

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

JR

CALCUL DE L'ESPACEMENT DE DRAINS DANS UNE NAPPE PHRÉATIQUE PEU ÉPAISSE

B. R. G. M.
27. JUIN 1985
BIBLIOTHEQUE



Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 094 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

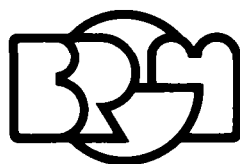
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

CALCUL DE L'ESPACEMENT DE DRAINS DANS UNE NAPPE PHRÉATIQUE PEU ÉPAISSE

par

R. DEGALLIER



Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 64.34.34

Rapport du B.R.G.M.

85 SGN 094 EAU

Mars 1985

SOMMAIRE

INTRODUCTION

<u>1ère partie</u> : Détermination des paramètres hydrodynamiques d'une nappe phréatique peu épaisse	3
- La méthode	4
- Exemple d'application	6
<u>2ème partie</u> : Calcul de l'espacement de drains destinés à écrêter des remontées intempestives d'une nappe indésirable	11
- Recharge à taux constant	12
- Régime permanent	12
- Régime permanent de durée limitée	14
- Régime transitoire après recharge brusque	14
- Recharge brusque sur parcelle rectangulaire	15
- Exemple d'application	16
CONCLUSION	18
<u>Annexe</u> : Mise en oeuvre des calculs à la calculatrice de poche TI 59	23

RESUME

Le problème difficile de la détermination des paramètres d'écoulement dans des nappes phréatiques peu épaisses est résolu par l'emploi de formules classiques dans le domaine de la conduction thermique, appliquées tout d'abord à interpréter des fluctuations de niveau causées par la mise en eau de parcelles de dimensions aussi grandes que possible, puis à utiliser ces paramètres dans le calcul de l'espacement de drains de façon que la nappe ne puisse pas remonter au-dessus d'une cote donnée, par exemple la profondeur des racines, pendant un régime de recharge donné.

La méthode impose que l'on dispose d'eau en quantité suffisante pour créer, ou recharger, une nappe à faible profondeur et que des mesures des fluctuations de niveau de cette nappe soient faites.

La méthode s'affranchit par contre des inconvénients suivants :

- obligation de disposer de puits de pompage ou d'injection,
- inexistence d'une nappe avant travaux,
- hétérogénéité du sol.

INTRODUCTION

Les formules classiques de calcul d'écartement de drains peuvent conduire à sur-dimensionner très considérablement les réseaux de drainage.

Par exemple, il a été montré que lors du lessivage d'un sol salé au moyen de doses répétées 3 à 4 fois plus fortes que lors d'une irrigation en période de pointe, un réseau de drainage, calculé selon la formule de HOOGHOUTT, n'avait pas fonctionné comme il aurait dû, mais que la plus grande partie de l'eau avait été évacuée naturellement par la nappe.

Le périmètre d'essai était une ferme pilote de plus de 20 ha dans laquelle les paramètres de la formule de HOOGHOUTT avaient été mesurés en 52 points. Afin de tester la validité de cette formule, les espacements calculés ont été modulés et augmentés du simple au décuple de la valeur calculée.

Malgré cela, les plus grands espacements, même sur les sols les moins perméables, se sont révélés encore très sous-estimés.

Heureusement, le niveau de la nappe dans les parcelles a été mesuré de façon détaillée et ses fluctuations ont pu être interprétées quantitativement. Les paramètres obtenus indiquent des perméabilités de un ou deux ordres de grandeur supérieurs à ceux mesurés par les méthodes du double anneau et de l'essai Porchet.

Une nouvelle méthode de mesure des paramètres commandant l'espacement des drains est présentée ci-dessous, ainsi que différentes méthodes de précision croissante pour la détermination de cet espacement.

PREMIERE PARTIE

DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES D'UNE NAPPE PHREATIQUE PEU EPAISSE

Dans les nappes peu épaisses et peu profondes, la détermination des paramètres hydrodynamiques par la technique des essais de pompage est souvent difficile ou critiquable lorsque :

- on ne dispose pas de puits de pompage mais seulement de piézomètres à faible débit
- la nappe est complètement dénoyée dans le puits de pompage et aucun piézomètre n'est disponible
- la perméabilité de la nappe provient essentiellement de quelques couches minces et discontinues que des ouvrages de captage verticaux ont toutes chances de manquer ou de colmater
- les paramètres que l'on pourrait obtenir par pompage ou injection ne sont représentatifs que du point où l'opération est faite.

De telles nappes ne peuvent généralement pas être captées par puits mais seulement par drains, que ceux-ci fonctionnent activement lorsqu'on y pompe une ressource, ou passivement lorsqu'on veut limiter toute remontée d'une eau indésirable.

Dans ces deux cas, il est utile de connaître les paramètres hydrodynamiques de la nappe, que ce soit pour en calculer le débit dans un dispositif de captage donné ou pour calculer l'espacement optimal d'un système de drainage destiné à maintenir la nappe en dessous d'une cote donnée.

La technique proposée est applicable si l'on dispose d'eau en grande quantité, par exemple à proximité d'un cours d'eau en crue, ou dans un périmètre agricole irrigué.

LA METHODE

La méthode consiste à mettre en eau une parcelle rectangulaire, à mesurer les fluctuations qui peuvent être induites dans la nappe et à interpréter quantitativement ces fluctuations.

La fonction mathématique utilisée est la formule classique mise au point par les thermiciens pour calculer la température dans un milieu homogène d'extension infinie ayant reçu une quantité de chaleur sur un rectangle (CARLSLAW, JAEGER, 1959, p. 56) . Transposée au domaine de l'hydraulique, cette formule est la suivante :

$$\begin{aligned}
 h(x, y, t,) &= \frac{W_i}{4S} \left[\operatorname{erf} \frac{a_j - x}{\theta_i} + \operatorname{erf} \frac{a_j + x}{\theta_i} \right] \left[\operatorname{erf} \frac{b_j - y}{\theta_i} + \operatorname{erf} \frac{b_j + y}{\theta_i} \right] \\
 &= \frac{W_i}{4S} F(i, j)
 \end{aligned} \tag{1}$$

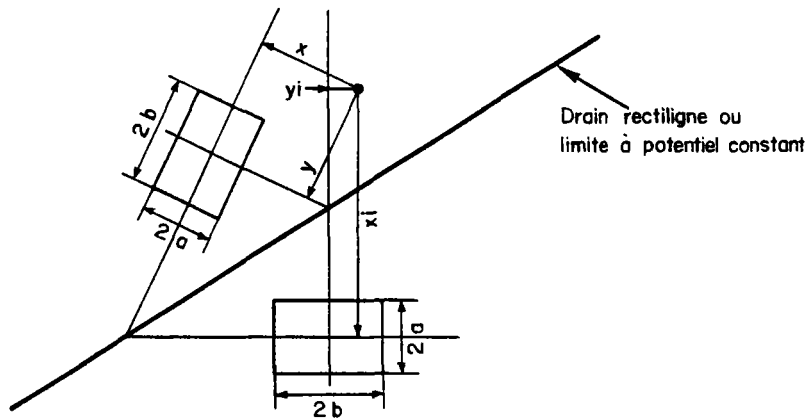
avec :

