

# CONCEPTION DES CENTRES DE STOCKAGE DE DECHETS : CALCUL DE L'ECARTEMENT DES DRAINS

T. HARTANI

Docteur de l'Ecole Centrale de Paris, Maître assistant à l'Institut National d'Agronomie d'Alger.

A. MUSY

Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

## Résumé

*L'évolution du contexte législatif en matière de gestion des déchets trouve son origine dans l'expression d'un besoin croissant d'une meilleure protection de l'environnement. La conception des centres de stockage de déchets permet de drainer les eaux polluées en minimisant les risques de contamination du milieu. Actuellement, les normes de dimensionnement de ces ouvrages reposent sur des bases empiriques. Une méthode de calcul de l'écartement des drains est développée à partir de considérations théoriques. Elle établit de manière formelle la relation entre l'écartement des drains et la pente en régime transitoire.*

**Mots clés :** Centre de stockage des déchets • Drainage • Ecartement • Pente •

## 1 INTRODUCTION

Le drainage des centres de stockage des déchets s'inscrit dans le cadre d'une législation nationale et internationale qui tend à renforcer les dispositions de protection de l'environnement [1,2,3]. Les eaux qui traversent les dépôts d'origine ménagère, industrielle ou agricole sont appelées lixiviats. Elles entraînent de nombreux polluants organiques et minéraux soit en profondeur vers les nappes, soit vers des zones relativement saines par ruissellement. Elles sont collectées puis évacuées vers des fossés extérieurs par la mise en place de structures d'étanchéité et de drainage adéquates

(figure 1). La législation relative aux couvertures de décharge est fondée sur une démarche empirique qui exige, entre autres, de retenir une pente d'au moins 5% pour les casiers de décharge. Le critère d'efficacité généralement retenu est la hauteur maximale de la zone saturée au dessus de la barrière d'étanchéité. En effet, pour limiter la charge sur l'étanchéité, la zone saturée qui est amenée à se former doit rester au sein de la couche drainante de manière à être évacuée le plus rapidement possible. L'épaisseur cette couche doit être choisie en conséquence [4,5].

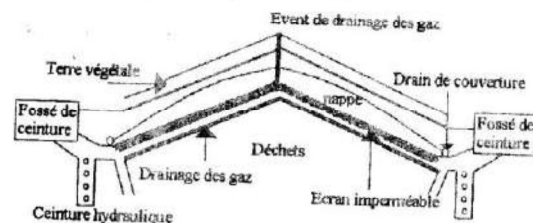


**Figure 1 :** Structure type d'une couverture de centre de stockage de déchets.

L'objet de ce travail est de compléter les aspects théoriques existant permettant de dimensionner les casiers de décharges. La démarche générale repose sur la connaissance du bilan hydrique, qui décrit les entrées et les sorties du système, et du fonctionnement hydraulique, qui décrit les mécanismes de son évacuation. Les équations développées s'appliquent à des matériaux homogènes dans lesquels les canalisations de drains, installés perpendiculairement à la plus grande pente, reposent sur un écran imperméable. L'écoulement de l'eau dans le milieu se fait suivant des lignes de

imperméable.

L'intégration spatiale de l'équation de bilan hydrique et de l'équation dynamique débouche sur un système d'équations différentielles comprenant des coefficients de forme de nappe que l'on calcule numériquement. L'intégration temporelle des équations différentielles utilise un numérique explicite, ce qui permet de calculer au pas de temps horaire des débits et des hauteurs de nappe maximales. Cette approche en régime transitoire est originale dans la mesure où la théorie est censée être appliquée à des climats où les apports pluviométriques sont irréguliers. En effet, la plupart des méthodes de conception sont fondées sur des approches en régime permanent [6,7,8]. Cette façon de procéder a été initialement développée en Europe où le régime pluviométrique est relativement stable.

## 2 EQUATIONS DU DRAINAGE DES SOLS EN PENTE

### 2.1 Fonctionnement hydraulique du système

Dans le système considéré, les canalisations de drains sont placées perpendiculairement à la ligne de la plus grande pente. Elles reposent sur un plancher imperméable de pente constante d'angle  $\theta$  au dessus duquel se forme une nappe perchée de hauteur  $h$ . Le matériau drainant est supposé saturé et homogène de conductivité hydraulique  $K$  et de porosité de drainage  $\mu$ . La nappe est notamment caractérisée par deux variables: sa hauteur maximale au dessus du plan des drains  $H$  et la hauteur de celle-ci au plan de flux nul  $H'$  (figure 2). Pour un rabattement suffisant de la nappe, cette hauteur s'annule et seul le schéma d'écoulement de la figure 3 s'applique. L'existence d'un plan de flux nul constitue les conditions aux limites amont et aval du système.

