

PARAMETRES HYDROLOGIQUES ET DEFORMABILITE DE TERRAINS AQUIFERES

A. Holeyman * et C. Legrand**

Le rabattement de la nappe aquifère, fréquemment utilisé dans nos régions, influence en général le voisinage. Si dans la zone d'influence se trouvent des couches de sol compressible, il en résulte inévitablement des déformations qu'il est difficile de prévoir avec précision. Les essais de pompage longs sont coûteux et peuvent provoquer, eux aussi, des tassements dangereux; la détermination des paramètres nécessaires par essais en laboratoire est peu précise et les sollicitations qui sont appliquées ne représentent pas assez exactement les sollicitations réelles.

Dans le site étudié, les différentes méthodes de détermination de ces paramètres sont appliquées et analysées, tant en ce qui concerne les mesures de pression que les mesures de déformations. Les résultats recueillis permettent de dégager les possibilités de la méthodologie proposée.

De grondwaterverlaging, dikwijls in onze streken toegepast, beïnvloedt in het algemeen de omgeving. Indien zich in de invloedzone samendrukbare lagen bevinden, ontstaan er onvermijdelijk vervormingen die moeilijk nauwkeurig kunnen worden voorspeld. De lange pompproeven zijn kostelijk en kunnen eveneens gevaarlijke zettingen veroorzaken; de bepaling van de nodige parameters door laboratoriumproeven is weinig nauwkeurig en de toegepaste sollicitaties vertegenwoordigen niet precies genoeg de werkelijke sollicitaties.

In het bestudeerde geval werden de verschillende methodes ter bepaling van deze parameters toegepast en ontleed, zowel wat de druk- als de vervormingsmetingen betreft. De verkregen resultaten tonen de mogelijkheden van de voorgestelde metodologie aan.

* A. Holeyman, ingénieur, M.S., Franki International, Liège; assistant chargé d'exercices à l'Université Libre de Bruxelles.

** C. Legrand, ingénieur-chef de projet; Centre Scientifique et Technique de la Construction, Bruxelles.

1. Introduction

Malgré le nombre important de théories pouvant intervenir dans l'estimation de tassements provoqués par le rabattement de la nappe aquifère, l'expérience montre qu'il est difficile d'obtenir des prévisions précises.

Certaines causes physiques expliquent les mouvements observés à la surface d'un terrain dans lequel un rabattement est en cours :

- (1) accroissement des contraintes effectives;
- (2) retrait des couches hydrophiles démergées;
- (3) dégradation accélérée de couches organiques;
- (4) entraînement de matières du sol;
- (5) déstabilisation du régime hydrologique.

Dans cet article, la première de ces causes est analysée plus en détail, dans le cadre d'un site instrumenté pour lequel la somme des données disponibles permettra d'effectuer des recoupements avec des méthodes de prévision.

En se cantonnant dès lors au problème de l'estimation, suite au rabattement, du tassement de la surface d'un sol comprenant des couches compressibles en contact avec des couches aquifères, il s'avère nécessaire, pour utiliser les instruments classiques de la géologie de l'ingénieur et de la géotechnique, de conduire le calcul en deux étapes : d'abord il faut calculer les variations de pression d'eau, ensuite en déduire les modifications de contraintes dans le sol et les variations résultants d'épaisseur des couches concernées.

La première étape relève de l'hydrogéologie; elle suppose en toute rigueur de connaître les paramètres suivants :

- . caractéristiques du système d'exhaure : diamètre des puits, des tubes de pompage, emplacements et profondeurs de ces puits, courbe de la pression en fonction du débit de la pompe raccordée à son circuit et les conditions de refoulement éventuel dans le site aquifère.
La plupart du temps, on se contente de déterminer le diamètre des puits et le débit nominal des pompes;
- . les caractéristiques du sous-sol dans la zone influencée par le rabattement : géométrie des différentes couches et pour chacune la perméabilité dans les trois directions principales, le coefficient d'emménagement spécifique; pour les couches supérieures, il faut connaître la porosité effective et la hauteur d'ascension capillaire.
En général on simplifie cette description aux éléments suivants : une ou deux couches, souvent considérées comme horizontales et d'épaisseur constante, dont on connaît la perméabilité horizontale;
- . le régime hydrologique initial : les flux, les zones d'alimentation, de stockage, les frontières imperméables.
Souvent on ne tient pas compte de ces facteurs.

