

**Bonnefon Romain  
Vandenbroucke Sophie  
Vigier Anne-Gaëlle**

**2<sup>ème</sup> année ENSHMG  
Option GHO**

(Excellent travail !  
Beaucoup d' initiatives, et des idées originales.  
Une discussion très pertinente.  
Vraiment, je vous félicite.) (20/20)

*Hydraulique souterraine :*

# **Application sur Hydronap**

**Année 2001/2002**

**A l'attention de R. Woumeni**

# Sommaire

(Bien)

<b>Introduction</b>	<b>p3</b>
<b>Etude de l'écoulement sous un canal</b>	<b>p3</b>
▪ <b>Problème.</b>	<b>p3</b>
▪ <b>Préliminaires théoriques.</b>	<b>p3</b>
▪ <b>Utilisation du logiciel de calculs Hydronap.</b>	<b>p5</b>
▪ <b>Interprétation des résultats.</b>	<b>p8</b>
▪ <b>Lien avec une méthode graphique : la méthode de Prasil.</b>	<b>p9</b>
<b>Etude de l'écoulement à travers une digue en terre.</b>	<b>p10</b>
▪ <b>Généralités.</b>	<b>p10</b>
▪ <b>Données du problème.</b>	<b>p10</b>
▪ <b>Perméabilité uniforme.</b>	<b>p11</b>
▪ <b>Perméabilité non-uniforme</b>	<b>p11</b>
▪ <b>Installation d'un drain</b>	<b>p12</b>
<b>Conclusion</b>	<b>p13</b>

# Introduction

Dans le cadre du cours d'hydraulique souterraine, il nous est demandé d'effectuer une étude d'application du logiciel de calcul d'écoulements et de transport dans les sols **HYDRONAP**. Ce code de modélisation s'appuie sur la méthode des éléments(**différences**) finis. En effet, on crée un maillage carré représentant le domaine souterrain étudié auquel on affecte des conditions aux limites. On observe graphiquement la réponse à une sollicitation donnée grâce au tracé sur le modèle des lignes piézométriques. Pour cela, il faut rentrer les données dans quatre fichiers différents:

- **Limites.dat** : permet de rentrer les coordonnées du profil étudié et d'indiquer la nature de la condition limite appliquée sur chaque segment.
- **Forces.dat** : permet d'indiquer la valeur de la sollicitation en chaque point du maillage (charge ou débit)
- **Modele.dat** : permet de définir le cadre de l'étude (régime transitoire ou permanent, type de nappe,...)
- **Parame.dat** : permet de choisir les caractéristiques des itérations (nombre, précision...), du maillage (nombre de sous domaines, pas du maillage...) et du terrain (perméabilité, porosité, ...)

Une fois ces fichiers actualisés, il est possible de lancer les calculs et de modifier des paramètres pour en mesurer l'influence.

Selon les cas, il est alors possible d'obtenir, en plus du tracé des lignes piézométriques, des résultats en charge, en vitesse ou en concentration. Ces valeurs sont stockées dans les fichiers : Charge.dat, Fluxes.dat, Qualit.dat. Ces données sont ensuite exploitées afin de calculer des débits de fuite, des rabattements de nappes, des propagations de polluants...

Nous avons décidé d'étudier dans un premier temps l'influence sur le débit de fuite de la forme d'un **canal de section constante**. Puis nous présenterons les résultats de l'étude des **écoulements dans une digue**. Enfin, nous donnerons nos conclusions et nos impressions sur le travail effectué lors de cette étude. (**Ok**)

## Etude de l'écoulement sous un canal

### ▪ **Problème.**

Dans l'optique d'un aménagement du lit d'une rivière, il nous est apparu intéressant d'étudier **l'influence de la forme de la section** du canal sur les écoulements qui sont générés dans les sols.

En effet, les concepteurs en génie civil sont amenés à considérer une certaine plage de débit qui passera dans le canal, suivant son utilisation. Or, la vitesse d'écoulement dans le canal est elle-aussi limitée, notamment pour éviter des problèmes d'érosion. Ainsi, les concepteurs peuvent déterminer la surface de la section du canal, prenant en compte toutes ces données. Mais il reste encore à déterminer la forme de cette section.