- $h(x, y, t,)$ = pression au point (x, y) à l'instant t
- W_i = recharge instantanée à l'instant i sur le rectangle
- S = coefficient d'emménagement ou porosité utile
- $\operatorname{erf}(u)$ = fonction d'erreur = $(2/\sqrt{\pi}) \int_0^u \exp(-x^2) dx$
- a_j = demi-dimension de la parcelle j selon l'axe des x
- b_j = demi-dimension de la parcelle j selon l'axe des y
- $\theta_i = 2\sqrt{T(t - t_i)}/S$
- t = instant où l'on calcule la pression
- t_i = instant de la recharge W_i
- T = Transmissivité

Pour m parcelles de dimensions $(2 a_j, 2 b_j)$ ayant reçu n recharges $W_{i,j}$, la formule devient :

$$h(x, y, t) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (W_{i,j} / 4S) F(i, j) \tag{2}$$

Cette formule est valable pour une nappe dont l'extension est infinie comparée au domaine influencé par la perturbation, mais elle est aussi capable de traiter une nappe semi-infinie, c'est-à-dire limitée par une barrière rectiligne imperméable ou à perméabilité réduite, ou au contraire par une ligne à potentiel constant ou à perméabilité beaucoup plus grande. Dans le cas d'une nappe semi-infinie, l'effet de la limite est introduit en associant aux parcelles considérées des parcelles-images situées symétriquement au-delà de la limite. Le cas le plus fréquent dans un aménagement agricole est la présence d'un canal ou d'un drain que l'on peut considérer comme une limite à potentiel constant, par exemple :



L'interprétation consiste à simuler par le calcul les fluctuations observées du niveau de la nappe. On procède par tâtonnements, en se donnant différentes valeurs de la diffusivité T/S (exprimée par exemple en m^2/jour si les temps sont exprimés en jours). Après chaque tentative, on calcule une régression entre valeurs calculées et mesurées jusqu'à ce que le coefficient de corrélation le meilleur soit obtenu.

Dans cette formule la fonction d'erreur $\text{erf}(u)$ est calculée par la série suivante :

$$\text{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(u + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \right) \quad (3)$$

avec $A_0 = u$

$$\text{et } A_i = A_{i-1} \frac{-u^2 (2i-1)}{n (2i+1)}$$

spécialement adaptée aux petites valeurs de u . Pour les grandes valeurs de (u) , dépassant 3 en valeur absolue, la fonction est arrondie à 1.

Si les lames d'eau arrivées à la nappe sont exprimées dans les mêmes unités que les mesures de la profondeur du niveau de la nappe, le coefficient d'emmagasinement S , ou plutôt ici la porosité utile, est alors égal à l'inverse de la pente de la droite de régression ; la transmissivité T est obtenue en multipliant T/S par S .

T et S sont supposés constants dans tout le domaine influencé, et invariables malgré de possibles variations d'épaisseur de la nappe.

L'interprétation peut être faite manuellement mais au prix de calculs fastidieux en utilisant la table jointe de la fonction $\text{erf}(u)$, ou automatiquement, notamment à la calculatrice programmable de poche Ti 59 (Tableau 1 et Annexe).

EXEMPLE D'APPLICATION

Une application de la méthode a été faite dans une série de parcelles soumises à des lessivages intensifs destinés à éliminer les excès de sel du sol. Les résultats obtenus dans une de ces parcelles sont donnés ici à titre d'exemple.

La parcelle est rectangulaire et mesure 102×126 m (figure 1). Elle est limitée par des tranchées drainantes dont l'une (drain 1) est proche du piézomètre de mesure des fluctuations du niveau de la nappe, mais on ne sait pas si au moment des travaux la tranchée était effectivement active en cet endroit en tant que drain. Il n'est donc pas certain qu'elle ait constitué lors de l'essai une limite à potentiel constant.

Afin de ne pas écarter cette hypothèse qui pourrait avoir une influence d'autant plus forte que le piézomètre se trouvait à plus faible distance, la simulation a été faite dans les deux cas d'une parcelle isolée dans une nappe infinie et d'une parcelle proche d'une limite à potentiel constant dans une nappe semi-infinie.

Dans les deux cas, six simulations ont été faites et les régressions entre valeurs simulées et mesurées ont donné les résultats suivants : (Tableau 2).

Tableau 1

TABLEAU DE LA FONCTION D'ERREUR
erf (u)

u	erf(u)
0.01	0.01128
0.02	0.02256
0.03	0.03384
0.04	0.04511
0.05	0.05637
0.06	0.06762
0.07	0.07586
0.08	0.09008
0.09	0.10128
0.10	0.11246
0.12	0.13476
0.14	0.15695
0.16	0.17901
0.18	0.20094
0.20	0.22270
0.25	0.27633
0.30	0.32863
0.35	0.37938
0.40	0.42839
0.45	0.47548
0.50	0.52050
0.6	0.60386
0.7	0.67780
0.8	0.74210
0.9	0.79691
1.0	0.84270
1.2	0.91031
1.4	0.95228
1.6	0.97635
1.8	0.98909
2.0	0.99532
2.5	0.99959
3.0	0.99998

