

ÉTUDE SUR MODÈLE ANALOGIQUE ÉLECTRIQUE DE L'ALIMENTATION PAR LE RHIN DE LA NAPPE PHRÉATIQUE D'ALSACE

PAR P. PRUDHOMME *,
P. UNGEMACH ** ET
PH. ROGNON ***

Notations

- K_x coefficient de Darcy suivant O_x (horizontal);
 K_z coefficient de Darcy suivant O_z (vertical);
 P porosité;
 P_{eff} porosité efficace;
 T transmissivité;
 S coefficient d'emmagasinement (pour une nappe libre $S = P_{eff}$);
 v vitesse;
 E potentiel électrique;
 σ conductivité électrique;
 \vec{i} vecteur densité de courant électrique;
 I intensité du courant électrique;
 q débit;
 ∇ opérateur nabla :
 ∇h gradient de h ,
 $\nabla \cdot (Pv)$ divergence de Pv ,
 $\nabla^2 h$ laplacien de h .

Problème posé

Dans le cadre de l'étude générale de la nappe phréatique du Rhin entreprise par le Service Géologique d'Alsace et de Lorraine (S.G.A.L.), un des premiers points abordés concernait le mécanisme des relations entre le fleuve et la nappe. En particulier, il est apparu intéressant de connaître l'ordre de grandeur des débits injectés dans la nappe lors d'une crue du Rhin et de préciser l'extension de la zone aquifère soumise à cette injection ainsi que la durée d'établissement du régime de pseudo-équilibre des hautes eaux de la nappe.

Les cartes isopiézométriques traduisent une alimentation de la nappe par le Rhin lorsque ce dernier est en crue et, inversement, un drainage de la nappe lorsque le fleuve est à l'étiage. Toutefois il faut se garder d'exploiter quantitativement ces cartes dans le but d'évaluer les débits échangés pour deux raisons majeures :

- l'écoulement au voisinage du fleuve est tridimensionnel du fait de la faible profondeur du Rhin (10 m) vis-à-vis de l'épaisseur aquifère (50 m);
- le régime de l'écoulement est essentiellement transitoire.

Devant les difficultés de résolution de ce problème par voie analytique, difficultés accrues par le peu de données dont on dispose au voisinage immédiat des berges, le S.G.A.L. a demandé au Département

* Chef du Département d'Etudes Hydrologiques de Géopétrole, Directeur de Géohydraulique.

** Ingénieur au Service Géologique d'Alsace et de Lorraine.

*** Ingénieur au Département d'Etudes Hydrologiques de Géopétrole.

d'Etudes Hydrologiques de Géopétrole de l'aider dans cette résolution en s'appuyant sur les méthodes de simulation de l'écoulement. Le processus utilisé a consisté à simuler l'écoulement sur un modèle en papier conducteur (Teledeltos) figurant une coupe transversale de la plaine. Les différentes hypothèses de travail retenues afin de se ramener à un schéma plan, sans ôter au modèle son caractère représentatif, font l'objet du premier chapitre de cet article. Les deuxième et troisième chapitres sont consacrés au traitement analogique du problème, à la présentation et la critique des résultats obtenus.

1. Hypothèse de travail.

a) CARTES DE COMPOSANTES NORMALES AU FLEUVE (fig. 1).

Si l'on s'intéresse au rôle du Rhin vis-à-vis de la nappe, il convient, à partir de la carte isopiézométrique de référence, d'isoler la composante de l'écoulement normale au fleuve. Celle-ci peut être connue en tout point au moyen d'une carte de différences de cotes obtenue en retranchant de la cote d'un point de la nappe celle du fleuve au droit du point considéré. Pour un milieu idéal, homogène et isotrope, les lignes équipotentiels seraient parallèles à la berge et les lignes de courant perpendiculaires (dirigées du fleuve vers la nappe en période de crue et de la nappe vers le fleuve à l'étiage). La carte n° 1 tracée à la date du 10-3-1965 (basses eaux du Rhin) pour la zone située au nord de Strasbourg, est en bonne concordance avec la théorie le long d'un profil perpendiculaire au Rhin dont le cours à cet endroit est pratiquement rectiligne.

La carte n° 1 traduit également un drainage sensible par le complexe Zorn-Landgraben dont il a été tenu compte dans la représentation sur modèle. La variation du gradient hydraulique dans cette zone a été attribuée à une diminution du débit unitaire de la nappe ($q = T \times i$) due aux prélèvements de ces rivières et non à une baisse de la transmissivité de l'aquifère. Par la suite, la rivière unique Zorn-Landgraben (ces deux rivières sont suffisamment rapprochées le long du profil sélectionné pour justifier cette assimilation) sera désignée sous le nom de Zorn (largeur 10 m, profondeur 2 m).

Deux kilomètres à l'ouest de la Zorn, le débit de la nappe reste pratiquement constant. Il a été évalué à 50 l/s par km linéaire par application de la loi Darcy le long d'une isopièze.

b) CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES.

Les valeurs retenues pour les paramètres hydrodynamiques sont les suivantes :

- transmissivité $T = 10^{-1}$ m²/s, déduite des essais de pompage réalisés à Reichstett et Drusenheim;
- épaisseur alluviale $H = 50$ m estimée par voie géophysique;
- coefficient de Darcy dans le plan horizontal $K_x = 2 \cdot 10^{-3}$ m/s;
- rapport d'anisotropie $\sqrt{K_x/K_z} \approx 7$ (essais Solétanche);
- porosité efficace = 10 %.

La crue est celle observée après le 10-3-1965. La remontée du Rhin est supposée instantanée et égale

à 2,50 m; la Zorn passe de la cote + 1 à la cote + 1,3 par rapport au niveau initial du Rhin.

2. Traitement analogique du problème.

a) RELATIONS D'ÉQUIVALENCE.

— *Écoulement de l'eau dans un milieu poreux.*

Cet écoulement est régi par la loi de Darcy dont l'expression sous sa forme généralisée s'écrit :

$$\vec{v} = - (K/P) \overrightarrow{\nabla h} \tag{1}$$

L'équation de continuité, en régime permanent, donne par ailleurs :

$$\nabla \cdot (P\vec{v}) = 0 \tag{2}$$

La combinaison de (1) et (2) conduit à l'équation aux dérivées partielles :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

qui, dans un plan vertical, se réduit à :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \tag{3}$$

— *Circulation du courant électrique dans un milieu conducteur.*

Loi d'Ohm :

$$\vec{i} = - \sigma \overrightarrow{\nabla E} \tag{4}$$

Equation de continuité en régime permanent :

$$\nabla \cdot \vec{i} = 0 \tag{5}$$

De même façon que précédemment, nous obtenons pour un conducteur plan vertical :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_x \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_z \frac{\partial E}{\partial z} \right) = 0 \tag{6}$$

Remarque :

Si nous effectuons les changements de variables :

$$X = x \qquad Z = z \sqrt{K_x/K_z}$$

les équations (3) et (6) deviennent respectivement :

$$\nabla^2 h = 0 \tag{3'}$$

$$\nabla^2 E = 0 \tag{6'}$$

sous réserve que :

$$K_x \quad \sigma_x$$

$$\sqrt{K_x/K_z}$$

et :

$$\sqrt{\sigma_x/\sigma_z}$$

soient constants.

