes de protection du sol, des eaux souterraines et des eaux de surface, est au moins équivalent à celui résultant des exigences suivantes :

➤ Décharge pour déchets dangereux : $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s, ép. ≥ 5 m

➤ Décharge pour déchets non dangereux : $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s, ép. ≥ 1 m

➤ Décharge pour déchets inertes : $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s, ép. ≥ 1 m



01

1. Exigences requises à la barrière géologique

02

Exigences requises au droit du site et aux alentours du site de la future décharge

03

04

➤ Dans la pratique, il est rare de trouver une couche géologique avec un coefficient de perméabilité $k \leq 10^{-9}$ m/s.

05

➤ Une perméabilité naturelle de la roche **$k \geq 10^{-7}$ m/s** est nécessaire pour pouvoir affirmer que le substratum exerce un effet de « barrière » pour la décharge vis-à-vis de l'environnement.

➤ Si le substratum en place ne remplit pas les exigences de la Directive 1999/31/CE en termes d'épaisseur et de perméabilité, une **barrière artificielle** peut être mise en place avant la pose de l'étanchéité de base.

➤ **Barrière géologique technique**

Présentation 13

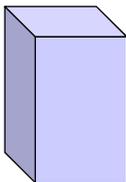


01

1. Exigences requises à la barrière géologique

02

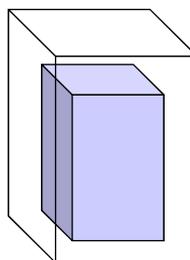
Barrière 1



Déchets

Critères d'admission
Gestion de décharge

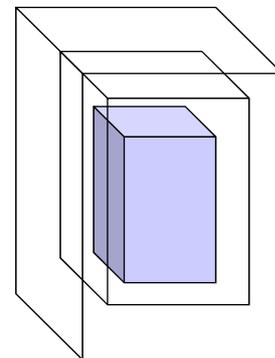
Barrière 2



Systèmes d'étanchéité

Étanchéité à la base
Étanchéité de surface

Barrière 3



Site

Barrière géologique naturelle
Barrière géologique technique

Principe des barrières de sécurité multiples

Présentation 13



01

1. Exigences requises à la barrière géologique

02

En réalité il existe 2 possibilités :

03

04

➤ Soit la barrière géologique est **inexistante**

05

➤ Alors on la remplace par une « **barrière géologique technique** »

➤ Soit la barrière géologique est **insuffisante**

➤ Alors on peut l'améliorer ou la compléter

➤ Même existante une barrière géologique doit toujours être homogénéisée en surface (sur 0,5 m de profondeur)

Présentation 13



01

1. Exigences requises à la barrière géologique

02

Exigences requises à la barrière géologique technique

03

Les exigences que doit satisfaire la **barrière géologique technique** sont équivalente à celle d'une barrière géologique naturelle :

04

05

➤ **Epaisseur** $e \geq 0.5 \text{ m}$ (mise en œuvre en 2 couches)

➤ Le **coefficient de perméabilité** k à respecter pour la barrière technique est **calculé** de façon à ce que les propriétés de la barrière technique soient équivalentes à celles requises pour une barrière naturelle.

Pour vérifier cela, on utilise la formule de la **Permittivité (qui relie k et e)** :

$$\Psi = k / e$$

Présentation 13



01

1. Exigences requises à la barrière géologique

02

Exigences requises à la barrière géologique technique

03

Calcul du coefficient de perméabilité équivalent :

04

Si l'épaisseur de la barrière technique qu'on va mettre en place est plus faible que l'épaisseur de la barrière géologique normalement requise, alors il faut que la couche mise en place soit moins perméable (k plus faible).