EXEMPLE D'APPLICATION

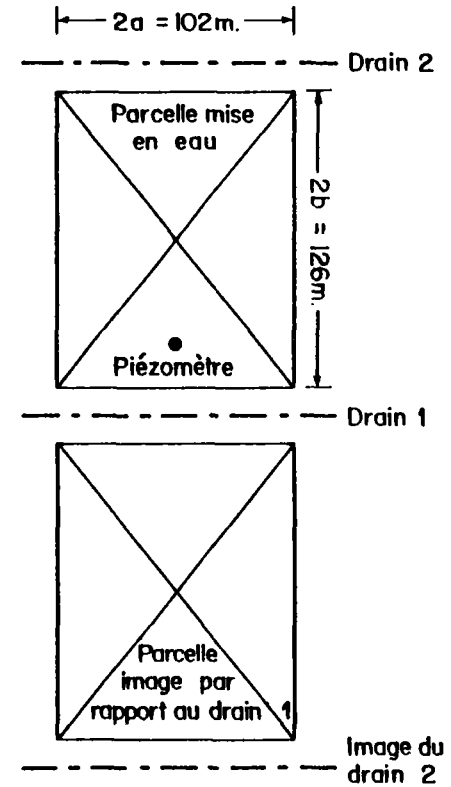
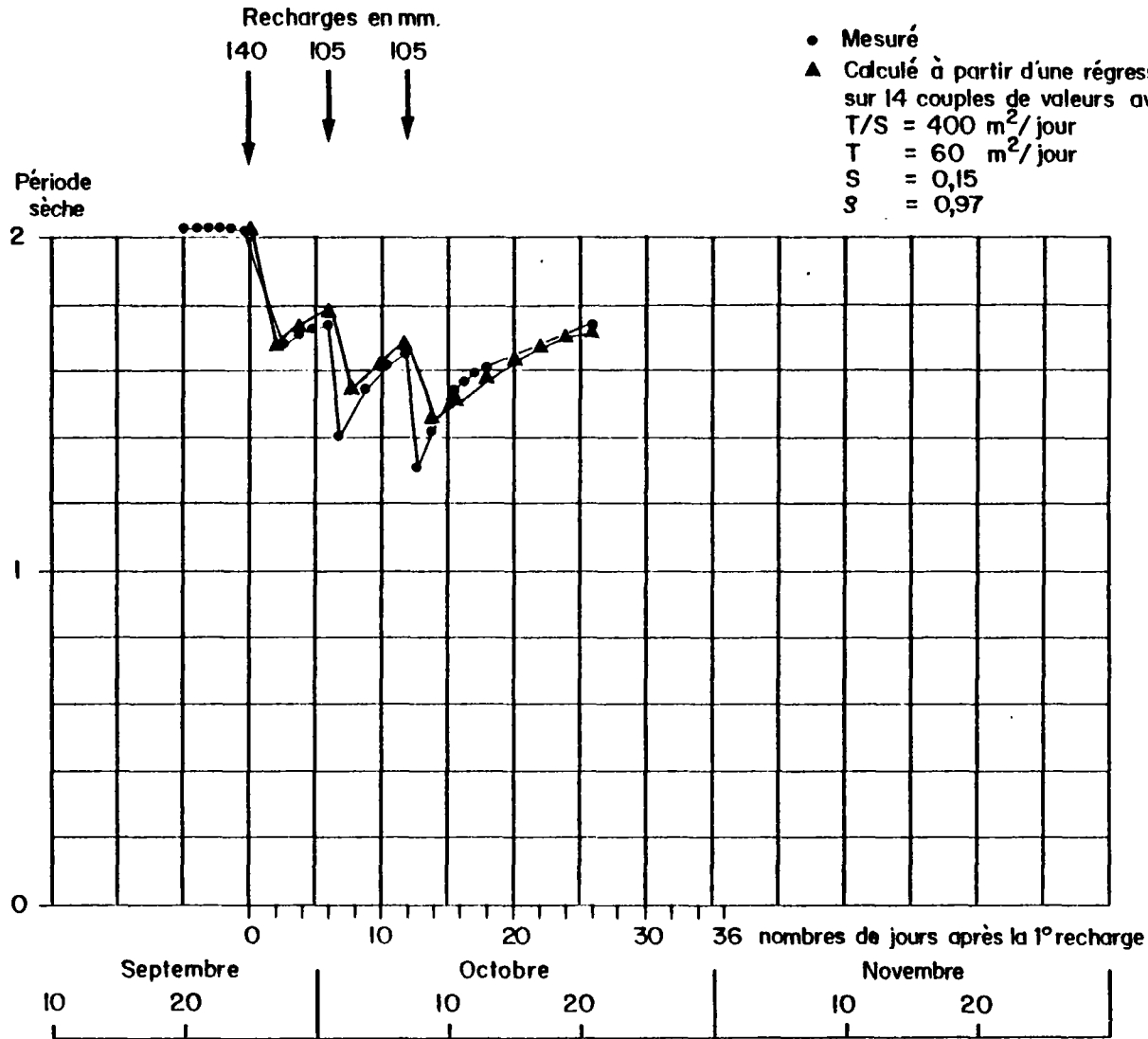


Fig. 1

TABLEAU 2

R E S U L T A T S

PARCELLE ISOLEE DANS UN MILIEU SEMI-INFINI

T/S	150	200	250	300	400	600
R ₁₄	0.965	0.9765	0.978	0.974	0.966	0.94
S	0.30	0.26	0.23	0.215	0.19	0.155
T	45	52	58	64	75	93
R ₇	0.989	0.9924	0.944	0.997	0.998	0.9994

PARCELLE LIMITEE PAR UN DRAIN

T/S	50	100	150	200	300	400
R ₁₄	0.961	0.973	0.93	0.89	0.82	0.76
S	0.38	0.275	0.24	0.21	0.18	0.17
T	19	28	36	43	54	69
R ₇	0.979		0.998	0.9996	0.9993	0.996

R est le coefficient de corrélation ou plutôt d'ajustement puisque les écarts entre les deux séries de chiffres peuvent ne pas avoir une distribution gaussienne. L'indice indique le nombre de valeurs considérées.

S est le coefficient d'emmagasinement ou de porosité utile, calculé ici comme si toute l'eau apportée sur la parcelle s'était infiltrée jusqu'à la nappe. Or on sait qu'il n'en est rien, car les apports ont été faits sur le sol partiellement desséché entre les apports et surtout pendant la période qui a précédé la première mise en eau. Les recharges devraient donc être amputées de 20 à 25 mm, et peut-être davantage pour la première recharge, et une diminution proportionnelle du même ordre devrait être faite pour les coefficients S et T.

Les coefficients d'ajustement sont plus proches de 1 dans l'hypothèse du milieu infini, avec un maximum de 0.978 pour $T/S = 250 \text{ m}^2/\text{jour}$, que dans l'hypothèse du milieu semi-infini où le maximum est cependant fort proche avec 0.973 pour $T/S = 100 \text{ m}^2/\text{jour}$.

La forme des courbes non significativement différentes dans les deux hypothèses, et l'absence d'observation sur le terrain de l'efficacité de la tranchée drainante le long de la parcelle pendant l'opération, n'autorisent pas d'adopter une hypothèse plutôt qu'une autre.

Cependant, la précision des déterminations de T et S est excellente puisque la marge d'incertitude est très inférieure à $\pm 20 \%$ dans le cas de la nappe infinie si l'on admet que l'on peut hésiter entre les deux valeurs voisines de la valeur retenue.

Le résultat final est donc :

Valeurs centrales

T/S	S	T
250	0.18	46

Valeurs extrêmes

200	0.20	40
300	0.17	52

Il est évident que si l'hypothèse d'une tranchée effectivement drainante est retenue, les valeurs ci-dessus devront être divisées approximativement par 2.