En d'autres termes, une anisotropie sera représentée dans l'analogie électrique au moyen d'un conducteur isotrope dont les dimensions verticales sont dilatées par rapport aux dimensions horizontales égales au rapport d'anisotropie.

— *Rapports d'analogie.*

La comparaison des équations (3) et (6) fait apparaître une analogie formelle entre les deux phénomènes, qui sont physiquement différents, mais d'expression mathématique identique.

Il est possible d'en dégager les rapports d'analogie :

$$\alpha = E/h = \frac{\text{potentiel électrique}}{\text{hauteur piézométrique}}$$

$$\beta = \sigma/K = \frac{\text{conductivité électrique}}{\text{coefficient de Darcy}}$$

$$\gamma = I/q = \frac{\text{intensité du courant électrique}}{\text{débit}}$$

$$\delta = l/L = \text{échelle géométrique de réduction du domaine réel}$$

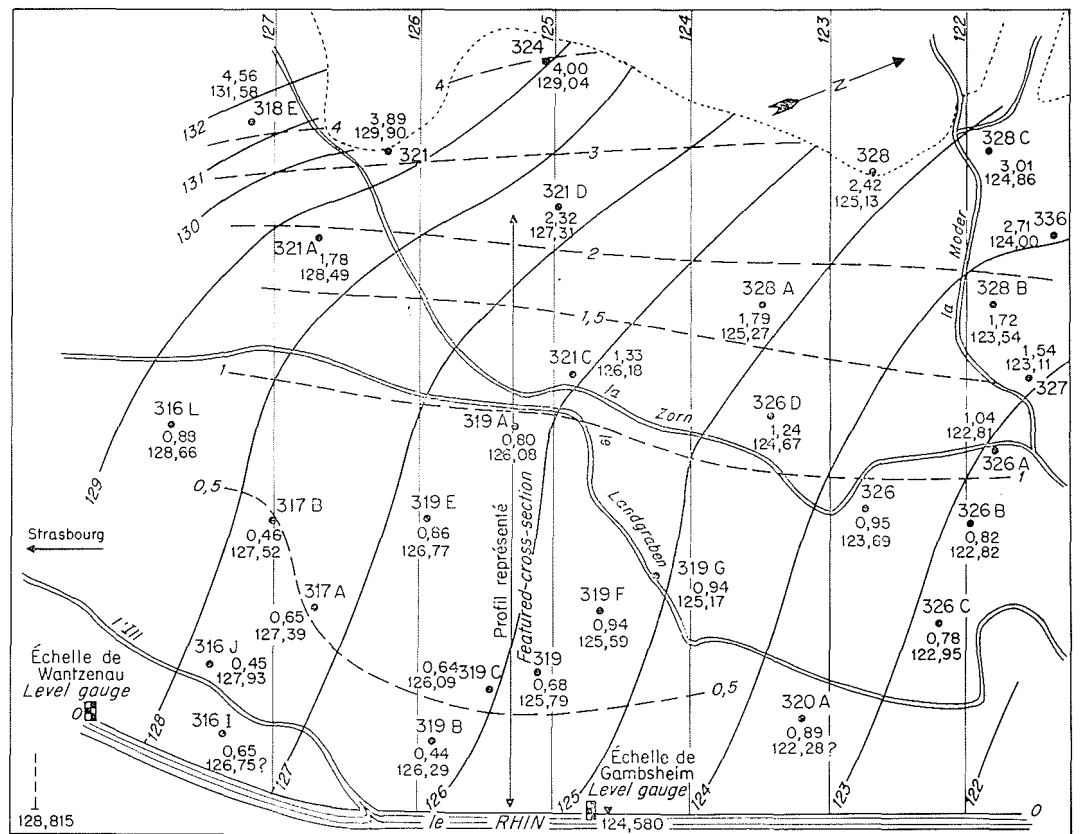
b) DESCRIPTION DU MODÈLE.

La figure 2 représente la section verticale d'aquifère, de largeur 1 km, perpendiculaire à la berge, simulée sur papier Teledeltos. Le Rhin et la Zorn sont représentés par des électrodes portées à des potentiels correspondant aux niveaux de leurs eaux. On notera le resserrement des électrodes au voisinage du fleuve. Une alimentation de 50 l/s est imposée à la limite ouest.

c) MÉTHODE DE CALCUL.

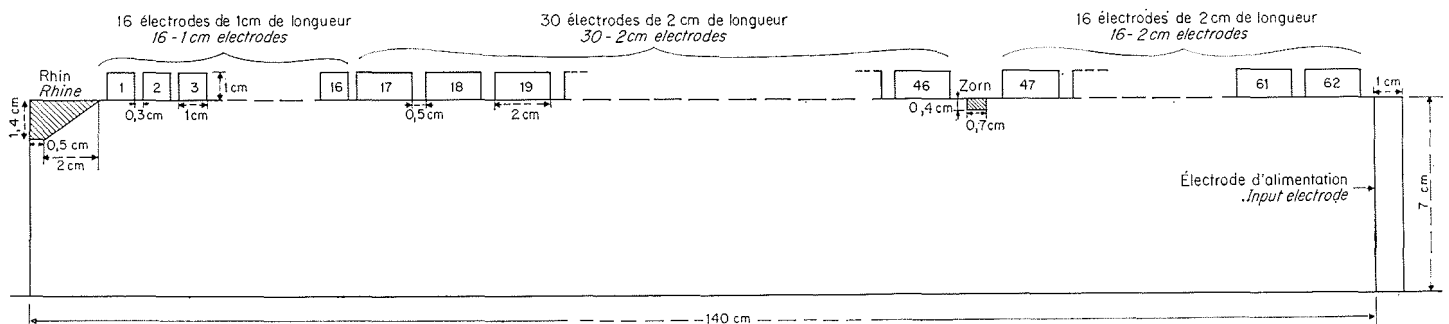
Le gonflement de la nappe est un phénomène transitoire qui peut toutefois être décomposé en une succession d'états permanents pour peu que l'on choisisse un pas de temps optimal. En effet, celui-

1/ Carte piézométrique (cote N.G.F.) et de composantes normales au fleuve (en m) à la date du 10 mars 1965.
Piezometric map and components normal to the river (metres) on 10th March 1965.