Pour cela, nous allons mettre en évidence l'influence de la forme de la section sur les écoulements afin d'en tirer des conclusions utiles quant à sa détermination. (Ok)

### ▪ **Préliminaires théoriques.**

Henri Darcy a montré, par l'intermédiaire d'expériences, que le débit spécifique transitant dans une colonne de sable de section  $S$  était proportionnel à la perte de charge  $\Delta H$  et inversement proportionnel à la longueur de filtration  $L$ . La **loi de Darcy** s'écrit alors :

$$q = Q / S = K * \Delta H / L$$

faisant intervenir un coefficient  $K$  appelé perméabilité et ne dépendant que des propriétés du fluide et du sol.

Cette loi n'est utilisable que **localement** dans notre cas d'étude dans la mesure où les lignes de courant qui s'établissent sous le canal sont de longueur variable. Notre but est donc d'établir une forme globale de cette loi. (Bonne idée)

Si on introduit un coefficient de débit  $\alpha$  qui traduit à l'échelle globale l'influence locale de la longueur  $L$ , on obtient alors une équation de la forme :

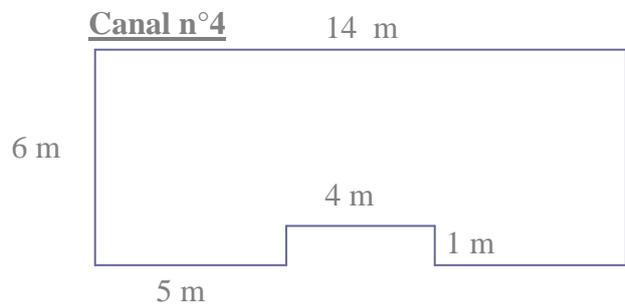
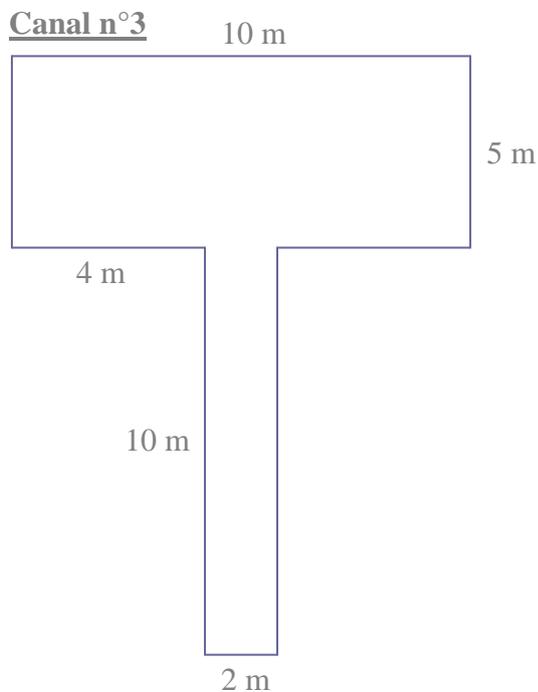
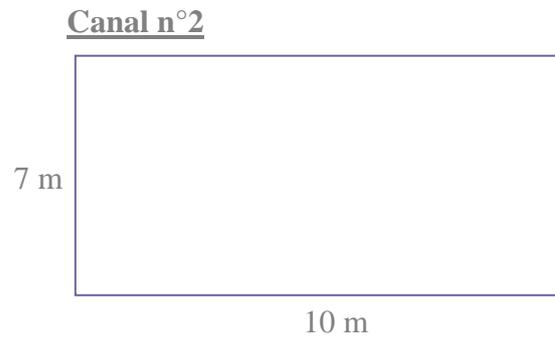
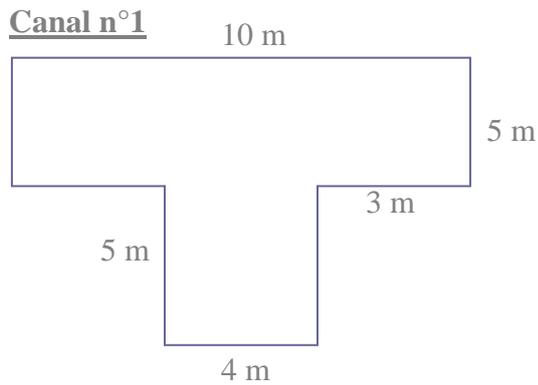
$$Q = \alpha (S * K * \Delta H) \quad (\text{Bien})$$

L'objet de l'étude est donc de déterminer ce coefficient  $\alpha$  pour quelques formes de section à partir de résultats numériques obtenus avec Hydronap. (Ok)

- **Utilisation du logiciel de calculs Hydronap.**

*Remarques générales.*

Au départ, on a utilisé l'application « canal » déjà pré-définie. On a pris comme base la section du canal de cette application, dont la surface est **70 m<sup>2</sup>**. Puis on a déterminé des formes de section différentes, tout en gardant la même surface. (Ok)



(Très bien)

On a alors étudié le débit de fuite  $Q$  pour chaque canal créé, en faisant varier la charge  $\Delta H$ .