DEUXIEME PARTIE

CALCUL DE L'ESPACEMENT DE DRAINS DESTINES A ECRETER DES REMONTEES INTEMPESTIVES D'UNE NAPPE INDESIRABLE

Le calcul des réseaux de drainage est généralement basé sur des fonctions empiriques tenant compte des caractéristiques d'infiltration dans le sol et des caractéristiques d'écoulement dans une nappe souterraine, profonde ou non.

Lorsque la nappe est profonde et le sol perméable, aucun réseau de drainage n'est nécessaire tant que le niveau de la nappe n'est pas remonté au point de gêner les cultures. Une telle remontée de la nappe sous l'effet d'irrigations peut se produire plus ou moins rapidement, et on néglige souvent de le prévoir et de prendre en temps voulu les mesures qui s'imposent alors que des méthodes éprouvées existent pour cela.

Lorsque la nappe est peu profonde ou bien n'existe que de façon intermittente à la base d'une semelle de labour ou d'un sol sur substrat argileux, il est nécessaire de connaître la capacité d'écoulement de cette nappe, sinon on risque un surdimensionnement systématique des réseaux de drainage.

Une technique de mesure de ces caractéristiques a été présentée ci-dessus; et on montrera ici différentes méthodes de calcul de l'espacement de drains destinés à limiter toute remontée de nappe dépassant une valeur fixée à l'avance.

Il ne faut pas oublier en effet que le régime d'un réseau de drainage constitué d'un ensemble nappe + drains est commandé essentiellement par les paramètres d'écoulement horizontal des terrains, et que les paramètres d'écoulement vertical du sol n'ont finalement d'influence que sur un laminage plus ou moins poussé d'apports irréguliers en surface.

La pression maximale dans une nappe homogène entre deux drains parallèles à une distance $2a$ peut être calculée par différentes formules dérivées de l'équation de la chaleur pour différentes conditions aux limites.

On considèrera dans ce qui suit l'extension des drains comme infinie ou grande comparée à leur écartement, c'est-à-dire supérieure à 3 ou 4 fois cet écartement.

Recharge à taux constant

Le plus simple est de considérer le régime d'alimentation comme constant, et c'est ce qui est fait aussi dans certaines formules empiriques (HOOGHOUDT notamment).

La formule de base est alors :

$$h(x, t) = \frac{Ca^2S}{T} \frac{16}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)\pi x/2a}{(2n+1)^3} \quad (4)$$

$$* \left[1 - \exp \left[- (2n+1)^2 \pi^2 T t / (4a^2 S) \right] \right]$$

qui donne la pression h à un instant t en un point x dans une nappe recevant une recharge constante C , à écoulement parallèle entre une limite amont à flux nul à la distance " a " d'un exutoire (ou drain) à potentiel constant, choisi comme origine des distances x et des pressions h (figure 2).

Régime permanent

A la limite amont de cette nappe, c'est-à-dire ici au point milieu entre les deux drains, où $x = a$, et pour un temps infini correspondant au régime permanent, nous avons :

$$h(a, \infty) = \frac{Ca^2S}{T} \frac{16}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} = \frac{Ca^2S}{2T} \quad (5)$$

ou si l'on préfère :

$$a = \sqrt{2h^* T/W}$$

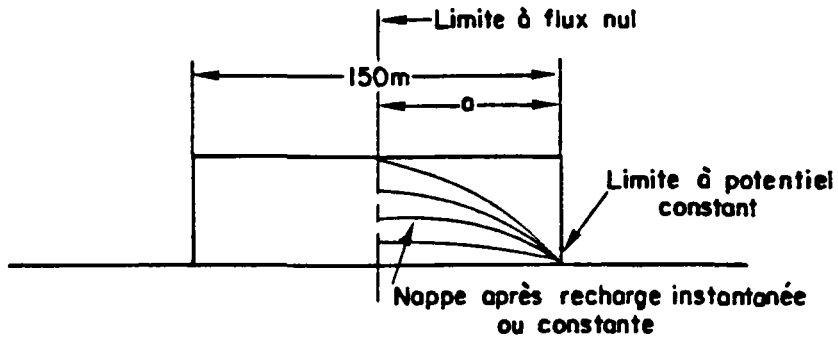
avec :

h^* = charge maximale autorisée entre deux drains

T = transmissivité

W = taux d'alimentation exprimé en une lame d'eau par unité de temps = CS

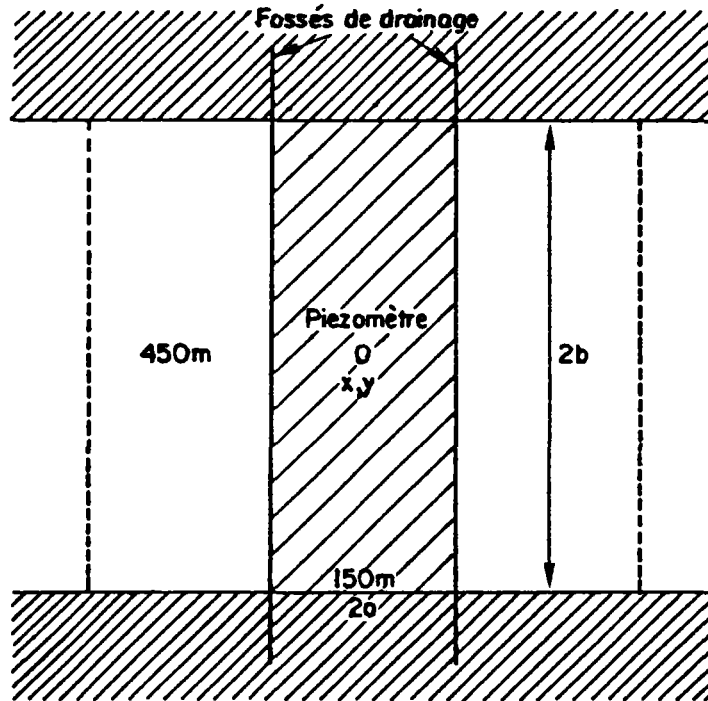
FORMULE 4 OU "FORMULE DU MUR"



Formules 4 à 9

Fig. 2

FORMULE 10 OU DU "GROUD WATER MOUND"



- Parcelle - type entre 2 fossés de drainage
- Parcelles-images prises en compte
- Parcelles-images de second. ordre et dont l'influence est négligée

Fig. 3

Régime permanent de durée limitée

Si le régime maximal d'alimentation n'est permanent que pendant une durée t , il faut recourir à la formule complète 4, dans laquelle on a fait $x = a$:

$$h(a, t) = \frac{Ca^2S}{T} \frac{16}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \left(1 - \exp \frac{-(2n+1)^2 \pi^2 T t}{4 a^2 S} \right) \quad (6)$$

$$= Ca^2SF/T$$

dont les principales valeurs sont tabulées ci-dessous (R. DEGALLIER, 1975) :

Tt/a^2S	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
fonction F	0.1	0.185	0.251	0.305	0.347	0.379	0.405	0.425	0.441
Tt/a^2S	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	∞
fonction F	0.453	0.470	0.481	0.487	0.491	0.493	0.496	0.497	0.5

On procède par tâtonnement pour trouver pour quelle valeur du demi-écartement des drains "a" le niveau maximal de la nappe entre deux drains est inférieur ou égal à la cote h^* au dessus de laquelle on n'accepte pas que l'eau de la nappe engorge le terrain.