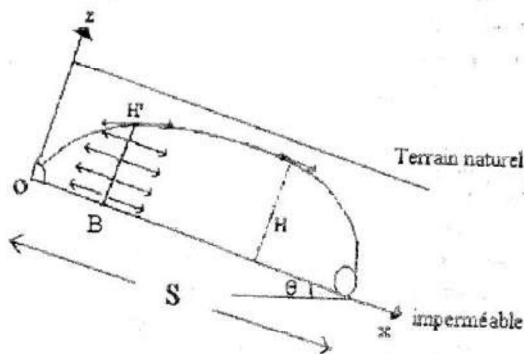


Figure 2 : Repère et système d'axes pour une nappe se formant dans un terrain en pente. Cas d'une nappe haute.

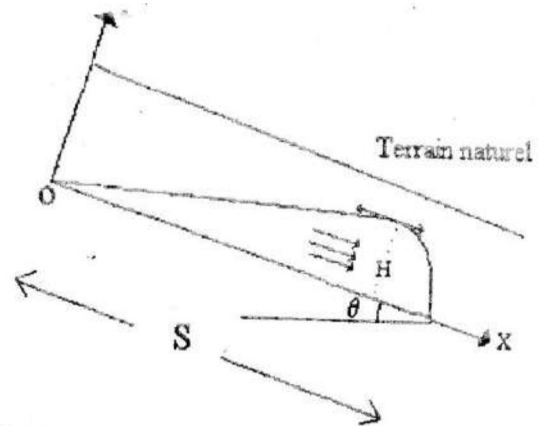


Figure 3 : Repère et système d'axes pour une nappe se formant dans un terrain en pente. Cas d'une nappe peu élevée.

### 2.2 Equations de base

La hauteur maximale dans les centres de stockage de déchets est calculée à partir de la résolution d'une équation de bilan hydrique, [9]

$$\frac{\partial q(x,t)}{\partial x \cos \theta} = R(t)(1 + s \frac{\partial h}{\partial x}) - \frac{\mu}{\cos \theta} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

où :

$x$  : variable d'espace; [m]

$t$  : variable de temps, [h]

$\mu$  : porosité de drainage [ $m^3 \cdot m^{-3}$ ]

$R$  : recharge nette; [ $m \cdot h^{-1}$ ]

$\theta$  : angle que fait le talus avec l'horizontale en degré.  
 $s = \tan \theta$

$h$  : hauteur de la nappe dans la zone saturée [m]

$q$  : débit spécifique par unité de longueur de drain, [ $m \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$ ]

et d'une équation dynamique traduisant la conservation de la quantité de mouvement, [10] :

$$\frac{q(x,t)}{\cos \theta} = -\left(K \frac{h^2}{2}\right)' + s h K \quad (2)$$

$K$  est la conductivité hydraulique de la couche drainante supposée saturée et homogène [ $m \cdot h^{-1}$ ].

Dans l'équation (2), il est notamment fait l'hypothèse d'un écoulement Darcien, c'est dire que la vitesse de l'écoulement selon l'axe ( $Ox$ ) est proportionnelle au gradient de potentiel de charge hydraulique. La combinaison de cette dernière avec l'équation (1) fournit l'équation de Boussinesq [11].

### 3 SOLUTIONS EN REGIME VARIABLE

L'intégration est réalisée en deux étapes à partir de la séparation des variables espace dans les équations. En posant

$$W(X, H) = h(x, t)/H(t)$$

Dans un premier temps, les équations (1) et (2) sont intégrées par rapport à la variable d'espace  $x$  ou de sa forme adimensionnelle  $X=x/S$ . Dans un deuxième temps, une intégration temporelle est réalisée (respect. &3.1 et &3.2).

#### 3.1 Intégration spatiale des équations

En suivant la démarche de Lesaffre et Zimmer [12], l'équation (1) est intégrée par deux fois et l'équation (2) est intégrée une seule fois par rapport à  $x$ . On aboutit ainsi à un système de deux équations différentielles où figurent deux inconnues: le débit au drain  $Q$  et la hauteur maximale de la nappe  $H$ , soit :

$$Q(t) = R(t) \cos \theta - \mu B(H) \frac{dH}{dt} \quad (3)$$

$$R(t) \left[ \frac{x_B^2 + (S - x_B)^2}{2} + sH'(2x_B - S) + sH \frac{S}{2} P(H) \right] - \frac{\mu}{\cos \theta} \frac{dH}{dt} \frac{S^2}{4} C(H) = KH^2 + sKH \frac{S}{2} P(H) \quad (4)$$

$s$  : Pente en %.