La deuxième étape relève de la mécanique des sols fondamentale; elle suppose que l'on connaisse la relation entre les contraintes totales, les pressions d'eau et les contraintes effectives responsables du tassement.

Ces relations peuvent faire intervenir la phase gazeuse, le degré de saturation et d'autres coefficients phénoménologiques propres aux sols considérés. Elle suppose aussi que l'on connaisse la relation entre les contraintes responsables du tassement et ce tassement. Il en résulte, moyennant l'adoption des lois de filtration admises lors de la première étape, l'estimation du tassement dans le temps.

La plupart du temps, on adopte la relation de Terzaghi (contrainte effective = contrainte totale - pression d'eau), et pour la relation contraintes-déformations, une relation linéaire ou logarithmique ou donnée par un essai de consolidation; pour la loi de filtration on admet celle de Darcy. En gros, l'on adopte la théorie de la consolidation selon Terzaghi.

La quatrième partie de cet article montre de quelle façon il a été tenu compte de tous ces paramètres dans l'étude effectuée.

2. Géologie et géotechnique du site d'essai

Prenant sa source à Plancenoit vers la cote + 120, la Lasne a creusé profondément son lit suivant une direction sud-ouest, nord-est à travers les couches épaisses de l'Eocène moyen qui recouvrent tout le sud et l'est du Brabant. Elle se jette dans la Dyle à la cote + 30 à Weert-St-Georges, à 7 kilomètres à l'aval du site d'essai.

La pente moyenne de la vallée dans les 15 derniers kilomètres est inférieure à 2 pour mille, ce qui a favorisé un dépôt important d'alluvions très fines. En de très nombreux endroits on note la présence de petits étangs ou de zones marécageuses.

C'est l'une de ces zones, en aval de Rosières, qui a été choisie pour l'implantation de la station d'épuration de la vallée de la Lasne.