### Changements effectués.

\*On a tout d'abord enregistré les points du maillage correspondant à la géométrie du canal dans le fichier limite.dat.

\*On a gardé pour tous nos calculs la même perméabilité  $K=0.05$  cm/s. (Ok)

\*Puis on a déterminé les conditions aux limites. Il existe deux types de condition :

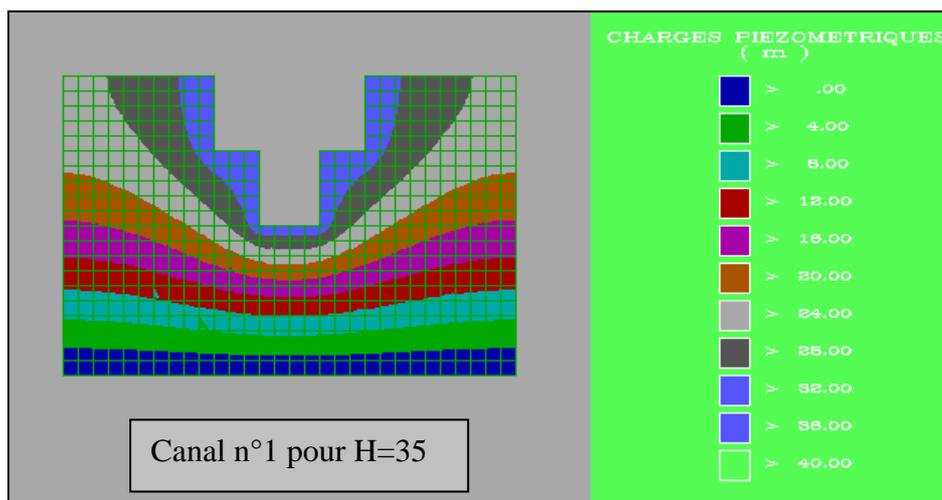
- on impose un flux latéral
- ou on impose une charge.

On a choisi d'imposer un débit nul sur les bords verticaux et la partie supérieure de la zone de perméabilité. Nous nous limitons ainsi à l'espace influencé par le canal. De plus, la charge est maintenue nulle sur la partie inférieure de la zone d'étude pour permettre à l'écoulement de s'évacuer, sans fixer le débit (Très bien, sinon vous auriez eu des problèmes d'interprétation). Sur le périmètre mouillé du canal, la charge est constante et sa valeur n'est pas fixée (?).

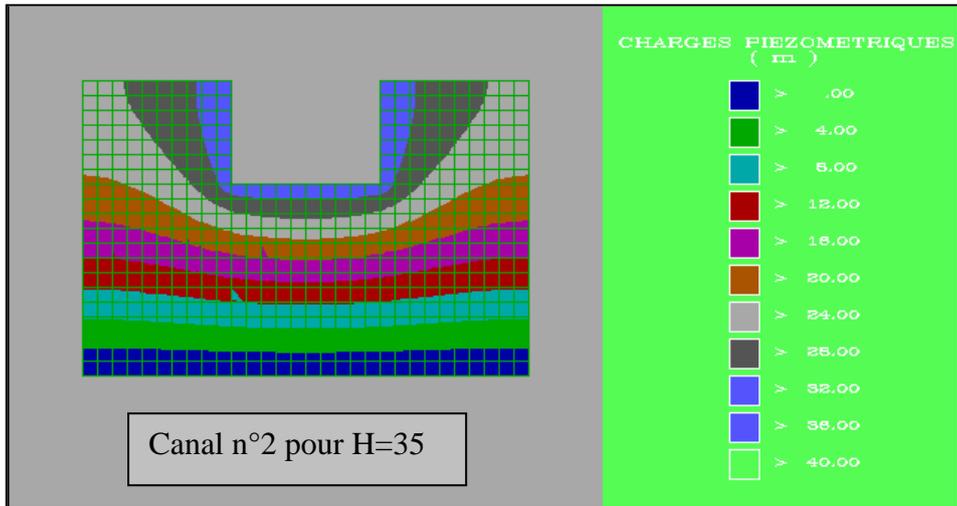
Tous ces changements s'effectuent dans les fichiers limite.dat et forces.dat.