- 128 — Ligne isopièzométrique (en m.)
Isopièzometric line (metres)
- 1,5 --- Ligne d'égale différence de cotes (en m.)
Constant level difference line (metres)
- Limite d'extension à l'ouest de la nappe alluviale
Wesward limit of alluvial water table
- 318 A
• 0,80 N° piézomètre
126,08 Piezometric number
- Échelle - Level gauge

Différence de cote
Level difference
Hauteur piézométrique
Piezometric level



2/ Schéma du modèle / *Diagramm of model.*

ci doit être suffisamment court pour justifier l'assimilation des accroissements finis des hauteurs piézométriques et des débits à des accroissements différentiels. Pour un pas de temps Δt , tel que la variation de débit correspondante reste faible, le relèvement Δh de la surface libre est donnée par l'expression différenciée :

$$\Delta h = \frac{1}{P_{\text{eff}}} \frac{q}{S} \Delta t \quad (7)$$

S surface de nappe intéressée par le débit q ;
 P_{eff} porosité efficace représentant la désaturation de l'aquifère

qui permet de déterminer l'allure de la surface libre au temps $t + \Delta t$.

Les pas de temps initiaux ont été choisis de façon que la valeur moyenne des débits au cours de ce pas de temps soit voisine de la valeur instantanée du débit au début de celui-ci. La figure 3 traduit la dispersion des points pour une itération $\Delta t > 11$ h. Il convient de noter que ce pas de temps critique croît lorsque le gradient de potentiel diminue.

Les potentiels correspondant aux niveaux d'étiage sont affichés sur les électrodes Rhin et Zorn, la mesure des potentiels des électrodes intermédiaires fournissant l'allure de la surface libre initiale. Ensuite, l'affichage des potentiels hautes eaux permet de mesurer, par une méthode d'opposition, les courants et, par conséquent, de connaître la vitesse de remontée de la surface libre, les relèvements étant calculés au moyen de (7). En répétant ainsi l'opération, il est possible de suivre l'évolution dans le temps de la surface libre. Toutefois, dans le souci de réduire le nombre des étapes intermédiaires, on a procédé à des extrapolations. Celles-ci ont été

conduites de façon à ce que les débits traversant les électrodes et les potentiels satisfassent à un certain nombre de conditions (régularité de la courbe $q = f(x)$, continuité de $q = f(t)$, compatibilité des débits avec le volume d'aquifère mouillé, répartition du front d'avancée...).

Les extrapolations ont été retouchées par approximations successives jusqu'à fournir un ensemble de résultats cohérents.

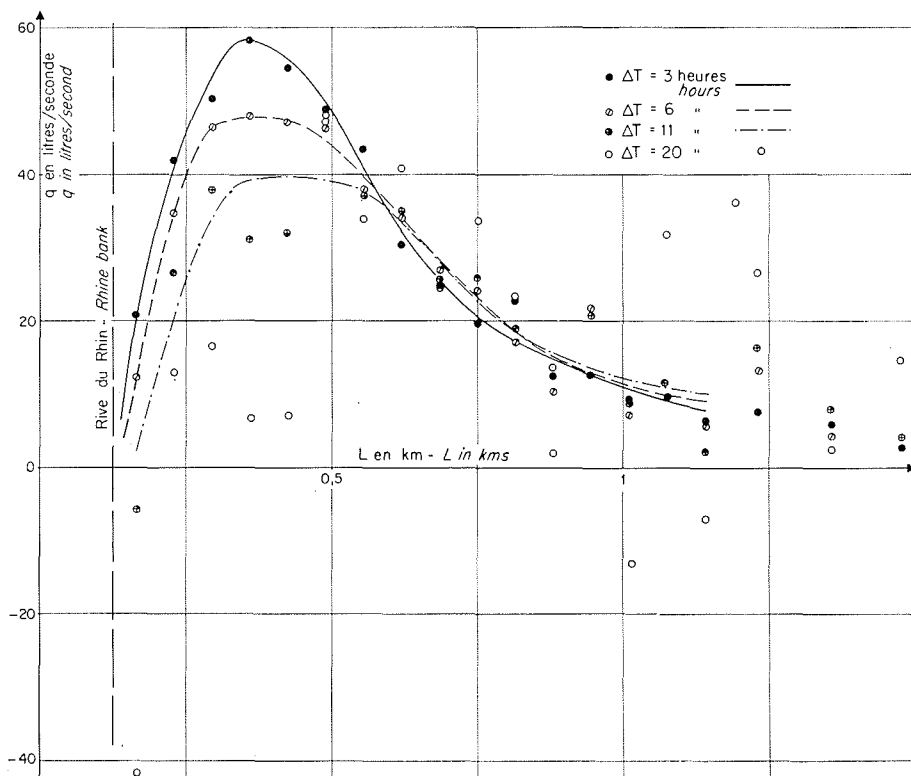
3. Résultats.

a) EVOLUTION DE LA SURFACE LIBRE (fig. 4 et 5).

Les courbes des figures 4 et 5 traduisent une élévation rapide du niveau piézométrique au voisinage de la berge (1,5 m en 10 h dans le cas réel à 40 m de la rive). Par contre, à 2 km du Rhin, il faut attendre 60 h avant de constater une modification notable du niveau de la nappe. Ainsi qu'on pouvait le prévoir, la perturbation est considérablement amortie à proximité de la Zorn.

Il convient toutefois de remarquer :

- que la corrélation de ces résultats avec les relevés piézométriques est délicate du fait de l'espacement des observations (relevés hebdomadaires);
- que la crue du fleuve n'est pas continue : en particulier, son niveau a baissé de 1 m entre le 23 mars et le 6 avril;
- que la schématisation du phénomène réel exigée par la représentation sur modèle ne tient compte ni des colmatages éventuels des berges, ni des zones partiellement inondables, facteurs qui compliquent le mécanisme des échanges Rhin-nappe;
- que la valeur de la porosité efficace des alluvions (10 %) repose sur une estimation.



3/Variation des débits dans la région proche du Rhin en fonction du pas de temps choisi.
Discharge variation near the Rhine for various time intervals.

Néanmoins, on peut constater dans le tableau A que les résultats fournis par le modèle et les relevés piézométriques sont en bonne concordance.