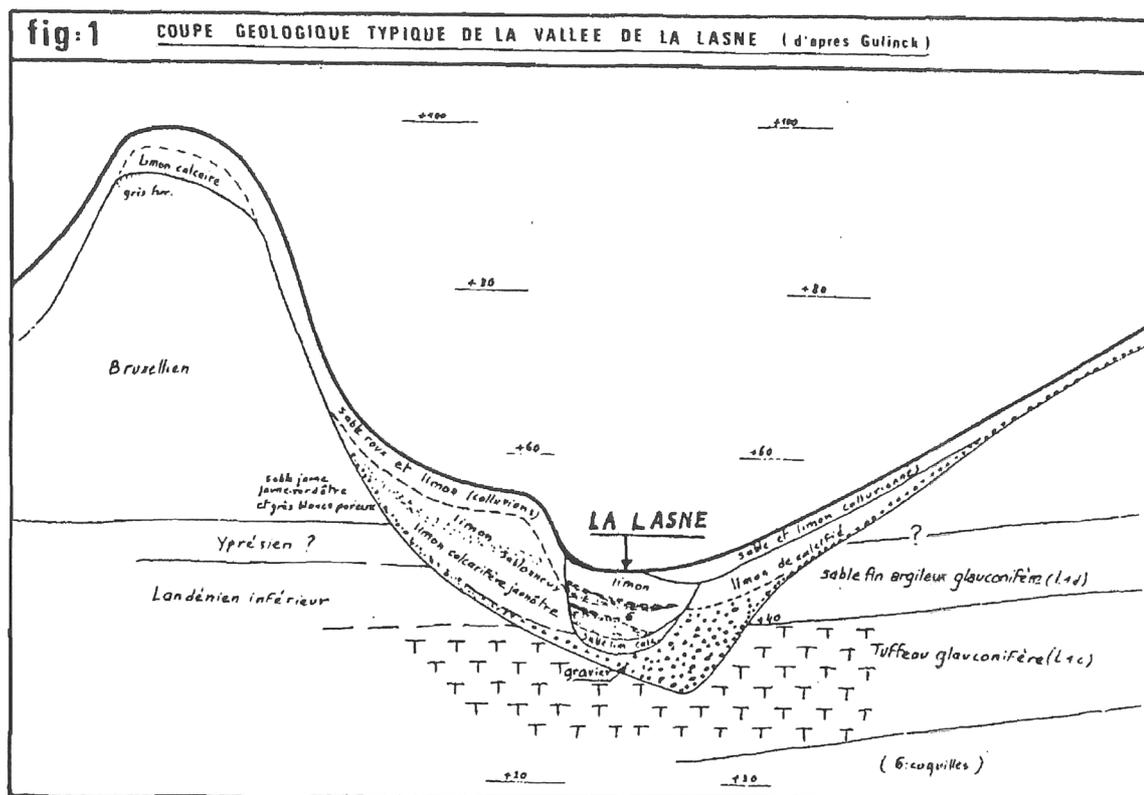
2.1 Géologie

La configuration de l'ensemble du site est bien représentée par l'extrait de la coupe géologique établie par M. Gulinck, du Service Géologique de Belgique, lors de l'étude de l'autoroute Bruxelles-Wavre qui traverse la vallée de la Lasnes à Rosières (fig. 1).

On note successivement :

- des limons quartenaires sur les sommets des vallons (cote + 90 à + 100), sur une épaisseur allant parfois jusqu'à 15 mètres, souvent décalcifié sur la partie supérieure;
- une épaisse couche de sable bruxellien, localement gréseux et calcaire, d'une épaisseur maximum de l'ordre de 40 m, la base se situant vers la cote + 50.
- sur les flancs des vallées on rencontre des sables et limons colluvionnés provenant des deux couches précitées;
- sous le bruxellien se trouve probablement une couche peu épaisse de sable ou d'argile de l'étage yprésien, mais les reconnaissances effectuées ne l'ont pas atteinte;
- on rencontre ensuite le Landénien inférieur, d'abord la couche L1d formée de sable fin argileux glauconifère jusque vers + 40 au droit des bords de la vallée, ensuite la couche L1c formée de sable et de grès ou tuffeau glauconifère. La base de cette couche, qui remonte insensiblement vers le sud, est située vers les cotes + 20 à + 25;

- la vallée de la Lasne a complètement traversé le sable bruxellien et a fortement entamé le Landénien.
- On y rencontre des alluvions limoneuses et tourbeuses et de la tourbe pure sur une épaisseur de plusieurs mètres, suivies d'une couche sablo-graveleuse de faible épaisseur. La cote moyenne du centre de la vallée est de + 43 ;
- sous le Landénien, on note la présence du secondaire Senonien.