### Exploitation des résultats.

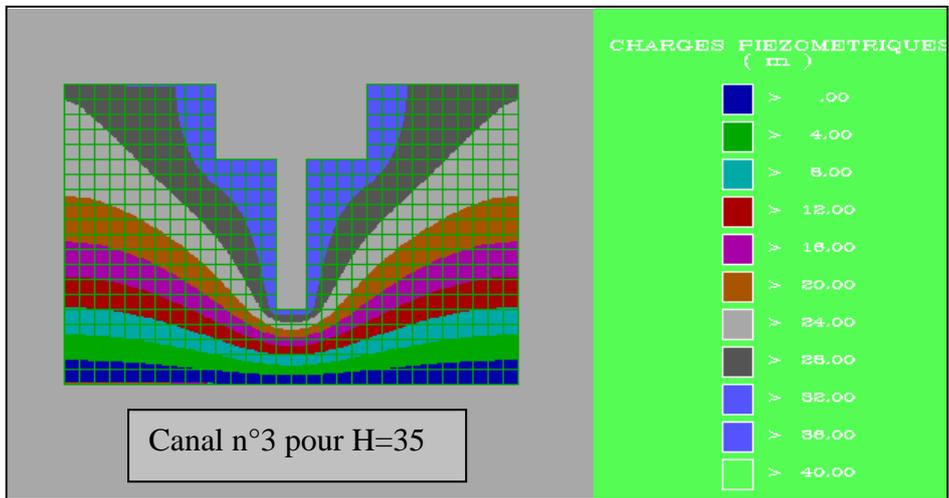
On exécute le programme. Un post-processeur graphique nous permet de visualiser les résultats sous forme de profils piézométriques. On obtient ainsi les profils suivants, pour une sollicitation de 35 m de charge au niveau du canal (Ok) :



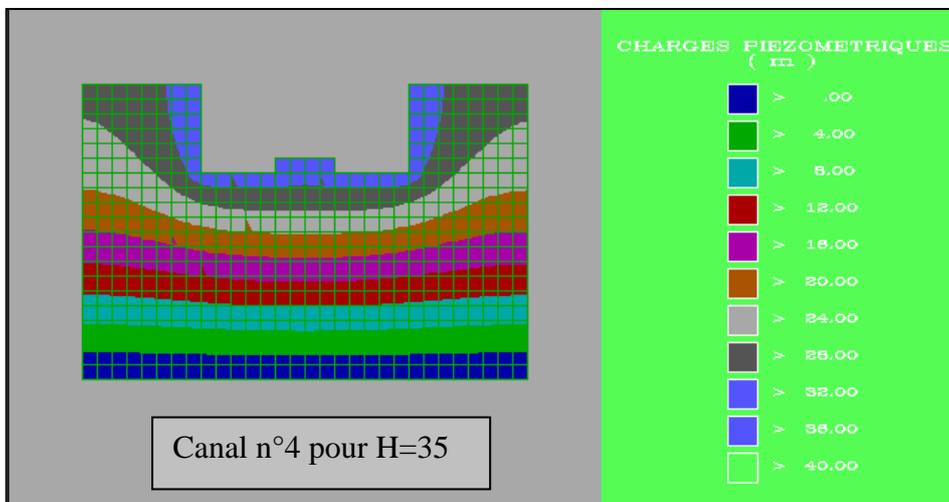
(Ok)



(Très bien)



(Ok)



(Bien)

Pour estimer le débit de fuite, c'est-à-dire le débit à travers la partie inférieure de la zone de perméabilité, on récupère dans le fichier fluxes.dat les valeurs des vitesses sur cette ligne. Etant donné que l'on a discrétisé le problème, le débit par unité de longueur du canal est :

$$Q_{lin} = \int V * dl = \sum V_i * dli$$

(Ok)

Où  $V_i$  correspond à la valeur moyenne des vitesses à deux nœuds successifs.

Le pas de notre maillage étant de 1 m,  $dli = 1$ .