$S$  : Ecartement des drains (m).

$H$  : Hauteur maximale de la nappe (m).

$H'$  : Hauteur de la nappe au plan du flux nul (m).

où :

-  $P(H)$ ,  $B(H)$  et  $C(H)$  sont des coefficients de forme de la nappe qui ne dépendent que de la hauteur maximale  $H$  lorsque la pente est fixée. Leur expression est donnée par :

$$P(H) = 2 \int_0^1 W(X, H) \quad (5)$$

$$B(H) = \int_0^1 (W + H \frac{\partial W}{\partial H}) dX \quad (6)$$

$$C(H) = 4 \left[ \int_0^{x_B} X(W + H \frac{\partial W}{\partial H}) dX + \int_{x_B}^1 (1 - X_B)(W + H \frac{\partial W}{\partial H}) dX \right] \quad (7)$$

où :

-  $W$  : hauteur de nappe réduite

-  $x_B$  : abscisse du plan du flux nul réduite ; l'écartement des drains (m.m<sup>-1</sup>)

En posant :

$$J(H) = 4K \frac{H^2}{S^2} + 2sK \frac{H}{S} P(H) \quad (8)$$

$$g(H) = 2[X_B + (1 - X_B)^2] + 4s \left[ (2X_B - 1) \frac{H}{S} + \frac{P(H) H}{2 S} \right] \quad (9)$$

La combinaison des équations (3) et (4) fournit l'expression du débit au drain  $Q(t)$ , soit :

$$\frac{Q(t)}{\cos \theta} = [1 - A(H)g(H)]R(t) + A(H)J(H) \quad (10)$$

avec :

$$A(H) = B(H) / C(H)$$

Les termes  $J(H)$  et  $g(H)$  sont des fonctions intermédiaires dans lesquelles figurent la hauteur au plan de flux nul  $H'$  et son abscisse réduite  $X_B$ . Pour des pentes relativement élevées, leur expression se simplifie puisque le schéma d'écoulement est celui de la figure 3 ( $H'=0$  et  $X_B=0$ )

Les coefficients de forme de nappe sont calculés en supposant que le régime variable est une succession de régimes permanents, ce qui permet d'utiliser les résultats développés par certains auteurs dans le cas du régime permanent [9,13]. Des lois du type facteur - hauteur de nappe sont ensuite établies par intégration numérique [14]. Un exemple des résultats est présenté dans le tableau 1.

| H/S    | P      | B      | C      | g      |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.1753 | 1.5690 | 0.7821 | 0.9972 | 1.0672 |
| 0.0872 | 1.5634 | 0.7979 | 1.1666 | 1.1370 |
| 0.0756 | 1.5611 | 0.8060 | 1.2342 | 1.1712 |
| 0.0668 | 1.5583 | 0.8158 | 1.3121 | 1.2370 |
| 0.0551 | 1.5524 | 0.8356 | 1.4593 | 1.2905 |
| 0.0497 | 1.5484 | 0.8488 | 1.5577 | 1.3418 |
| 0.0454 | 1.5438 | 0.8632 | 1.6627 | 1.5765 |
| 0.0421 | 1.5396 | 0.8739 | 1.7397 | 1.4438 |
| 0.0351 | 1.5261 | 0.9043 | 1.9582 | 1.6909 |
| 0.0304 | 1.5115 | 0.9239 | 2.1018 | 1.9615 |
| 0.0202 | 1.4425 | 0.9026 | 2.0280 | 1.9686 |
| 0.0198 | 1.4381 | 0.8975 | 2.0049 | 1.9845 |
| 0.0188 | 1.3933 | 0.8403 | 1.8364 | 1.9981 |
| 0.0174 | 1.3774 | 0.8281 | 1.7703 | 2.0032 |
| 0.0161 | 1.3560 | 0.8088 | 1.6922 | 2.0016 |
| 0.0146 | 1.3461 | 0.8095 | 1.6377 | 2.0015 |
| 0.0144 | 1.3418 | 0.8056 | 1.6224 | 2.0015 |
| 0.0141 | 1.3375 | 0.8017 | 1.6074 | 2.0015 |
| 0.0139 | 1.3333 | 0.7980 | 1.5971 | 2.0030 |
| 0.0012 | 1.0528 | 0.5470 | 1.1072 | 2.0001 |

Tableaux 1 : Facteurs de forme de nappe  $P$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $A$ , la fonction  $g$  pour différentes valeurs de la hauteur maximale réduite  $H/S$  (respect. 4,5,6 et 9).