05

Permittivité (relie k et e) : $\Psi = k / e$

- Décharge pour déchets dangereux : $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s, ép. ≥ 5 m
- Barrière technique équivalente : $k \leq 1,0 \times 10^{-10}$ m/s, ép. $\geq 0,5$ m
- Décharge déchets pour non dangereux : $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s, ép. ≥ 1 m
- Barrière technique équivalente : $k \leq 0,5 \times 10^{-10}$ m/s, ép. $\geq 0,5$ m
- Décharge pour déchets inertes : $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s, ép. ≥ 1 m
- Barrière technique équivalente : $k \leq 0,5 \times 10^{-8}$ m/s, ép. $\geq 0,5$ m

Exemple (décharge pour déchets dangereux) : $\Psi = k / e = 10^{-9} / 5 = 10^{-10} / 0,5$

Présentation 13



01

1. Exigences requises à la barrière géologique

02

En cas d'absence d'une barrière géologique naturelle

03

On peut la remplacer par une « **barrière géologique technique** »

04

05

Les exigences à celle-ci ont été donnée précédemment :

- Décharge pour déchets dangereux : $k \leq 1,0 \times 10^{-10}$ m/s, ép. $\geq 0,5$ m
- Décharge déchets pour non dangereux : $k \leq 0,5 \times 10^{-10}$ m/s, ép. $\geq 0,5$ m
- Décharge pour déchets inertes : $k \leq 0,5 \times 10^{-8}$ m/s, ép. $\geq 0,5$ m

L'épaisseur minimale à respecter est toujours de 0,5 m.

Si on choisit une épaisseur plus élevée, on peut accepter un coefficient de perméabilité plus élevé (à calculer cependant en fonction de la permittivité équivalente à celle requise pour une barrière géologique naturelle non renforcée).

Présentation 13



Présentation 13 : Renforcement de la barrière géologique

1. Exigences requises à la barrière géologique
2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »
3. Amélioration de la barrière géologique en place



01

2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »

02

La mise en œuvre d'une barrière géologique technique est identique à celle d'une étanchéité minérale

03

04

Un certain nombre de couches d'un matériau faiblement perméable sont étalées et compactées sur la plateforme au fond de la décharge.

05

La barrière géologique technique ainsi mise en œuvre doit remplir les exigences fixées pour la barrière géologique naturelle :

- Il est possible de mettre en œuvre une couche d'étanchéité de 0,5 m d'épaisseur plutôt que d'1 m d'épaisseur à condition que son coefficient de perméabilité soit plus faible.

L'équivalence d'efficacité de la barrière géologique est justifiée en général par le calcul de la permittivité de l'étanchéité.



01

2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »

02

Calcul de k et ψ d'après la loi de Darcy

03

04

05

$$k = \frac{Q}{A} \times \frac{l}{\Delta h}$$

$$\psi = \frac{Q}{A \times \Delta h} \quad \text{ou} \quad \frac{k}{l}$$

Avec :

k : coefficient de perméabilité (m/s)

Q : Débit volumique (m³/s)

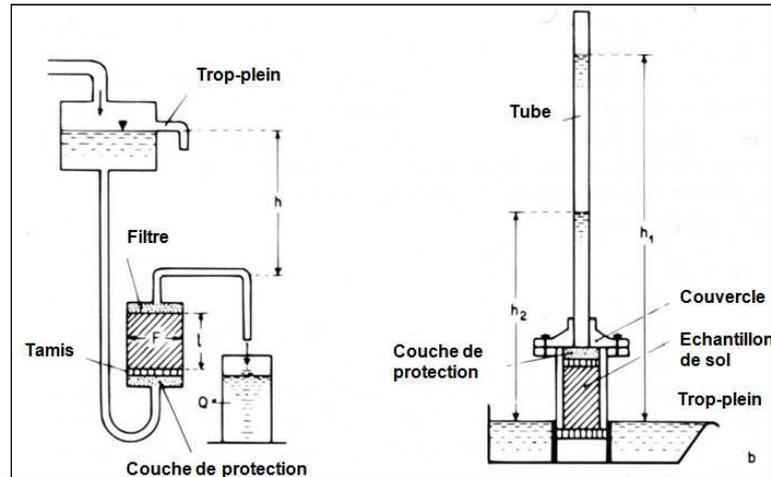
A : Surface de la section traversée (m²)

l : Longueur de l'échantillon (m)