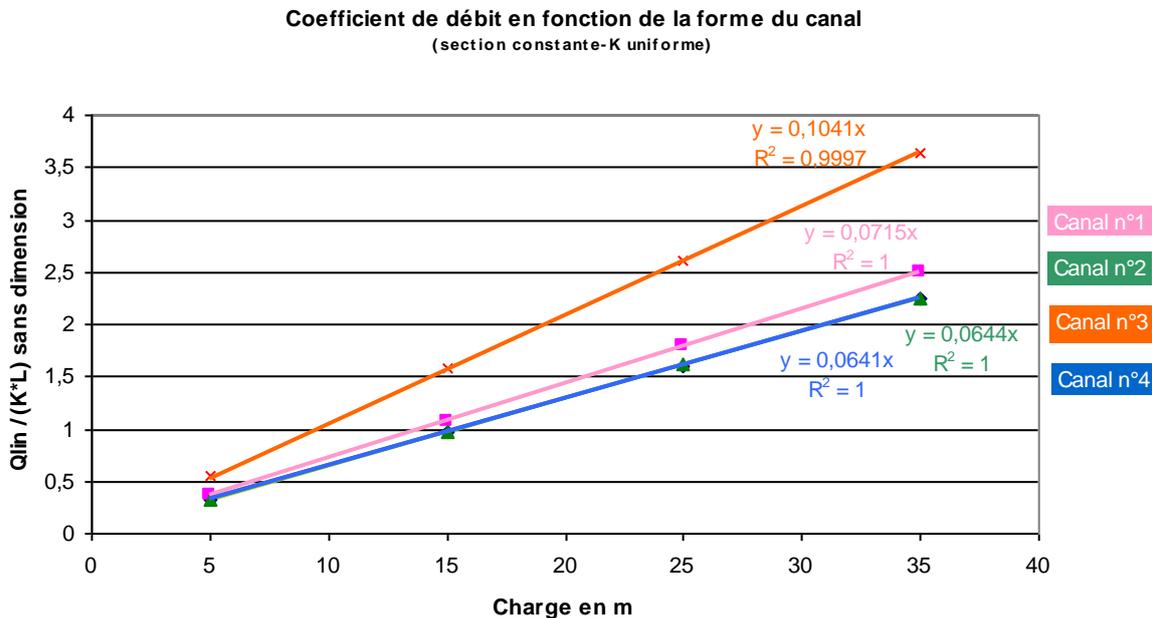
On réitère l'opération pour chaque forme de canal et en faisant varier  $\Delta H$ . (Ok)

▪ **Interprétation des résultats.**

D'après l'étude théorique préliminaire, on peut estimer que :

$$Q_{lin} = \alpha (L * K * \Delta H) \text{ (Ok)}$$

On trace alors  $Q_{lin} / (L * K) = f(\Delta H)$ , pour chaque section. On obtient ainsi le graphique suivant :  
(Très Bien)



On vérifie bien que le débit de fuite pour une longueur unitaire de canal est **proportionnel à la charge** que l'on impose (Bien). En effet, les quatre courbes de tendance sont linéaires avec un coefficient de corrélation la plupart du temps parfait ; ce qui montre également la bonne précision de ce logiciel de calcul.

D'autre part, la pente de chacune des droites correspond à notre **coefficient  $\alpha$**  (Bien) que l'on a introduit pour prendre en compte la longueur d'infiltration. Il apparaît clairement que ce coefficient dépend de la forme de la section puisqu'il varie de  $0,0641 \text{ m}^{-1}$  à  $0,1041 \text{ m}^{-1}$

dans nos différents cas (**C' est clair**) . On retrouve ainsi l'idée intuitive selon laquelle la forme de la section joue un rôle sur la longueur d'infiltration et par conséquent le débit (**Oui**). Ceci est en accord avec le fait que la longueur d'infiltration n'est autre que la longueur d'une ligne de courant (**moyenne**), qui elle-même est directement liée à la forme de la section.

Le coefficient  $\alpha$  est le plus petit pour la section rectangulaire. Par contre, il est le plus important pour le canal qui est profond. Ainsi, puisque l'on cherche à obtenir un débit de fuite le moins important possible pour une surface de section donnée, il apparaît plus intéressant d'adopter une **section rectangulaire peu profonde**. (**Ok**)

Néanmoins, ce n'est pas le cas dans la pratique. La plupart des canaux ont une section trapézoïdale afin (**n' est ce pas simplement parcequ' il vaut mieux réaliser un talus qu' une paroi verticale ?**) .

▪ **Lien avec une méthode graphique : la méthode de Prasil.** (**Ok**)

Cette méthode permet d'estimer le débit linéique à :

$$Q = n/m K \Delta H$$

où n est le nombre de tubes de courant,  
et m le nombre de tranches équipotentiellles.