La pente est de 8%

### 3.2 Intégration temporelle des équations

La structure des équations (3), (4) et (9) est formellement identique à celle développée dans le cas des sols horizontaux par Lesaffre et Zimmer [12]. Les équations constituent l'extension du modèle de simulation du drainage SIDRA aux sols en pente. En reprenant le schéma numérique retenu pour ce modèle (Runge-Kutta d'ordre 4), des chroniques horaires de hauteurs de nappe maximales  $H(t)$  et de débits  $Q(t)$  sont générées. Les principales étapes de l'intégration temporelle des équations sont [15] :

- écriture des équations (3) et (4) sous la forme générale :

$$\frac{dH}{dt} = f(t, H) \quad (11)$$

- calcul de la valeur approchée de la variation de  $H$  pendant le pas de temps  $\Delta t$  (Runge Kutta) .
- déduction de la hauteur maximale  $H$  à l'instant  $t$  ;
- déduction de la valeur du débit  $Q$  à partir de l'équation (9).

La validation de la modélisation hydraulique proposée a été réalisée par comparaison à des mesures de terrain sur des parcelles agricoles de superficie d'un hectare environ [14]. Dans le cadre des centres de stockage de déchets, il suffit de confronter les hauteurs maximales obtenues avec celles d'autres auteurs (paragraphe suivant).

### 4 APPLICATION AU CALCUL DES ECARTEMENTS

La démarche consiste à déterminer un écartement de drains correspondant à un rabattement la hauteur maximale de la nappe de 20 cm pendant une durée de 24 heures [16]. Dans le cas des centres de stockage des déchets, les caractéristiques hydrodynamiques retenues pour le matériau drainant sont [17]:

$$K=1.10^{-2} \text{ m.s}^{-1} \quad \text{et} \quad \mu=30\%.$$

Les simulations sont effectuées en considérant des pentes 0, 8, 10, 14, 30 et 45%, ce qui permet de calculer à chaque fois un écartement  $S$  qui vérifie le critère de rabattement de retenu.

Pour étudier l'influence de la pente, l'écartement est rapporté à l'écartement équivalent horizontal  $S^*$ . La valeur du rapport  $S/S^*$  est portée sur l'axe des ordonnées, la pente du terrain qui lui correspond est portée sur l'axe des abscisses (figure4).

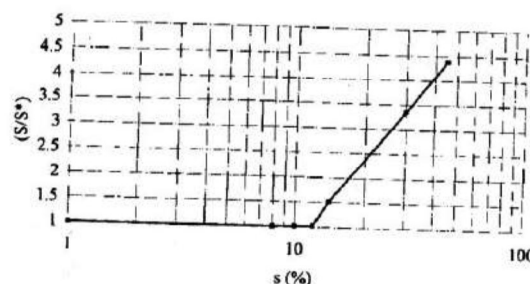


Figure 4 : Rapport de l'écartement d'un sol en pente  $S$  à l'écartement d'un sol horizontal  $S^*$  en fonction de la pente  $s(\%)$ .

Le graphique de cette figure fait apparaître deux branches pour lesquelles l'écartement drains est soit identique à celui des sols horizontaux, c'est à dire peu influencé par la pente, soit fortement influencé par la pente. Ainsi, l'analyse du graphique montre que l'écartement peut être augmenté lorsque la pente augmente. Par rapport à un système horizontal, la charge hydraulique à l'équilibre est moins importante du fait de l'influence de la pente.

En terme de conception, ce résultat suggère une diminution du nombre de files de drains à prévoir et une réduction en conséquence du coût de l'ouvrage.

Pour confirmer cette conclusion, les points calculés en régime variable de tarissement ont été comparés à ceux présentés par Lesaffre [10] en régime permanent (figure 5). Ce dernier exprime le rapport des écartements  $S/S^*$  en fonction d'un paramètre adimensionnel  $\sigma$  qui dépend de la recharge nette supposée constante, de la pente et de la conductivité hydraulique du milieu. La corrélation entre les deux méthodes est relativement satisfaisante et laisse entrevoir l'utilisation du modèle à des fins de dimensionnement.

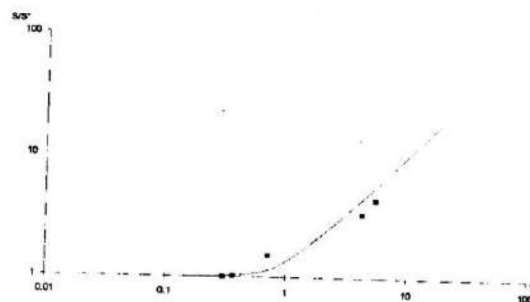


Figure 5 : Rapport de l'écartement d'un sol en pente  $S$  à l'écartement d'un sol horizontal  $S^*$  en fonction d'un indice de pente  $\sigma = s(1-R/K)/2R/K$ . En continu courbe de Lesaffre [10], en symbole points calculés en régime variable.