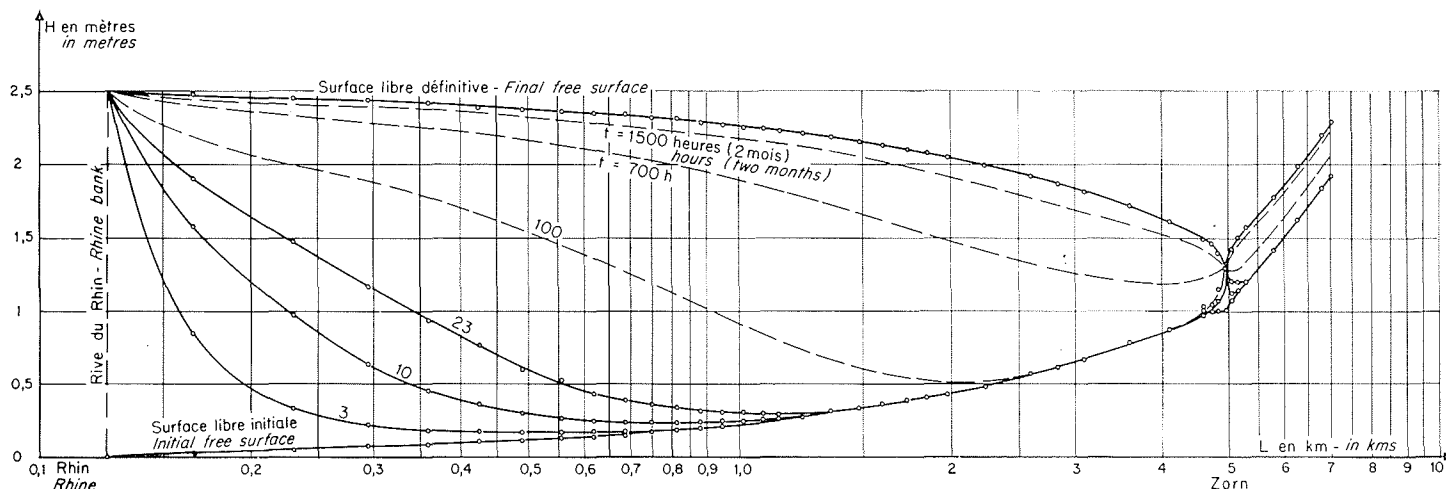
Le fait que les résultats du modèle soient légèrement supérieurs aux relevements réels peut être dû :

- soit à un effet de drainage des rivières de part et d'autre du profil d'étude, lequel a été négligé lors de la simulation sur modèle;
- soit à une sous-estimation de la valeur de la porosité efficace.

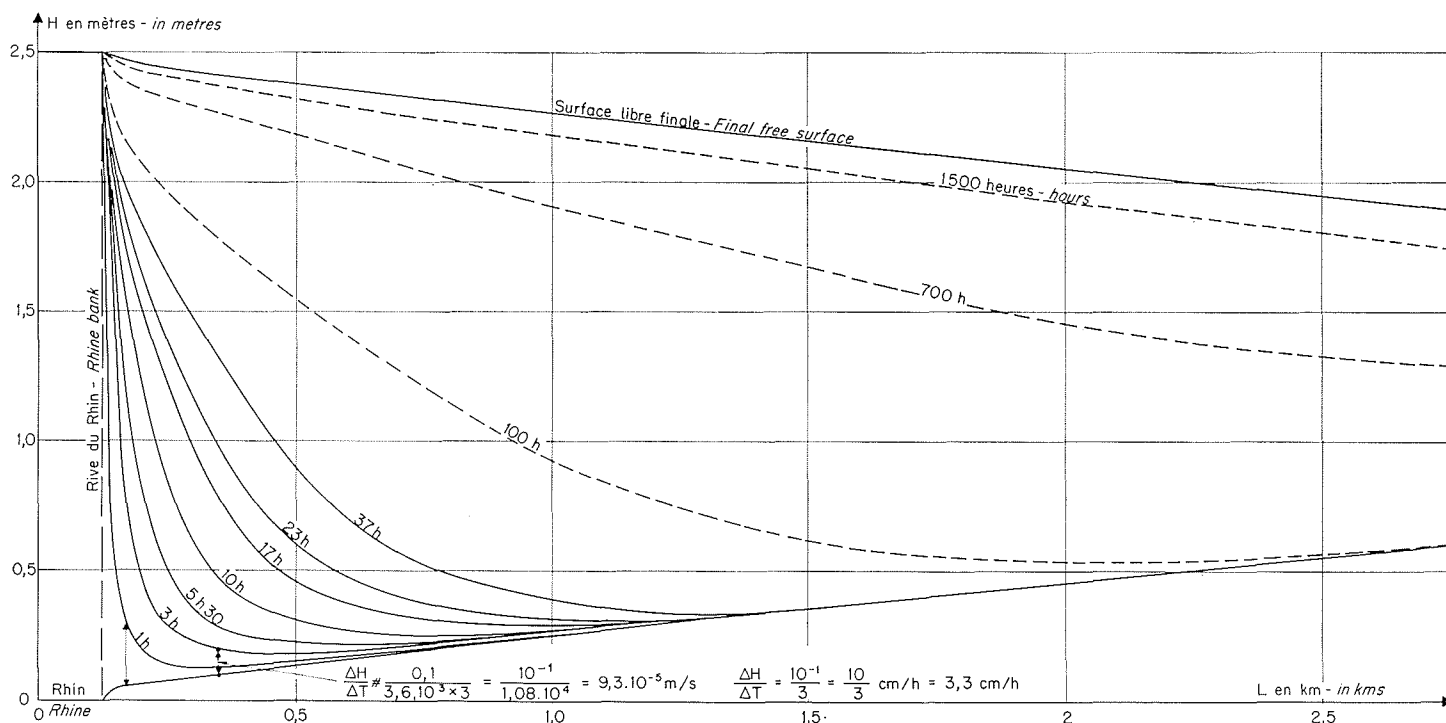
b) VITESSE DE REMONTÉE DE LA NAPPE.