Dans la pratique, cette méthode consiste à tracer des lignes de courant à partir des lignes équipotentiellles (ou inversement) qui leur sont orthogonales. On doit avoir des mailles approximativement carrées. On peut alors déterminer le rapport n/m et par conséquent, une estimation du débit de fuite. (**Ok**)

Or, si l'on identifie cette expression du débit à notre formule théorique, on obtient :

$$n/m = \alpha * L \text{ (Très Bien)}$$

En appliquant cette formule aux différents cas étudiés précédemment, on obtient :

Canal	$\alpha$	L	n/m	m	n estimé
1	0.0715	30	2.145	9	18
2	0.0644	30	1.932	9	18
3	0.1041	30	3.123	9	27
4	0.0641	30	1.923	9	18

(**Très Bien**)

En effet, les résultats graphiques obtenus avec le logiciel Hydronap permettent de déterminer le nombre de tranches équipotentiellles m. Or, pour chaque cas, on connaît le coefficient  $\alpha$ . On obtient donc une estimation du nombre de lignes de courant.

Si l'on applique la méthode de Prasil, on trouve un résultat similaire pour le nombre de tubes de courant. (**Il fallait les donner afin que l' on puisse mieux juger de la comparaison**)

Ainsi, il y a **cohérence** entre les résultats numériques (valeurs de :  $V \rightarrow Q \rightarrow \alpha$ ) obtenus avec Hydronap et la méthode graphique de Prasil. (**Ok**)

## Etude de l'écoulement à travers une digue en terre.

### ▪ Généralités.

On souhaite étudier maintenant une **digue faite d'enrochements**, qui est le siège d'un écoulement de filtration. Cette fois-ci, l'écoulement se fait à travers l'ouvrage en lui-même.

On a choisi de considérer un barrage en terre sur une **fondation imperméable**. D'un côté, il y a un réservoir plein avec une certaine charge ; de l'autre côté, la digue reste à l'air libre. (Ok)

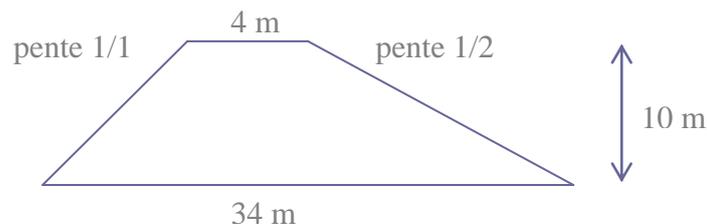
On cherche à étudier l'influence que peut avoir l'ajout d'un **drain** sous la digue ou la mise en place d'un **filtre de pied** sur le débit de fuite, le but étant de limiter ce dernier. (Ok)

Les conséquences d'un écoulement de filtration non contrôlé peuvent être importantes, comme par exemple l'existence de sous-pressions (**plutôt mentionner le risque d'affouillement du parement aval**) qui pourraient endommager la digue.

### ▪ Données du problème.

*Géométrie de la digue.*

On a créé un contour de forme trapézoïdale pour modéliser une digue, avec des pentes différentes sur chaque berge. Pour cela, on a enregistré une série de points de maillage définissant ce contour dans le fichier limite.dat. La géométrie est alors : (Très bien)



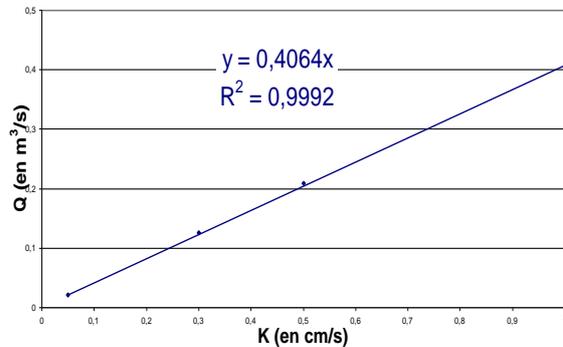
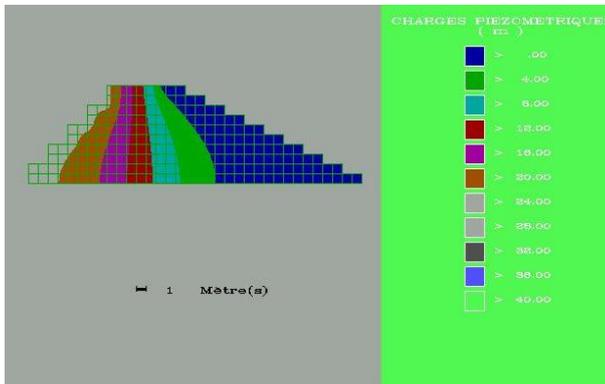
*Conditions aux limites.*