## 5 CONCLUSION

La résolution des équations de drainage agricole a permis d'améliorer la compréhension de la pente dans le fonctionnement des centres de stockage de déchets.

La démarche suivie montre l'intérêt de prévoir des pentes de casiers de décharges relativement fortes. Dans ce cas, l'évacuation des eaux nécessite des drains plus espacés ou, ce qui est équivalent, conduit à envisager des hauteurs de couche drainante peu élevées.

Dans le cadre du régime variable, il pourrait être intéressant de mettre en place un protocole expérimental de manière à valider les expressions analytiques obtenues.

La précision des solutions obtenues pourrait être améliorée en introduisant une loi d'écoulement non Darcien, type Izbach [17]. Cela nécessite cependant des développements théoriques supplémentaires et conduirait à des solutions peu maniables.

La problématique de conception de couvertures se heurte encore à de nombreux problèmes que sont par exemple l'amplitude des tassements des déchets, le risque de dessiccation des argiles, la traversée des horizons étanches par les ouvrages annexes, la durabilité des géosynthétiques mis en place face aux sollicitations de service [4]. Ces aspects représentent autant de pistes de recherche, pour certaines déjà entamées.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

- [1] J-O de la République Algérienne Démocratique et Populaire - 1983 - Loi 8303 du relative à la protection de l'environnement, 5 février 1983
- [2] J-O de la République Algérienne Démocratique et Populaire - 1987 - Décret 87182 du 10 Juillet 1987.
- [3] J-O de la République Algérienne Démocratique et Populaire - 1990 - Décret 8379 du 27 février 1990.
- [4] Cemagref - "Drainage des centres de stockage de déchets. Synthèse des connaissances relatives à la conception, à la réalisation et à la gestion des systèmes de drainage de fond et de couverture". Rapport d'étude Cemagref - ADEME. pp202, Confidentiel. 1994.
- [5] P. Foltz, - "Conception et fonctionnement hydraulique des Centres de Stockage des Déchets". Diplôme d'ingénieur des techniques de l'équipement rural. ENGEES - Cemagref. 90P, 1995.
- [6] R, L, Peyton, P, R. Schroeder - "Field Verification of HELP model for landfills". Journal of Environment Engineering ASCE, 114(2). pp247-269, 1988.
- [7] B, M. Mc Enroe, - "Steady drainage of landfills covers and bottom liners". J Environment Eng. ASCE, 115(6). p 1114-1122, 1989.
- [8] B, M. Mc Enroe, - "Maximum saturated depth over a landfill liner". J Environment Eng. ASCE, 114(2). p 247-269, 1993.
- [9] R, A, Wooding, T, J. Chapman - "Groundwater flow over a sloping impervious layer, 1, Application of the Dupuit-Forchheimer assumption", J Geophys. Res. 71(12), 2895-2902, 1966.
- [10] B. Lesaffre, - "Analytical formulae for traverse drainage of sloping lands with constant rainfall". Irrig. Drain. Syst. 1, 105-121, 1987.
- [11] J. Boussinesq, - "Essai sur la théorie des eaux courantes". Mémoire présenté par divers savants à l'académie des sciences de l'institut de France. 23, 1 - 680, 1877.
- [12] B. Lesaffre, D. Zimmer, - "Subsurface drainage peak flows in shallow soil". J Irrig. Dr. Eng. 114, 3, p 387-405, 1987.
- [13] G, D. Towner, - "Drainage of ground-water resting on a sloping bed with uniform rainfall". Water Res. Research 11 (1), 144 - 147, 1975.
- [14] T. Hartani, - "Fonctionnement et modélisation du drainage souterrain dans les sols en pente". Thèse Ecole Centrale Paris - Cemagref, 206p, 1997.
- [15] B. Lesaffre, - "Fonctionnement hydro-logique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés". Thèse Université Paris U, 334p, 1989.
- [16] G. Guyon, - "Détermination de l'écartement optimal des drains et du débit caractéristique correspondant". CTGREF, n°1, 8 p, 1973.
- [17] Ch. Bordier, - "Drainage des Centres de Stockage des Déchets. Aspects hydrauliques et colmatage du système drainant". Diplôme d'ingénieur ENGEES. Cemagref. 145p, 1994.