On calcule le temps réduit Tt/a^2S pour obtenir la valeur de F, qui est introduite dans (6) et l'on regarde si h^* calculé est inférieur ou non à la valeur h^* adoptée.

Régime transitoire après recharge brusque

Mais un régime permanent est une vue optimiste. En réalité, les irrigations sont faites par doses qui s'infiltrent plus ou moins rapidement et la nappe fluctue de part et d'autre du niveau moyen qui serait induit par une recharge à taux constant.

L'écoulement après une recharge unitaire instantanée dans le domaine défini par les mêmes limites que ci-dessus est représenté par la dérivée par rapport au temps de la fonction (4) :

$$h(x, t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1) \pi x / 2a}{2n+1} \exp \left(-(2n+1)^2 \pi^2 T t / 4a^2 S \right) \quad (7)$$

et pour $x = a$:

$$h(a, t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp(-(2n+1)^2 \pi^2 Tt/4a^2S) \quad (8)$$

Après m recharges brusques W_j/S , l'évolution du niveau de la nappe sera :

$$H(a, t) = \sum_{j=1}^m \frac{W_j}{S} * h(a, t - t_j) \quad (9)$$

La fonction (8) ci-dessus a aussi été tabulée (R. DEGALLIER, 1975) :

Tt/a^2S	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
F	0.949	0.772	0.607	0.474	0.371	0.290	0.226	0.177	0.138
Tt/a^2S	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3	
F	0.108	0.066	0.040	0.025	0.015	0.009	0.003	0.001	

Mais il serait fastidieux de calculer la somme des effets d'un certain nombre de recharge W_j , ou en d'autres termes de calculer le produit de convolution de la formule (9).

C'est pourquoi un programme de calcul automatique a été publié sous différentes formes, en FORTRAN (R. DEGALLIER, 1972) ou pour calculatrice de poche TI 59 (R. DEGALLIER, 1981). Seule une partie des programmes ci-dessus, celle correspondant au calcul des transferts, est utilisée, et il convient de court-circuiter les autres parties par un choix convenable des paramètres.

Recharge brusque sur parcelle rectangulaire

Une troisième méthode équivalente à la précédente mais pour laquelle un programme spécifique de calcul à la calculatrice de poche TI 59 a été établi, peut également être appliquée (en annexe).

La méthode a en fait été élaborée pour interpréter des variations de niveau d'une nappe sous une parcelle rectangulaire irriguée, mais peut aussi bien simuler les fluctuations de la nappe sous un régime quelconque de recharges. On détermine l'écartement optimal des drains par tâtonnement jusqu'à ce que la pression calculée soit inférieure ou égale à la pression maximale autorisée.

La fonction utilisée est ici la formule 2 (page 3) :

$$h(x, y, t) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{W_{i,j}}{4S} \left[\operatorname{erf} \frac{a_j - x}{\theta_i} + \operatorname{erf} \frac{a_j + x}{\theta_i} \right] \left[\operatorname{erf} \frac{b_j - y}{\theta_i} + \operatorname{erf} \frac{b_j + y}{\theta_i} \right] \quad (10)$$

avec m : nombre de parcelles recevant chacune n recharges $W_{i,j}$, et :

$$\theta_i = 2 \sqrt{T (t_i - t) / S}$$

Exemple d'application

Les formules (9) et (10) ont toutes deux été utilisées pour calculer la charge maximale induite par une surdose d'irrigation de 25 mm tous les 5 jours.

Les parcelles irriguées sont supposées avoir 150 m de largeur entre drains et 450 m de longueur. La diffusivité T/S a été supposée comprise dans une fourchette de 75 à 300 m^2/jour et le coefficient d'emmagasinement a été pris comme égal à 0.15 (figure 3).

La charge maximale h^* à mi-distance des drains est alors la suivante :

T/S (m^2/jour)	75	150	300
$T_0 = \frac{4a^2S}{\pi^2T}$ (jour)	30.4	15.2	7.6
h^* (m)	1.2	0.62	0.34
atteint après	3 mois	6 semaines	3 semaines

T_0 est la constante de temps qui est effectivement introduite dans les formules. Ses variations ont été données ici comme dépendant de variations de T/S , mais on peut aussi bien fixer la valeur de T/S , par exemple à 150 m^2/jour , et faire dépendre T_0 de l'espacement des drains $2a$.

Dans ce cas, nous avons :

$2a$ (m)	212	150	106
T_0 (jour)	30.4	15.2	7.6
h (m)	1.2	0.62	0.34

Si les drains ont deux mètres de profondeur, la charge maximale sera donc de 1,2 m à mi-distance entre les deux drains, soit à une profondeur de 0,8 m sous la surface du sol.

Cette profondeur peut paraître faible en cas de nappe salée, mais il ne faut pas oublier que l'écoulement est alors fortement descendant sous l'influence d'abondantes surdoses d'irrigation. Il n'y a donc aucun danger de remontée de sel à ce moment.

En cas de jachère après une période d'intense irrigation, il n'y a plus de recharge et le niveau de la nappe va tendre vers la profondeur de 2 m. La vitesse de descente de la charge maximale - 1,2 m dans notre exemple - à son dixième, sera de 2,5 to, soit ici, pour la moyenne géométrique de nos valeurs extrêmes, de $2,5 \times 20 = 50$ jours. La profondeur de la nappe à ce moment sera de $2 - 0,12 = 1,88$ m. Si l'on pense qu'à ce moment la vitesse de baisse du niveau est assez faible pour ne plus suffire à contrebalancer la diffusion capillaire de l'eau salée vers le haut, on a encore une marge de sécurité de 1,08 m avant que cette eau salée ne risque de gêner des racines à 0,8 m.

Dans l'exemple ci-dessus, les espacements calculés par la formule de HOOGHOUTD avec des paramètres mesurés par la méthode du double anneau et par la méthode de PORCHET, étaient notablement plus faibles. Les drains ainsi calculés avaient été installés à 1,5 m de profondeur mais n'ont pas fonctionné, même avec les doses 3 à 4 fois plus fortes qui ont été portées lors des mesures piézométriques présentées en première partie.

L'étude détaillée du bilan des sels, lors des différentes périodes de lessivage, a aussi confirmé l'inadéquation du réseau de drainage existant.