On a procédé de la même manière que pour le canal. On a modifié les fichiers limites.dat et forces.dat. Afin de modéliser le caractère imperméable de la fondation de la digue, on a imposé un débit nul sur sa partie inférieure (Ok). On a également considéré le débit nul sur la partie supérieure : en effet, il semble réaliste qu'il n'y ait pas de fuites sur cette face. Sur les pentes, on a imposé un chargement : variable pour la berge du réservoir et nul pour la berge à l'air libre (**Sur cette berge, il faut considérer que la pression est nulle, et pas la charge**).

- **Perméabilité uniforme.**

Dans cette première partie d'étude, le terrain est homogène, on fait varier la valeur de la perméabilité K et on charge la partie gauche de la digue à 25m. On trace le débit de fuite Q sur le parement aval (même méthode de calcul que pour le canal) en fonction de K .

(Très Bien)



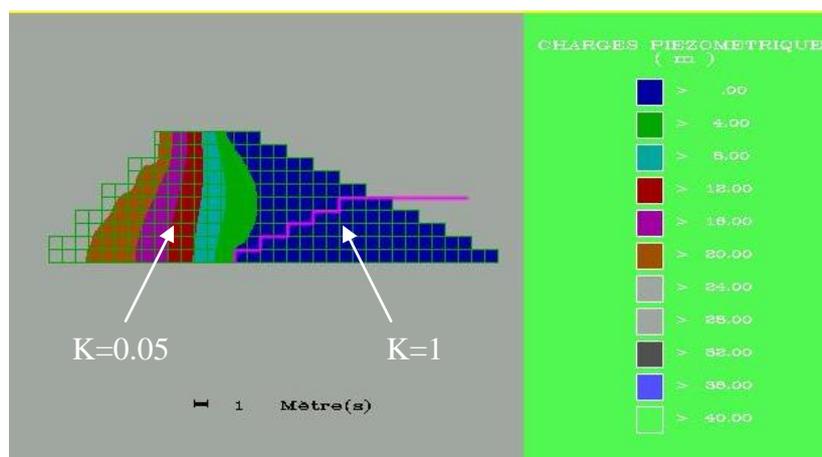
(Bien)

On observe la diminution de la charge, due à l'infiltration au travers de la digue. De plus, on vérifie bien la linéarité de la loi de Darcy  $Q=f(K)$ . (Ok)

Cet essai servira de référence pour le reste de l'étude. (Ok)

- **Perméabilité non-uniforme**

On rend le terrain hétérogène par l'introduction d'une nouvelle zone de perméabilité plus grande. Le but est de modéliser l'influence d'un **filtre de pied**(Ok). Le nombre de couleurs attribuées aux tranches piézométriques étant limité, nous avons consciemment augmenté la taille du filtre pour que son influence soit visible graphiquement.

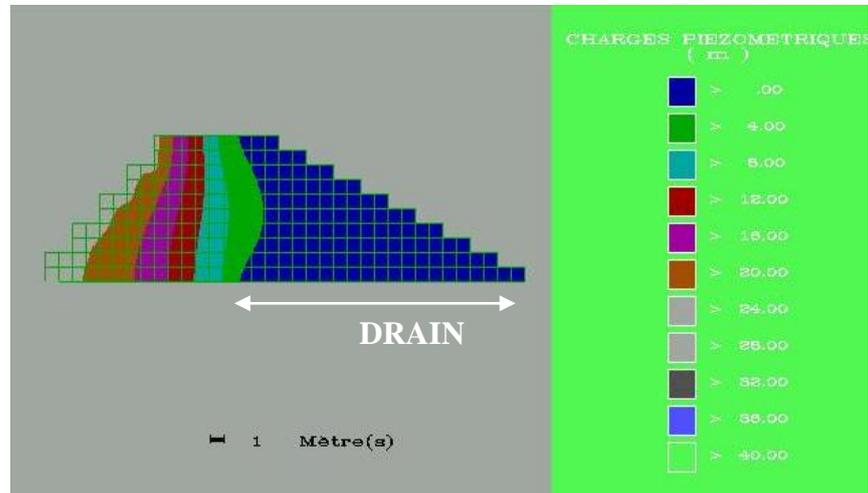


(Très Bien)