2.2 Hydrogéologie

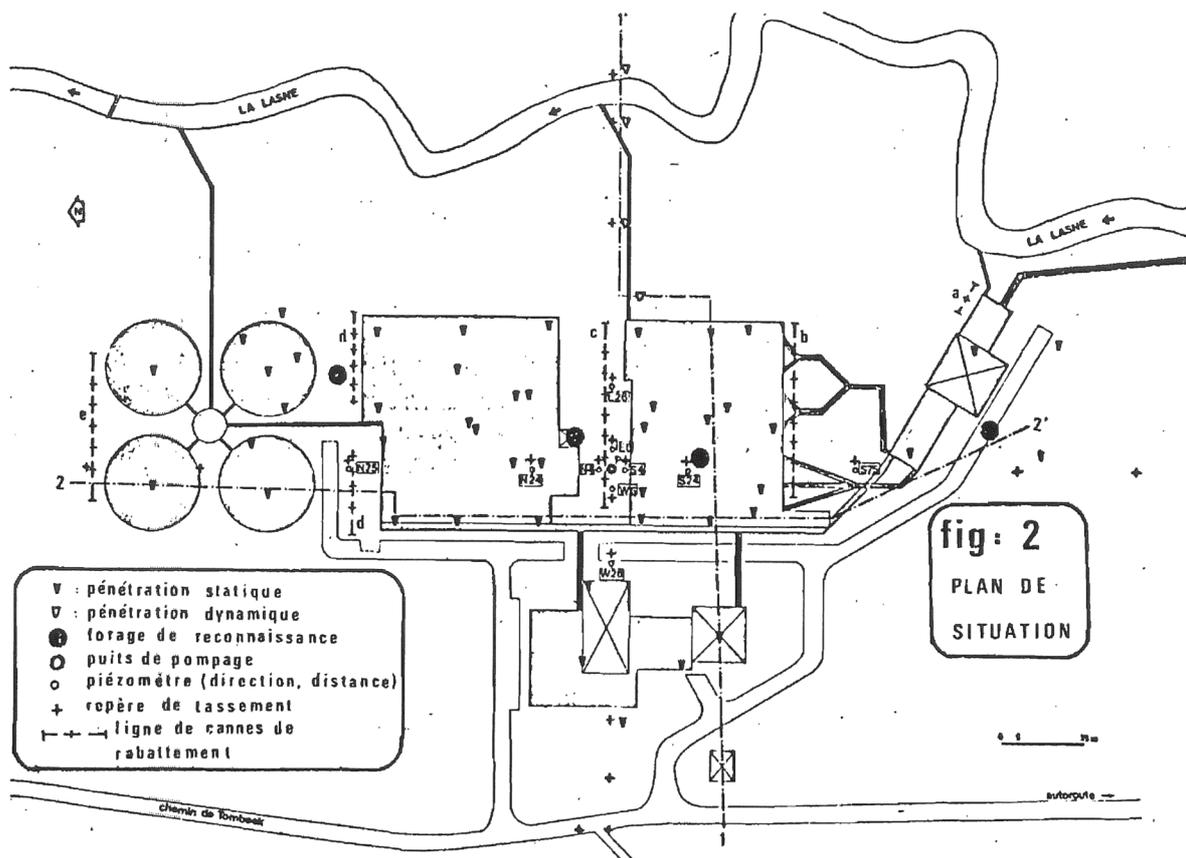
La nappe phréatique est rencontrée dans la vallée quasiment à la surface du sol. Cette nappe a un gradient important dans la direction transversale à la vallée et des sources intermittentes apparaissent sur les flancs.

Dans la couche sablo-graveleuse située à la base des alluvions, on a noté une nappe apparemment captive, dont le niveau piézométrique est sensiblement égal à celui de la nappe phréatique. Lors de la mise en place de certains piézomètres dans cette couche, on a remarqué un comportement légèrement artésien.

La nappe aquifère du Landénien n'a pas été reconnue dans le site étudié.