CONCLUSION

Les méthodes présentées ci-dessus traitaient le cas de parcelles rectangulaires, mais il va sans dire que pour d'autres formes, d'autres fonctions mathématiques disponibles ou à élaborer devront être utilisées. Un cas qui risque de devenir fréquent avec le développement de l'irrigation par pivots est celui de la parcelle circulaire.

Lorsque l'eau n'est pas disponible en grande quantité, force sera de diminuer les dimensions des parcelles, mais on risque alors de se retrouver dans le cas classique dont on a précisément cherché à s'éloigner. Un moyen terme pourrait être de faire l'essai d'infiltration selon une ligne dans un fossé ou un sillon.

Les paramètres que la méthode détermine sont ceux de la nappe existante ou créée sous la parcelle d'essai et dans ses environs. Malgré leur valeur très supérieure à celle des paramètres évalués par les méthodes classiques, ces paramètres sont encore sous-estimés si, pendant l'expérimentation, la nappe n'a pas atteint le niveau maximal qu'on lui imposera par la suite, puisque son épaisseur active sera plus grande. Il en est de même lorsque la nappe mesurée est créée par l'expérimentation.

Dans le cas où un drainage est nécessaire sans qu'il y ait irrigation, des méthodes analogues existent et sont basées sur l'interprétation quantitative de variations de niveau dans des puits d'observations. Là-aussi, ce seront les paramètres d'ensemble qui seront déterminés et qui nous importent, et non pas des paramètres ponctuels dans des milieux hétérogènes.

DOCUMENTS CONSULTÉS

CARSLAW H.S., JAEGER J.C. (1959) - Conduction of heat in solids, Clarendon Press, OXFORD.

DEGALLIER R. (1972) - Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO. Bulletin du B.R.G.M., 2e série, section III, n° 3, p. 23-42.

DEGALLIER R. (1975) - Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Application aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire) - Thèse d'Etat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.

DEGALLIER R. (1981) - Simulation des écoulements superficiels et souterrains au moyen d'une calculatrice de poche TI 59. B.R.G.M./A.G.E..

A N N E X E

MISE EN OEUVRE DES CALCULS A LA CALCULATRICE DE POCHE TI 59

En raison du nombre de mémoires limité de la calculatrice TI 59, le programme ci-annexé n'accepte pas dans son état actuel (octobre 1981) de traiter plus de deux parcelles, ou une parcelle et son image, ni plus de dix valeurs de la recharge de la nappe.

Les opérations à introduire au clavier sont indiquées entre crochets et les valeurs affichées sont données entre parenthèses :

- Introduire la partition voulue entre mémoires et programme [7 2nd OP 17 (399.69) CLR (0)]. On dispose ainsi de 400 pas de programme et de 70 mémoires.
- Introduire le programme au clavier selon la liste en annexe, ou par cartes magnétiques. Le programme lui-même se trouve sur les pistes 1 (pas 000 à 239) et 2 (pas 240 à 399) de la première carte ainsi que le contenu des mémoires 60 à 69.
- La seconde carte est utilisée quand on veut faire passer le programme avec des données préalablement enregistrées ; dans ce cas, la piste 3 correspond aux mémoires 30 à 59, et la piste 4 aux mémoires 00 à 29. La lecture, ou l'enregistrement d'une carte magnétique est réussie si le numéro de la piste est affiché sans clignoter. Si le clignotement persiste après plusieurs passages de la carte, introduire la section correspondante au clavier.
- Dans tous les cas, après introduction du programme et des données au clavier ou par cartes magnétiques, des erreurs peuvent subsister et il est recommandé de contrôler programme et mémoire pas à pas :
 - . au clavier, on fait [RST, LRN, SST, SST ... etc] pour le programme, et [RCL 00, RCL 01 ... etc] pour afficher successivement toutes les mémoires.
 - . A l'imprimante, on fait [RST 2nd LIST] pour obtenir la liste du programme, et [0, INV 2nd LIST] pour la liste des contenus des mémoires.

Le tableau I indique le contenu des mémoires avant exécution. L'initialisation des mémoires 0 à 19, excepté la mémoire 18 dont le contenu doit être = 0.000 0001, test de précision dans le calcul de erf, est indifférente.

Les mémoires 20 et suivantes doivent contenir les sommes et différences des demi-dimensions des parcelles et des coordonnées du point de mesure par rapport au centre des parcelles. Le programme n'accepte pour le moment qu'un maximum de deux parcelles recevant soit la même séquence de 10 recharges au plus, soit le même nombre de 5 recharges au plus à des instants différents. Le premier cas est aussi celui d'une parcelle et de son image par rapport à une limite.

Les mémoires 30 à 39 doivent contenir les constantes et paramètres de commande du programme selon le détail du tableau I.

Les mémoires 40 à 49 sont réservées à 10 valeurs au maximum des instants T des recharges W à introduire dans les mémoires 50 à 59.

Les mémoires 60 à 62 n'ont pas à être initialisées. Différents formats d'impression se trouvent dans les mémoires 63 à 66. La mémoire 67 devra contenir la même valeur de la diffusivité que la mémoire 36 si l'on veut tenir compte de l'effet d'une limite.

Certaines opérations sont commandées par l'état de drapeaux :

- . Si l'on dispose de l'imprimante, on lève le drapeau 0 [2nd STF 0]
- . Si la nappe est limitée, on lève le drapeau 3 [2nd STF 3]
- . Si la limite est à potentiel constant, on lève le drapeau 4 [2nd STF 4]
- . Si les recharges ne sont pas identiques dans les deux parcelles, on lève le drapeau 6 [2nd STF 6]

La durée d'exécution est de l'ordre de 2 heures avec une parcelle recevant 3 recharges et l'essai de 3 valeurs de diffusivité dans le calcul de 15 points par valeur. Les résultats sont imprimés à l'imprimante ou affichés. Dans ce dernier cas, l'opérateur devra relever chaque résultat et relancer l'exécution ensuite.

Tableau 1

TABLEAU DES MEMOIRES

0	nombre de diffusivités	30	nombre de diffusivités
1		1	nombre de pas de temps
2	nombre de recharges W	2	nombre de recharges W
3		3	0 (obligatoire)
4	temps courant	4	nombre de parcelles (1 ou 2)
5	nombre de valeurs de erf (=2)	5	temps initial - intervalle (mém.68)
6	adresses des distances	6	diffusivité initiale (T/S)/RT
7	nombre de parcelles	7	
8	adresses des recharges W	8	RT = multiple des diffusivités
9	adresses des temps T _w	9	

10	} Utilisé dans sous-programme E	40	instant T de la recharge 1 (=0)
1		1	instant T de la recharge 2
2		2	instant T de la recharge 3
3		3	instant T de la recharge 4
4		4	instant T de la recharge 5
5		5	instant T de la recharge 6
6		6	instant T de la recharge 7
7		7	instant T de la recharge 8
8		8	instant T de la recharge 9
9		9	instant T de la recharge 10

20	a-x	50	Recharge W ₁
1	a+x	1	Recharge W ₂
2	b-y	2	Recharge W ₃
3	b+y	3	Recharge W ₄
4	a-x _i	4	Recharge W ₅
5	a+x _i	5	Recharge W ₆
6	b-y _i	6	Recharge W ₇
7	b+y _i	7	Recharge W ₈
8		8	Recharge W ₉
9		9	Recharge W ₁₀

60	} utilisé dans les boucles A et B	
1		
2		
3	} Formats d'impression	376336 "T/S"
4		24311616 "INDC"
5		37243017 "TIME"
6		3346 "PZ"
7		idem mémoire 36 si image
8		intervalle de temps entre points calculés
9		

Lever les drapeaux

- 0 si imprimante disponible
- 3 si image
- 4 si limite à potentiel constant
- 6 si la hauteur ou la séquence des recharges n'est pas la même sur les deux parcelles (mais le nombre de recharges doit être identique).