Il apparaît que les lignes de courant s'orientent vers le filtre. Il « capture » donc une partie des eaux d'infiltration, limitant ainsi le débit de fuite. Ceci illustre l'intérêt d'installer un filtre à la base du parement aval de la digue. (Oui)

- **Installation d'un drain**

Une autre solution aux problèmes d'infiltration non-contrôlée est l'installation d'un drain sur la partie inférieure droite de la digue. (Oui)

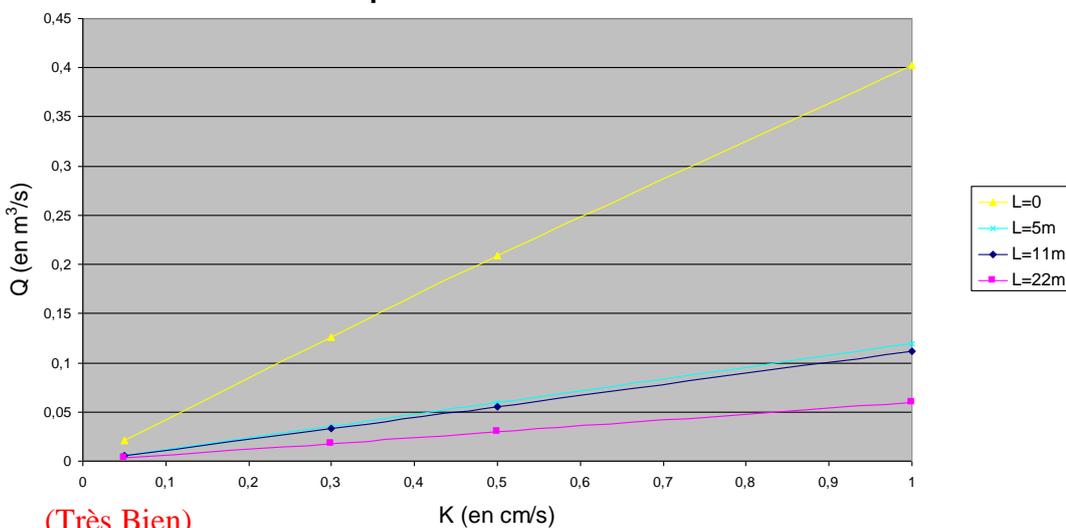


(Très bien, mais il faut préciser quel débit de drainage est imposé.)

Comme pour le filtre de pied, l'installation d'un drain dévie les lignes de courant. Il nous est difficile de comparer quantitativement (en évaluant les débits sortants) les deux méthodes puisque le filtre de pied a été sur-dimensionné. D'un point de vue technologique, il paraît avantageux d'installer un drain s'il est utile de collecter une partie des eaux infiltrées. De plus, il est moins dépendant des propriétés du sol (Ok).

D'autre part, nous avons essayé de comparer l'efficacité de drains de longueurs différentes. Bien qu'en pratique les drains les plus longs ne sont pas forcément les plus rentables, les calculs sur Hydrnap montrent qu'ils diminuent le débit de fuite de façon plus conséquente. (Ok)

**Comparaison des débits de fuite**



(Très Bien)

## Conclusion

D'une manière générale, Hydronap donne une bonne modélisation des écoulements souterrains. En effet, nous avons pu constater la cohérence des résultats obtenus avec la théorie exposée en cours d'hydraulique souterraine, mais aussi avec les méthodes graphiques abordées. (Ok)

Lors de notre étude, nous avons rencontré des difficultés liées à la conception des applications :

- le logiciel ne permet pas l'inexistence de lignes de courant dans une zone du domaine d'étude, d'où l'impossibilité de matérialiser la ligne de saturation dans la digue. (Exact, j' y travaillerai si j' ai un peu de temps.)
- le maillage en carrés n'est pas toujours des plus adéquat (Oui), notamment pour une interface inclinée.
- on regrette un peu que le logiciel ne permette pas de visualiser les lignes de courant (Oui, j' y pense également), qui facilitent l'interprétation de l'écoulement.

Malgré cela, nous avons pu découvrir les capacités d'exploitation du logiciel, sans se cantonner à regarder l'influence de paramètres (Oui, il y a vraiment beaucoup d' initiatives, et je vous félicite). C'est pourquoi nous avons pu nous lancer dans des applications concrètes, nécessitant parfois un remaniement plus profond des applications existantes.