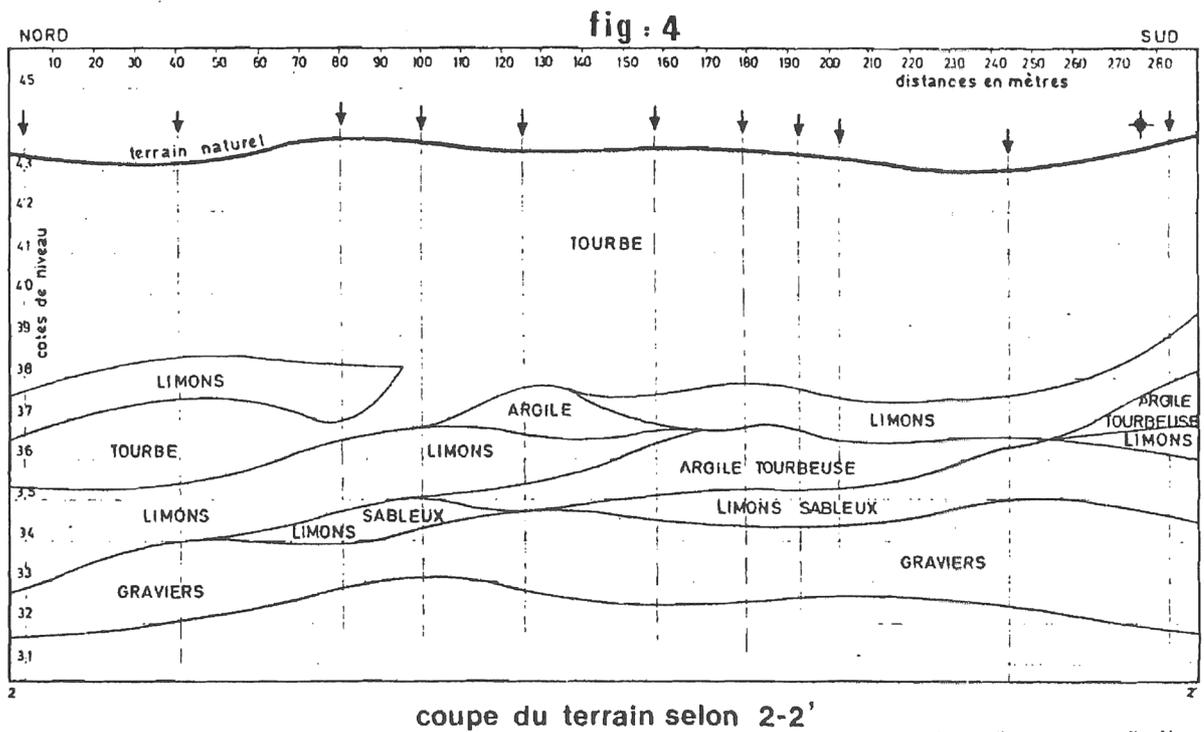
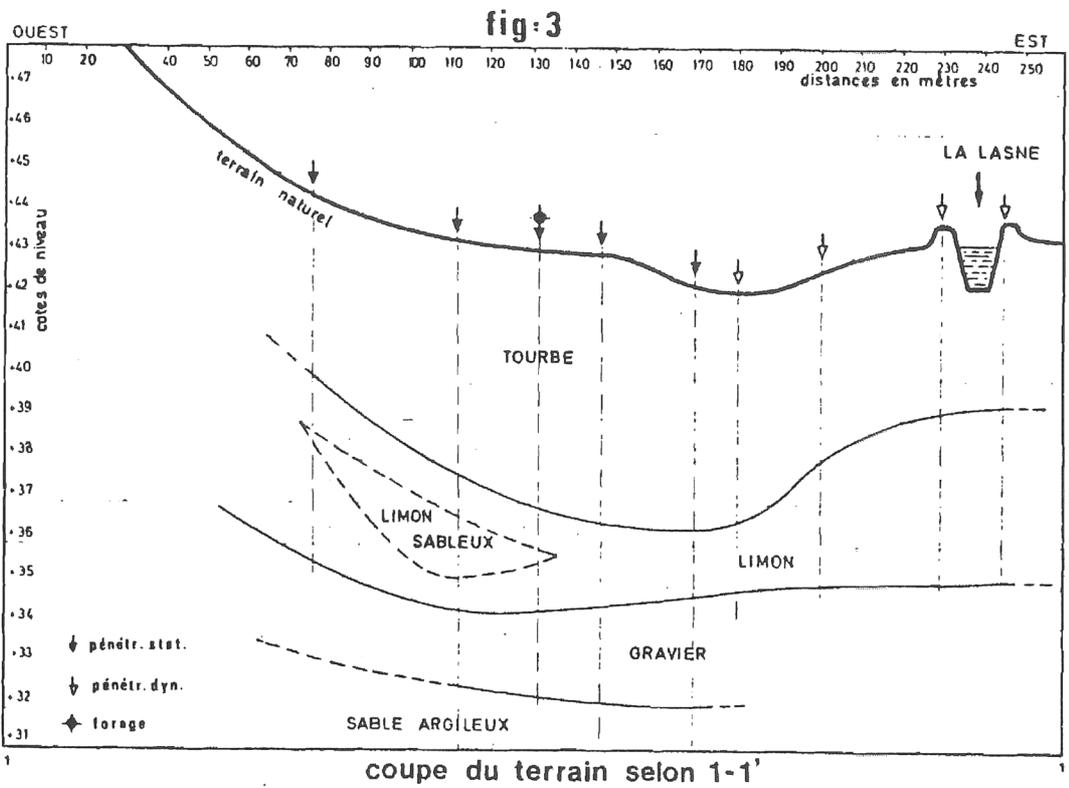
2.3 Géotechnique