Les résultats seront des pressions hS exprimées en des lames d'eau dans la même unité que les recharges. Si cette unité est la même que celle des mesures piézométriques, le coefficient d'emmagasinement, ou ici porosité utile S , sera directement égal à l'inverse de la pente de la droite de régression. Ce coefficient se trouvera déterminé surtout par la comparaison des recharges et des remontées de niveau. Il ne faudra pas oublier qu'une partie de l'eau apportée sera utilisée à réhumecter le sol et que chaque apport d'eau devra donc être amputé d'une certaine hauteur d'eau égale à l'évaporation qui peut avoir eu lieu depuis l'apport précédent.

Ce modèle mathématique suppose que les recharges sur le sol se transmettent instantanément à la nappe. Si l'on travaille à l'échelle journalière, et que la remontée de niveau se fait en plusieurs jours, il y aura lieu de fractionner l'apport introduit dans la calculatrice ou d'utiliser un autre modèle tenant compte du retard que l'eau met à traverser le sol.

La diffusivité T/S commande la loi d'écoulement souterrain dans et au dehors de la parcelle sur laquelle l'apport d'eau a eu lieu, c'est-à-dire la loi selon laquelle, après une brusque variation de niveau, le niveau de la nappe retourne à son régime permanent. Ce sera essentiellement la forme et la courbure de la courbe de l'évolution piézométrique après la variation brusque de niveau qui devra être simulée par le modèle pour que les paramètres de calcul puissent être affectés au site étudié.

Une régression entre valeurs mesurées et calculées peut être faite au moyen d'un programme enregistré sur la piste 2 de la carte magnétique 1 à la suite du programme général, à partir de l'instruction 357. Pour la mise en oeuvre de ce programme, procéder comme suit :

- [GTO INV R/S] pour initialisation à zéro des mémoires nécessaires
- Introduire x_i (= valeur calculée) [R/S]
- Introduire y_i (= valeur mesurée) [R/S]
- Introduire x_{i+1} [R/S], y_{i+1} [R/S] jusqu'à ce que tous les couples de valeurs soient introduits. Le nombre de couples est affiché après chaque introduction (i).
- [GTO LNX R/S] pour obtenir successivement l'impression du coefficient de corrélation R , des paramètres b et a de l'équation de la régression $y = ax + b$, et de l'inverse de "a", ou coefficient d'emmagasinement S de la nappe étudiée. Il reste à multiplier ce coefficient par T/S pour obtenir la transmissivité T de la nappe. Des signes négatifs pour R , a , S , T apparaîtraient si des profondeurs sont corrélées par exemple à des pressions.

LISTE DU PROGRAMME

Carte magnétique 1, piste 1

000	76	LBL	050	39	39	100	06	06	150	76	LBL
001	18	C'	051	43	RCL	101	61	GTD	151	16	R'
002	43	RCL	052	61	61	102	60	DEG	152	43	RCL
003	30	30	053	85	+	103	76	LBL	153	04	04
004	42	STD	054	43	RCL	104	10	E'	154	75	-
005	00	00	055	68	68	105	91	R/S	155	73	RC*
006	76	LBL	056	95	=	106	43	RCL	156	09	09
007	11	A	057	42	STD	107	39	39	157	95	=
008	00	0	058	61	61	108	91	R/S	158	32	XIT
009	42	STD	059	85	+	109	76	LBL	159	00	0
010	39	39	060	43	RCL	110	60	DEG	160	77	GE
011	42	STD	061	62	62	111	97	DSZ	161	19	D'
012	37	37	062	95	=	112	01	.01	162	32	XIT
013	32	XIT	063	42	STD	113	12	B	163	65	*
014	43	RCL	064	04	04	114	98	ADV	164	43	RCL
015	63	63	065	43	RCL	115	97	DSZ	165	36	36
016	69	DP	066	34	34	116	00	00	166	95	=
017	04	04	067	42	STD	117	11	A	167	71	SBR
018	43	RCL	068	07	07	118	98	ADV	168	15	E
019	38	38	069	22	INV	119	91	R/S	169	22	INV
020	49	PRD	070	87	IFF	120	76	LBL	170	87	IFF
021	36	36	071	03	03	121	14	D	171	05	05
022	49	PRD	072	32	XIT	122	05	5	172	38	SIN
023	67	67	073	86	STF	123	00	0	173	22	INV
024	43	RCL	074	05	05	124	42	STD	174	87	IFF
025	36	36	075	76	LBL	125	08	08	175	04	04
026	69	DP	076	32	XIT	126	04	4	176	38	SIN
027	06	06	077	71	SBR	127	00	0	177	94	+/-
028	43	RCL	078	14	D	128	42	STD	178	76	LBL
029	40	40	079	22	INV	129	09	09	179	38	SIN
030	42	STD	080	86	STF	130	43	RCL	180	65	*
031	62	62	081	05	05	131	32	32	181	73	RC*
032	43	RCL	082	97	DSZ	132	42	STD	182	08	08
033	31	31	083	07	07	133	02	02	183	95	=
034	42	STD	084	32	XIT	134	22	INV	184	99	PRT
035	01	01	085	43	RCL	135	87	IFF	185	44	SUM
036	43	RCL	086	61	61	136	06	06	186	39	39
037	35	35	087	22	INV	137	16	R'	187	69	DP
038	42	STD	088	87	IFF	138	65	*	188	28	28
039	61	61	089	00	00	139	53	(	189	69	DP
040	76	LBL	090	10	E'	140	43	RCL	190	29	29
041	12	B	091	69	DP	141	07	07	191	97	DSZ
042	43	RCL	092	06	06	142	75	-	192	02	02
043	65	65	093	43	RCL	143	01	1	193	16	R'
044	69	DP	094	66	66	144	54	)	194	76	LBL
045	04	04	095	69	DP	145	95	=	195	19	D'
046	43	RCL	096	04	04	146	44	SUM	196	92	RTN
047	37	37	097	43	RCL	147	08	08	197	76	LBL
048	94	+/-	098	39	39	148	44	SUM	198	15	E
049	42	STD	099	69	DP	149	09	09	199	34	FX