Les variations de la vitesse de remontée de la nappe à différentes époques en fonction de la dis-

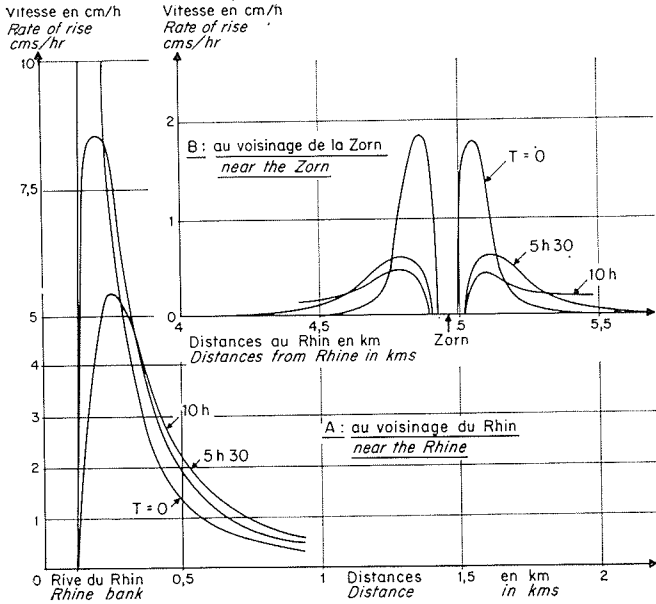
Tableau A				
PIÉZOMÈTRES	319 B	319 C	319	319 F
Distance de la rive du Rhin en km.....	0,9	1,5	1,8	2,5
Relèvement en m après 13 jours (300 h) :				
— sur le terrain.....	1,19	0,55	0,46	0,17
— d'après le modèle...	1,30	0,81	0,63	0,26



4/ Evolution de la surface libre de la nappe au cours du temps / Water table free surface variation with time.

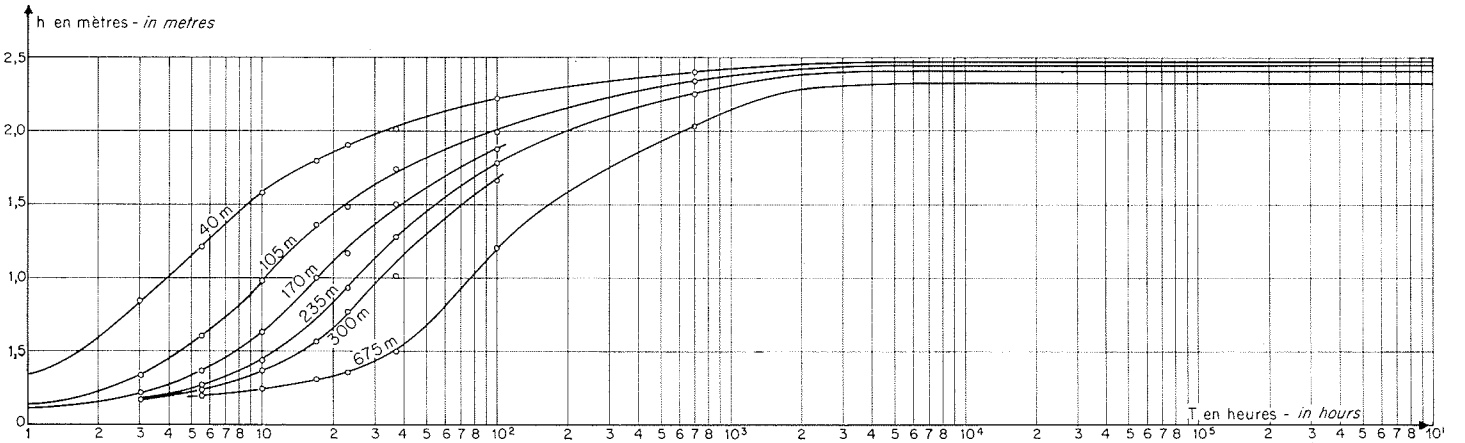
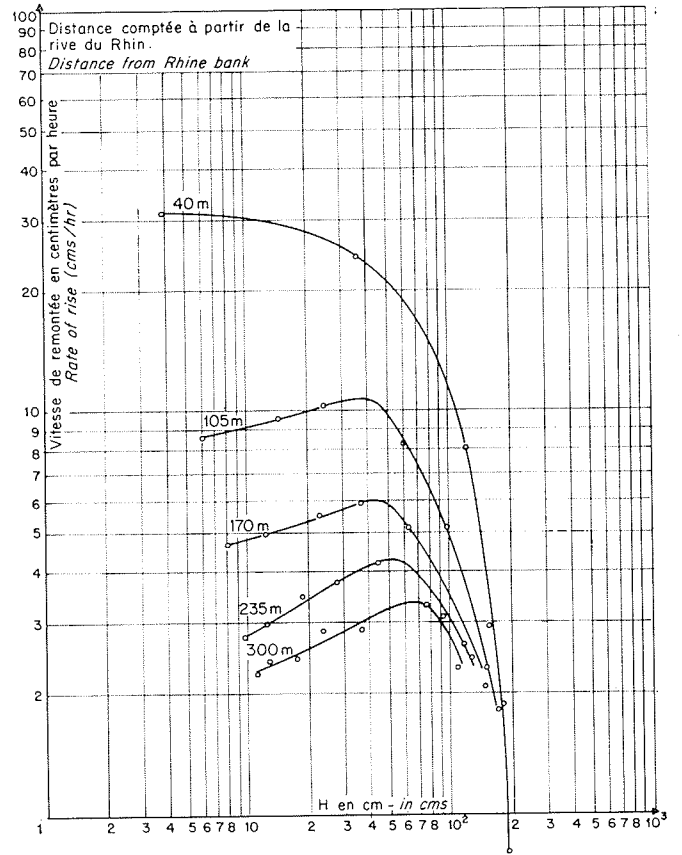


5/ Evolution de la surface libre de la nappe au voisinage du Rhin / Water table free surface variation near the Rhine.

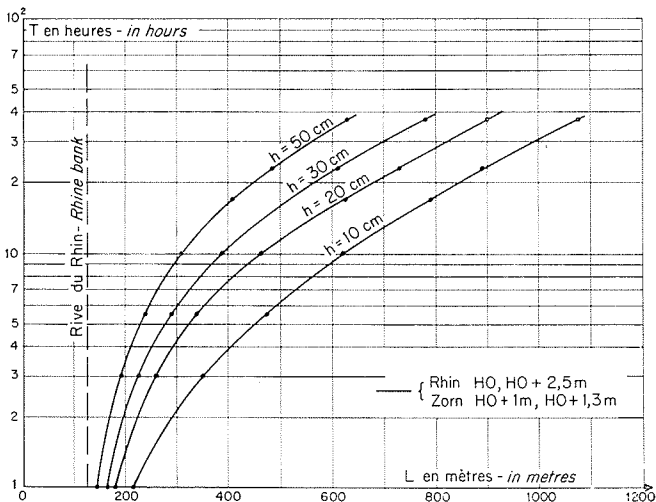


6/ Répartition dans l'espace des vitesses de remontée de la nappe à différents instants.
Rate of water table rise at various times and places.

7/ Vitesse de remontée de la nappe en fonction de la cote atteinte.
Rate of water table rise for various final levels.



8/ Variation en fonction du temps de la hauteur à différentes distances de la berge du Rhin.
Head variation with time at various distances from the Rhine bank.