Δh : Différence de hauteur d'eau entre t_0 et t (m)

ψ : Permittivité (1/s)

Protocole expérimental pour déterminer k



Présentation 13



01

2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »

02

Percolation à travers une couche d'argile de la barrière géologique

03

04

05

$$Q_{(t)} = k \cdot h_i \cdot F \cdot t$$

$$= [\text{m/s}] \cdot [-] \cdot [\text{m}^2] \cdot [\text{s}] = [\text{m}^3]$$

avec $k = 5 \cdot 10^{-10}$ m/s et $h = 0,75$ m



$$h_i = \frac{H + d}{d}$$

Exemples sur un an (31.536.000 s) avec différentes charges hydrauliques (0,1 μm - 10 m d'eau) :

$= 5 \cdot 10^{-10} \cdot (0,75 + 0,0001)/0,75 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,01577 \text{ m}^3 =$	15,768 l
$= 5 \cdot 10^{-10} \cdot (0,75 + 0,001)/0,75 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,01579 \text{ m}^3 =$	15,789 l
$= 5 \cdot 10^{-10} \cdot (0,75 + 0,01)/0,75 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,01597 \text{ m}^3 =$	16,0 l
$= 5 \cdot 10^{-10} \cdot (0,75 + 0,1)/0,75 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,0179 \text{ m}^3 =$	17,9 l
$= 5 \cdot 10^{-10} \cdot (0,75 + 1)/0,75 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,0368 \text{ m}^3 =$	36,8 l
$= 5 \cdot 10^{-10} \cdot (0,75 + 10)/0,75 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,2260 \text{ m}^3 =$	226,0 l

Présentation 13



01

2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »

02

Percolation à travers une couche
d'argile de la barrière géologique

03

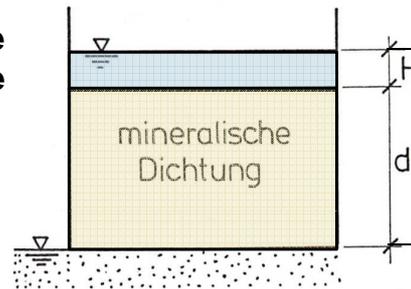
04

05

$$Q_{(t)} = k \cdot h_i \cdot F \cdot t$$

$$= [\text{m/s}] \cdot [-] \cdot [\text{m}^2] \cdot [\text{s}] = [\text{m}^3]$$

avec $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ et $h = 0,50 \text{ m}$



$$h_i = \frac{H+d}{d}$$

Exemples sur un an (31.536.000 s) avec différentes charges hydrauliques (0,1 µm - 10 m d'eau) :

$= 1 \cdot 10^{-9} \cdot (0,5 + 0,0001)/0,5 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,03154 \text{ m}^3 =$	31,542 l
$= 1 \cdot 10^{-9} \cdot (0,5 + 0,001)/0,5 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,03160 \text{ m}^3 =$	31,560 l
$= 1 \cdot 10^{-9} \cdot (0,5 + 0,01)/0,5 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,03216 \text{ m}^3 =$	32,167 l
$= 1 \cdot 10^{-9} \cdot (0,5 + 0,1)/0,5 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,03784 \text{ m}^3 =$	37,843 l
$= 1 \cdot 10^{-9} \cdot (0,5 + 1)/0,5 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,09460 \text{ m}^3 =$	94,608 l
$= 1 \cdot 10^{-9} \cdot (0,5 + 10)/0,5 \cdot 1 \cdot 31536000$	$= 0,66226 \text{ m}^3 =$	662,256 l

Présentation 13



01

2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »

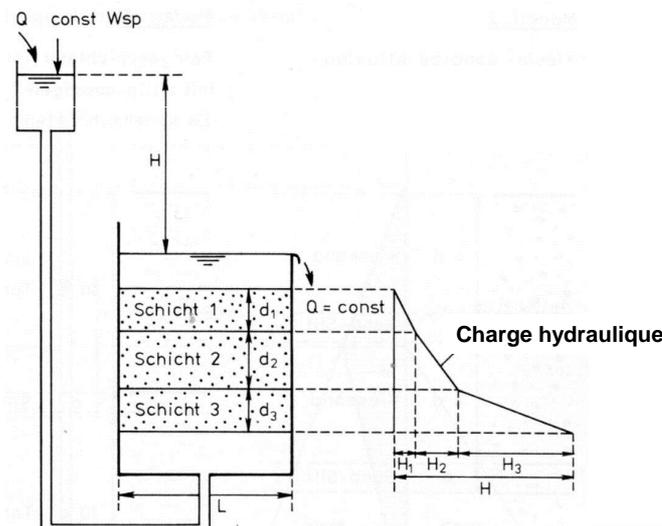
02

Coefficient de perméabilité moyen k_{mv} d'un ensemble de couches :
Percolation de l'eau perpendiculairement aux couches

03

04

05



$$k_{mv} = \frac{\sum d_i}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3}}$$

Quelle: Huder & Lang 2010

Présentation 13



01

2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »

02

Types de barrières géologiques techniques courantes :

03

➤ Etanchéité minérale en plusieurs couches (par exemple):

04

- Argile naturelle
- Limon argileux naturel

05

ou

- Mélange sol naturel / bentonite
- Mélange argile ou limon / bentonite
- Mélange sable / bentonite
- Mélange sable / bentonite / polymère (ex: TRISOPLAST®)

Présentation 13





Présentation 13 : Renforcement de la barrière géologique

1. Exigences requises à la barrière géologique
2. Mise en place d'une « Barrière géologique technique »
- 3. Amélioration de la barrière géologique en place**



01

3. Amélioration de la barrière géologique en place

02

Pourquoi la barrière géologique naturelle est-elle insuffisante ?

03

04

- **Epaisseur** insuffisante ?

05

- **Imperméabilité** insuffisante ?

(k_f trop élevé : $k_f \geq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ou $1,0 \times 10^{-7}$ m/s, selon la classe de la future décharge)

- **Présence** de la barrière géologique sur toute la surface du site ou seulement localement ?



01

3. Amélioration de la barrière géologique en place

02

Comment améliorer les propriétés de la barrière géologique naturelle ?

03

04

➤ **Amélioration par malaxage du sol en place** avec de la bentonite pour augmenter l'imperméabilité du sous-sol de la décharge

05

➤ **Ajout d'une ou plusieurs couche(s) d'étanchéité minérale** pour atteindre la permittivité équivalent à la permittivité requise pour la barrière géologique naturelle

Présentation 13



01

3. Amélioration de la barrière géologique en place

02

Malaxage en place avec de la bentonite

03

04

➤ **Utilisation d'engins spécialisés** (Epandeur de liant, Malaxeur de forte puissance, etc.) **pour assurer l'homogénéité du sol traité.**

05

➤ **Profondeur de malaxage : jusqu'à 50 cm en général**

➤ **La quantité de bentonite à ajouter doit faire l'objet d'une étude en laboratoire avec différents mélanges** (quantités de bentonite, qualités de bentonite, etc.)

➤ **Une planche d'essai sur le site est nécessaire tout comme dans le cas de la mise en place d'une couche d'étanchéité minérale (perméabilité, compacité, etc.)**

Présentation 13



01

3. Amélioration de la barrière géologique en place

02

Ajout d'une ou plusieurs couche(s) d'étanchéité minérale

03

04

➤ **Objectif : atteindre la permittivité équivalent à la permittivité requise pour la barrière géologique naturelle**

05

➤ **L'épaisseur et la perméabilité de la couche à mettre en œuvre dépendent :**

➤ **des matériaux disponibles à proximité du site**

➤ **De la qualité de la barrière géologique naturelle en place (k, e)**

Présentation 13

*Merci pour
votre
attention*



Gerd BURKHARDT
Directeur général
burkhardt@icp-ing.de



Pélagie BALL
Gestion de projets
ball@icp-ing.de