Piste 2

CARTE MAGNETIQUE 1

Piste 1 (suite)			Piste 2					
200	65	X	240	42	STD	300	44	SUM
201	02	2	241	05	05	301	14	14
202	95	=	242	71	SBR	302	43	RCL
203	35	1/X	243	44	SUM	303	19	19
204	42	STD	244	43	RCL	304	65	X
205	11	11	245	16	16	305	43	RCL
206	02	2	246	92	RTN	306	15	15
207	00	0	247	76	LBL	307	55	+
208	85	+	248	44	SUM	308	43	RCL
209	53	(	249	43	RCL	309	14	14
210	43	RCL	250	11	11	310	55	+
211	07	07	251	65	X	311	53	(
212	75	-	252	73	RC*	312	43	RCL
213	01	1	253	06	06	313	14	14
214	54	)	254	69	DP	314	65	X
215	65	X	255	26	26	315	02	2
216	04	4	256	95	=	316	85	+
217	95	=	257	76	LBL	317	01	1
218	42	STD	258	13	0	318	54)
219	06	06	259	42	STD	319	65	X
220	71	SBR	260	17	17	320	53	(
221	75	-	261	42	STD	321	43	RCL
222	42	STD	262	19	19	322	14	14
223	12	12	263	33	X²	323	65	X
224	71	SBR	264	94	+/-	324	02	2
225	75	-	265	42	STD	325	75	-
226	49	PRD	266	15	15	326	01	1
227	12	12	267	43	RCL	327	54)
228	43	RCL	268	19	19	328	95	=
229	12	12	269	50	I×I	329	42	STD
230	55	+	270	32	X!T	330	19	19
231	04	4	271	03	3	331	44	SUM
232	95	=	272	77	GE	332	17	17
233	92	RTN	273	34	FX	333	55	+
234	76	LBL	274	43	RCL	334	43	RCL
235	75	-	275	19	19	335	17	17
236	00	0	276	32	X!T	336	95	=
237	42	STD	277	00	0	337	50	1×1
238	16	16	278	77	GE	338	77	GE
239	02	2	279	50	I×I	339	85	+
			280	01	1	340	43	RCL
			281	61	GTD	341	17	17
			282	33	X²	342	65	X
			283	76	LBL	343	02	2
			284	50	I×I	344	55	+
			285	01	1	345	89	#
			286	94	+/-	346	34	FX
			287	61	GTD	347	95	=
			288	33	X²	348	76	LBL
			289	76	LBL	349	33	X²
			290	34	FX	350	44	SUM
			291	00	0	351	16	16
			292	42	STD	352	99	PRT
			293	14	14	353	97	DSZ
			294	43	RCL	354	05	05
			295	18	18	355	44	SUM
			296	32	X!T	356	92	RTN
			297	76	LBL			
			298	85	+			
			299	01	1			

**CALCUL D'UNE REGRESSION ENTRE VALEURS
MESUREES y ET CALCULEES x**

$$(y = ax + b)$$

357	76	LBL	Initialisation de la régression
358	22	INV	
359	36	FGM	
360	01	01	
361	71	SBR	
362	25	CLR	
363	91	R/S	Introduction x_1
364	76	LBL	
365	17	B'	
366	99	PRT	
367	32	X↵T	
368	91	R/S	Introduction y_i
369	99	PRT	
370	78	Σ+	
371	91	R/S	Introduction x_{i+1}
372	61	GTD	
373	17	B'	
374	76	LBL	Calcul et impression :
375	23	LN \bar{X}	
376	69	DP	
377	13	13	
378	99	PRT	. coefficient de corrélation (R)
379	69	DP	
380	12	12	
381	99	PRT	. coordonnées à l'origine (b)
382	32	X↵T	
383	99	PRT	. pente de la droite de régression (a)
384	35	1/X	
385	99	PRT	. coefficient d'emmagasinement (S)
386	91	R/S	

0.	00		
0.	01	} Indices de bandes et adresses gérées par le programme	CONTENUS DES MEMOIRES
0.	02		
0.	03		
0.	04		
0.	05		
0.	06		
0.	07		
0.	08		
0.	09		
0.	10	} Mémoires utilisées pour le calcul de erf (u)	CARTE MAGNETIQUE 2
0.	11		
0.	12		
0.	13		
0.	14		
0.	15		
0.	16		
0.	17		
0.	18			$\epsilon$
0.00000001	19		Piste 4
0.	20	a_1-x_1	
51.	21	a_1+x_1	
51.	22	b_1-y_1	
108.	23	b_1+y_1	
18.	24	a_2-x_2	
51.	25	a_2+x_2	
51.	26	b_2-y_2	
-33.	27	b_2+y_2	
159.	28		
0.	29		
0.	30	nombre de diffusivités	
2.	31	nombre de pas de temps	
15.	32	nombre de recharges	
3.	33	-	
0.	34	nombre de parcelles	
2.	35	temps initial	
0.	36	diffusivité initiale	
75.	37	-	
0.	38	multiple des diffusivités	
2.	39	-	
0.	40	T_1	
0.	41	T_2 Parcelle 1	CARTE MAGNETIQUE 2
6.	42	T_3	
12.	43	T_1	
0.	44	T_2 Parcelle 2	Piste 3
0.	45	T_3	
0.	46		
0.	47		
0.	48		
0.	49		
0.	50	W_1	
140.	51	W_2 Parcelle 1	
105.	52	W_3	
105.	53	W_1	
0.	54	W_2 Parcelle 2	
0.	55	W_3	
0.	56		
0.	57		
0.	58		
0.	59		

CONTENUS DES MEMOIRES (suite)

Exemple

CARTE MAGNETIQUE 1 Piste 2	0.	60	-
	30.	61	-
	0.	62	-
	376336.	63	"T/S"
	24311616.	64	-
	37243017.	65	"TIME"
	3346.	66	"PZ"
	250.	67	Diffusivité initiale
	2.	68	Incrément des temps
	7700173521.	69	-

LISTE DES LABELS

001	18	C'	Début du programme
007	11	A	Boucle des diffusivités
041	12	B	Boucle des temps
076	32	XIT	
104	10	E'	
110	60	IEG	
121	14	D	
151	16	A'	Boucle des recharges
179	38	SIN	
195	19	D'	
198	15	E	Fonction "ground water mound"
235	75	-	
248	44	SUM	
258	13	C	Fonction erf
284	50	IXI	
290	34	IX	
298	85	+	
349	33	XE	régression
358	22	INV	
365	17	B'	
375	23	LNK	