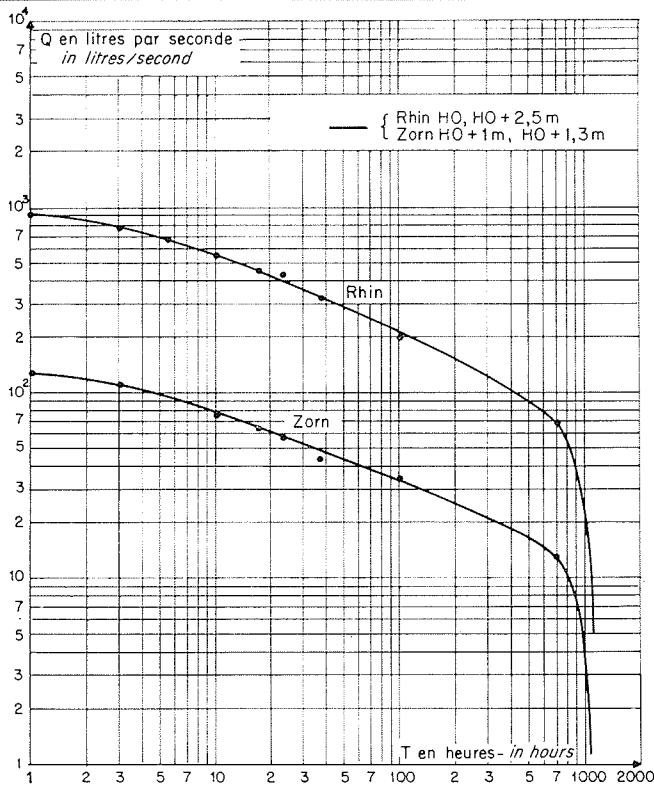


9/ Déplacement dans le temps et dans l'espace des points de relèvements donnés.
Displacement of given measurement points in space and time.

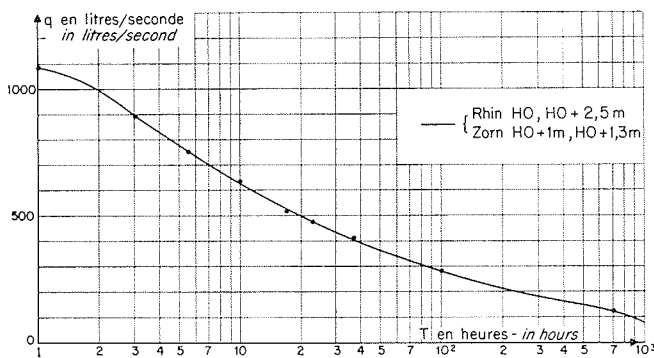
10/ Variation des débits du Rhin et de la Zorn.
Rhine and Zorn discharge variation.

11/ Variation au cours du temps du débit instantané entrant dans la nappe.
Instantaneous water table inflow variation with time.

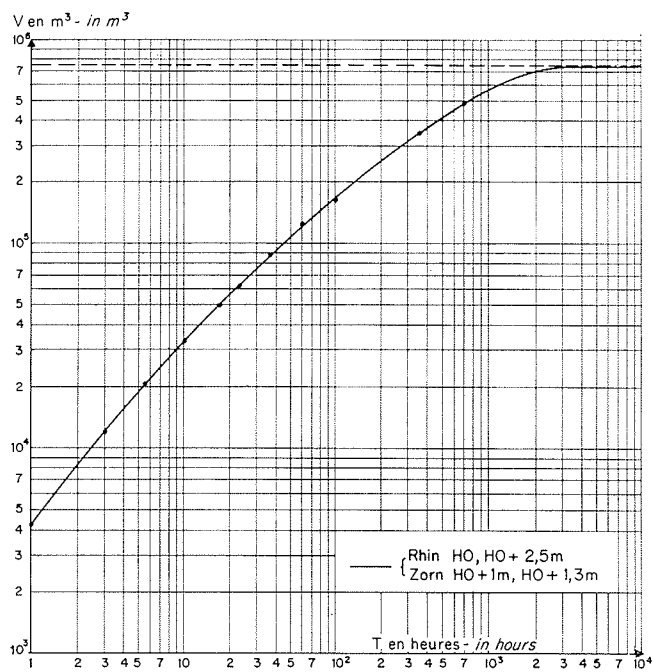
12/ Variation au cours du temps du volume d'eau apporté à la nappe.
Water table volume inflow variation with time.



10/



11/



12/

tance au Rhin et à la Zorn ont été portées sur la figure 6. Maximale à l'instant initial au voisinage des berges, cette vitesse passe ensuite par un maximum à une certaine distance du Rhin et de la Zorn. Ce maximum s'éloigne des rives tandis que son amplitude décroît. Cet amortissement est imputable à la diminution de la surpression exercée sur la nappe par ces cours d'eau.

Sur la figure 7 ont été consignées les vitesses de remontée de la surface libre en fonction du niveau atteint. On constate qu'en s'éloignant de la berge, ces vitesses en un point donné croissent, passent par un maximum, puis décroissent jusqu'à s'annuler lorsque la surface libre définitive est atteinte. On observe également un amortissement, associé à un déplacement du maximum, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la rive du fleuve. A 40 m du Rhin, par contre, la décroissance de la vitesse est monotone. On peut considérer qu'à cette distance la réaction de la nappe à la montée des eaux du fleuve est pratiquement instantanée.

Les relèvements de la surface libre en fonction du temps et à différentes distances du Rhin sont consignés sur la figure 8.

D'autre part, le déplacement dans l'espace et dans le temps d'un point de relèvement donné Δh de la surface libre est représenté sur la figure 9 pour diverses valeurs de Δh . Au-delà de 700 m, les courbes présentent une allure linéaire dans le système de coordonnées semi-logarithmique utilisé.

c) DÉBITS D'ÉCHANGES - VOLUME D'EAU APPORTÉ A LA NAPPE.

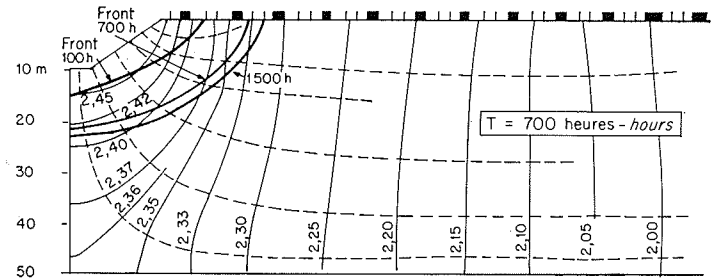
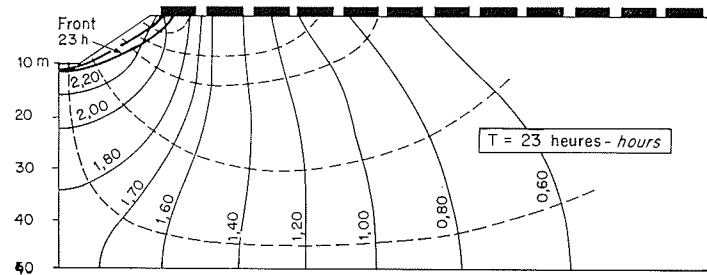
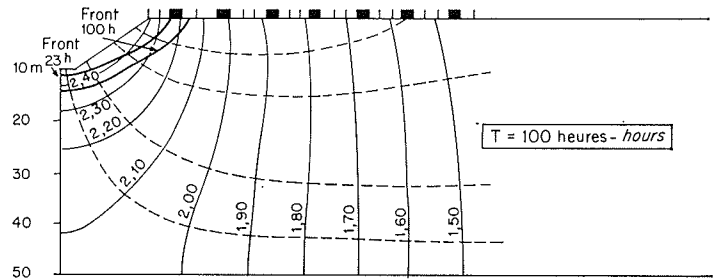
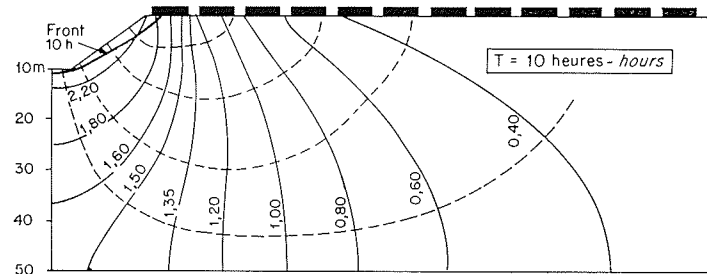
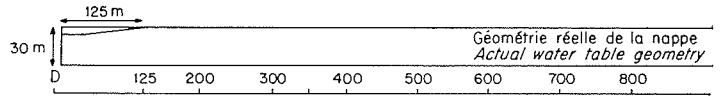
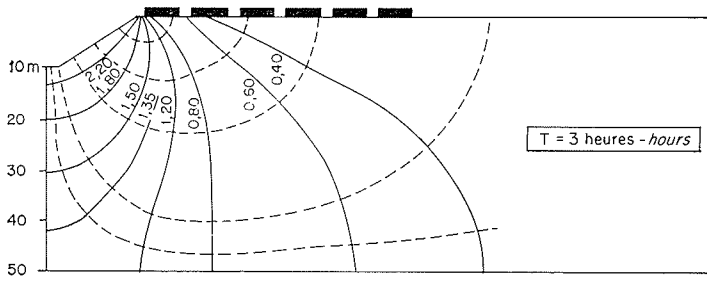
Les figures 10 et 11 représentent les variations des débits injectés dans la nappe par le Rhin et la Zorn au cours du temps, ainsi que du débit instantané pénétrant dans la nappe (somme des débits provenant du Rhin, de la Zorn et de la limite ouest). On remarquera que l'on a été amené à considérer qu'au bout de 700 h le débit chutait rapidement vers zéro. Ce résultat est à rapprocher de celui de la figure 8 (saturation atteinte pour un temps voisin de 1 000 h) et de la figure 12 (volume d'eau maximal entrant dans la nappe à un instant donné).

La figure 12 montre que le volume maximal susceptible de pénétrer dans l'aquifère est atteint sensiblement au bout de 2 000 h (soit environ deux mois) : ce volume correspond à la cote « hautes eaux » définitive de la surface libre.

Les rapports du volume d'eau entrés dans la nappe à des instants donnés au volume maximal susceptible de pénétrer dans celle-ci sont consignés dans le tableau B.

1 jour	0,86 %
1 semaine	31 %
15 jours	47 %
1 mois	66 %
2 mois	89 %

Au bout de deux mois, la nappe est rechargée à 89 % de sa capacité totale. On peut donc considérer qu'à ce moment l'état permanent est pratiquement atteint.



13/ Relevés d'équipotentiels à différents instants au voisinage du Rhin. Fronts à différents instants. Equipotential distribution at various times near the Rhine. Fronts at various times.

De ce volume injecté dans la nappe, une fraction importante provient du Rhin, comme l'indiquent les figures 10 et 11 : 86 % à 23 h, 70 % à 100 h, 58 % seulement au bout de 1 500 h.

d) COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS SUR MODÈLE AVEC CEUX DÉDUITS DES FONCTIONS DE DRAINAGE.

La fonction de drainage s'applique dans le cas d'un aquifère homogène, isotrope, infini et non réalimenté lorsque la berge du fleuve, non colmatée, est verticale et atteint le substratum. Elle implique également une nappe captive et un rabattement constant au droit de la berge. Son expression analytique s'écrit :

$$s = s_0 \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du \right] = s_0 \operatorname{erfc} u$$

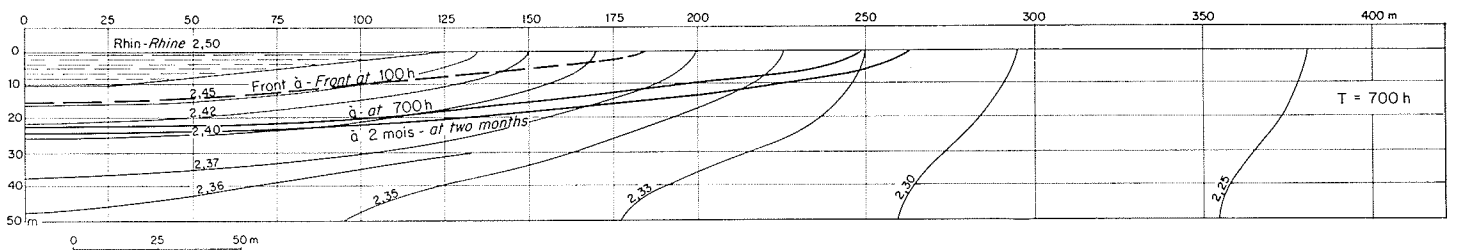
avec :

$$u^2 = x^2 S / 4 T t$$

- X compté à partir de la berge;
- s_0 le relèvement instantané dans le fleuve;
- erfc le complément de la fonction d'erreur explicite plus haut.

Il est également possible de calculer le débit fourni par le fleuve dans les mêmes conditions que précédemment, au moyen de la relation :

$$Q = \frac{s_0}{\sqrt{\pi t}} \sqrt{ST}$$



14/ Equipotentiels au temps $t = 700$ h. Formes des fronts pour 100 h, 700 h et 2 mois. Equipotential distribution at $t = 700$ h. Front outlines for 100 h, 700 h and 2 months.

Bien que l'on se trouve dans des conditions très éloignées des conditions théoriques, il était intéressant de comparer, à titre indicatif, les résultats du modèle (lignes supérieures) et ceux des formules précitées (lignes inférieures) qui figurent dans le tableau C.

t (h)	X (m)					q m ³ /s. km)
	40	105	525	900	2 000	
5,5	2,10	1,80	0,02	0	--	1,00
	1,17	0,54	0,04	0,01	--	0,66
17	2,30	1,92	0,34	0,02	--	0,57
	1,75	1,30	0,18	0,04	--	0,45
37	2,35	2,10	0,78	0,20	--	0,38
	1,98	1,68	0,46	0,14	--	0,32
100	2,40	2,25	1,33	0,73	0,05	0,23
	2,18	1,96	1,17	0,66	0,06	0,20
700	2,50	2,40	2,13	1,75	0,95	0,09
	2,34	2,25	1,92	1,63	0,91	0,067

On voit que la fonction de drainage représente correctement les variations du niveau de la nappe au-delà de 1 km de la berge. En deçà, la géométrie du lit, l'anisotropie des alluvions, la courbure des lignes de courant jouent un rôle non négligeable.

En substituant à *erfcu* la quantité qui correspond au deuxième mode de linéarisation de l'équation de drainage, on obtient de nouvelles valeurs du relèvement S qui sont consignées dans le tableau C'.

t (h)	X (m)				
	40	105	525	900	2 000
5,5	1,75	1,20	0,03		
17	2,1	1,80	0,67	0,03	
37	2,25	2,00	1,08	0,60	
100	2,33	2,20	1,70	1,30	0,04
700	2,42	2,37	2,19	2,00	1,40

Dans ce cas, la plage de meilleure coïncidence a lieu pour $x = 105$ cm et $t = 17$ h.

En ce qui concerne les débits, les écarts sont plus importants au début de la crue lorsque les débits sont élevés, en raison de la forme du lit et de l'anisotropie de la formation. Entre le troisième et le trentième jour cependant, la formule fournit une estimation correcte du débit. Au-delà, les conditions d'application de la formule ne sont plus remplies du fait des apports latéraux, mais les débits correspondants sont faibles (de l'ordre de 1/10^e des débits initiaux).

e) EQUIPOTENTIELLES - FRONT D'AVANCÉE DES EAUX DU RHIN DANS LA NAPPE.

Les réseaux d'équipotentiels à différents temps sont représentés sur la figure 13, sur laquelle on notera la distorsion d'échelle due à l'anisotropie du milieu. Sur la figure 14, par contre, on a figuré le tracé des équipotentiels et du front, au bout de 100 et 1 500 h en rétablissant à proximité du Rhin une échelle homogène (7/5 000 dans les deux directions).

La figure 13 traduit l'uniformité des écoulements au-delà de 250 m de la berge du fleuve.

Jusqu'à 700 h, les fronts ont été tracés à partir des réseaux d'équipotentiels et on a vérifié que les volumes limités par ces fronts étaient compatibles avec ceux déduits de la loi de variation des débits (cf. § 3 c). Pour 1 500 h, le front a été tracé à partir du débit moyen du Rhin calculé par extrapolation des courbes de la figure 10 et la cohérence des volumes ainsi trouvés a été vérifiée.

La figure 14 met en évidence les faits suivants :

- en distance à la berge, le front d'avancée des eaux du Rhin progresse peu au-delà de 700 h (125 m de la rive à 700 h et 163 m à 1 500 h). On peut donc considérer que, deux mois après la crue du fleuve, l'approximation du régime stationnaire est licite;
- en profondeur, la zone concernée par l'intrusion des eaux du fleuve s'enfonce de 12 m sous le lit du Rhin à 700 h et de 14 m seulement au bout de 1 500 h de crue. L'extension du front dans l'espace reste donc limitée, même en cas de crue prolongée.

Conclusion

1° En dépit de la schématisation considérable du phénomène réel, le modèle rend compte correctement des observations dont on dispose. Outre des informations d'ordre qualitatif, il a été possible de recueillir des ordres de grandeur concernant les débits injectés dans la nappe par le Rhin en hautes eaux, ainsi que l'extension de la zone aquifère soumise à cette injection. Les relèvements de la nappe cependant paraissent légèrement supérieurs à ceux observés dans la réalité, ce qui peut signifier que la valeur de 10 % retenue pour la porosité efficace est légèrement sous-estimée.

2° Le modèle a permis de dégager les limites de validité des formules de drainage (en relèvements et en débits) appliquées au cas particulier des échanges Rhin-nappe. Ainsi qu'en témoigne le tableau C, les effets de l'anisotropie des alluvions et de la géométrie du lit se manifestent jusqu'à 1 km de la berge. En débits, on obtient une approximation correcte dans un laps de temps de 3 à 30 jours consécutifs à la crue du fleuve.

3° Le régime de pseudo-équilibre de la nappe est atteint à 10 % près, deux mois après la crue du fleuve. A l'inverse, on peut admettre qu'à l'issue d'un étiage du fleuve supérieur à deux mois, la nappe serait proche de son état de pseudo-équilibre

basses-eaux. Notons dès à présent que ce résultat intéresse au premier chef la réalisation d'une étude en régime permanent sur un simulateur de type cuve rhéoelectrique. Elle permettra la recherche des transmissivités et des alimentations latérales en provenance des nappes de la bordure ouest sur le secteur alluvial de Strasbourg-Nord. Il s'agit là d'une phase préliminaire à l'étude du régime transitoire sur un modèle de type résistances-capacités.

4° La portion d'aquifère envahie par les eaux du Rhin, au terme d'une période hautes-eaux s'étendant sur plusieurs mois, reste limitée à une bande de quelques centaines de mètres, parallèle à la berge. Compte tenu de la faible valeur de la perméabilité verticale, il est vraisemblable par surcroît que, même au droit de la berge, le front d'avancée

des eaux du fleuve n'atteint pas la base de l'aquifère.

Il ressort de cette étude que la méthode analogique électrique appliquée à un problème dont l'approche et, *a fortiori* la résolution, par les voies de l'hydrogéologie classique, étaient extrêmement ardues, voire insolubles, constitue un apport substantiel au domaine de l'hydrogéologie quantitative appelée d'ores et déjà par les besoins en eaux des collectivités et des industries à d'intéressants développements. Dans cette optique, le S.G.A.L. envisage, en collaboration avec Géohydraulique, l'extension de cette méthode à l'étude plus élaborée du secteur alluvial de la plaine d'Alsace en régime transitoire, dont la présente étude a permis entre autres de préciser un des paramètres essentiels.