La campagne d'essais géotechniques in situ a comporté, en plusieurs phases, l'exécution de 47 essais de pénétration statique au cône, 6 essais au pénétromètre dynamique léger et de 4 sondages avec prélèvements d'échantillons remaniés ou non, dont 2 sondages avec prélèvement d'un échantillon continu dans la tourbe. L'emplacement schématique de ces essais est repris sur le plan de situation à la figure 2.

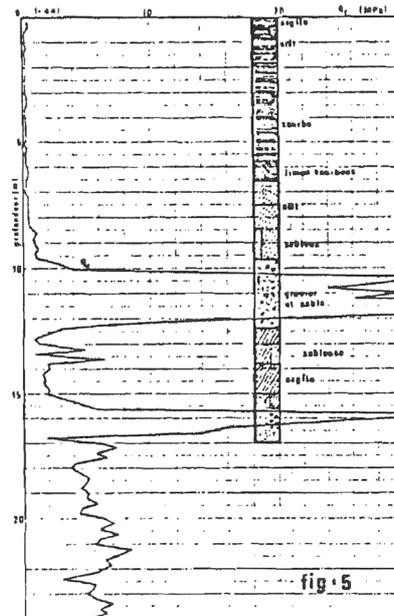


Beaucoup d'essais de pénétration statique ont atteint une profondeur de 20 à 25 m, soit en général 10 à 15 m sous la base de la couche sablo-graveleuse. Le forage le plus profond a atteint une profondeur de 17 mètres, soit environ la cote + 26.

Les figures 3 et 4 donnent l'interprétation géotechnique déduite des essais effectués (forage et essais de pénétration). La figure 3 est une coupe transversale à la vallée, la figure 4 une coupe quasi parallèle. On notera que la position actuelle de la rivière, bien que naturelle, ne se situe pas au centre de la vallée.



La figure 5 donne un profil pénétrométrique-type ainsi qu'une coupe-type d'un forage effectué à proximité.



3. Essais effectués

3.1 Etude du sol

En dehors de la reconnaissance géotechnique effectuée in situ, des échantillons remaniés et non remaniés ont été prélevés pour analyse. Celle-ci a permis de déterminer en laboratoire la granulométrie (sauf pour la tourbe), la teneur en eau, les limites de plasticité et de liquidité, les teneurs en matières organiques ou calcaires, le poids volumique naturel et sec, la perméabilité verticale et horizontale et la compressibilité.

Dans le tableau ci-dessous sont résumées les principales caractéristiques ainsi déterminées pour les couches principales (tourbe, limon, gravier et sable).

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques déterminées en laboratoire

Couche n° et nom	γ_n kN/m ³	n %	épais. m	w %	k_v m/s	k_h m/s	C	m_v m ² /N
1. Tourbe	11.7	85	6	> 400	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	5...10	$2,55 \cdot 10^{-6}$
2. Limon	18.6	40	2,5	± 25	$2 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}	40	$2,55 \cdot 10^{-7}$
3. Gravier et sable	$20,5^*$	30^*	2	?	$5 \cdot 10^{-5}^*$	$5 \cdot 10^{-5}^*$	250^*	?

où γ_n est le poids volumique naturel; n la porosité; w la teneur en eau en poids; k et k_v les coefficients de perméabilité verticale et horizontale, C la constante de compressibilité (loi de Terzaghi), m_v le coefficient de compressibilité volumétrique (loi de Terzaghi).

* Valeurs estimées.

D'autre part, des essais in situ ont été effectués en vue de déterminer la perméabilité du sol en place : essais Lefranc dans des piézomètres installés dans la tourbe, essais de pompage du type court (méthode de l'onde) ou du type long.

La détermination du niveau du sable graveleux à la base de la couche d'alluvions en dehors de la zone de construction, notamment près de la rivière, a été faite au moyen d'essais de pénétration dynamiques.

3.2 Essais de pompage

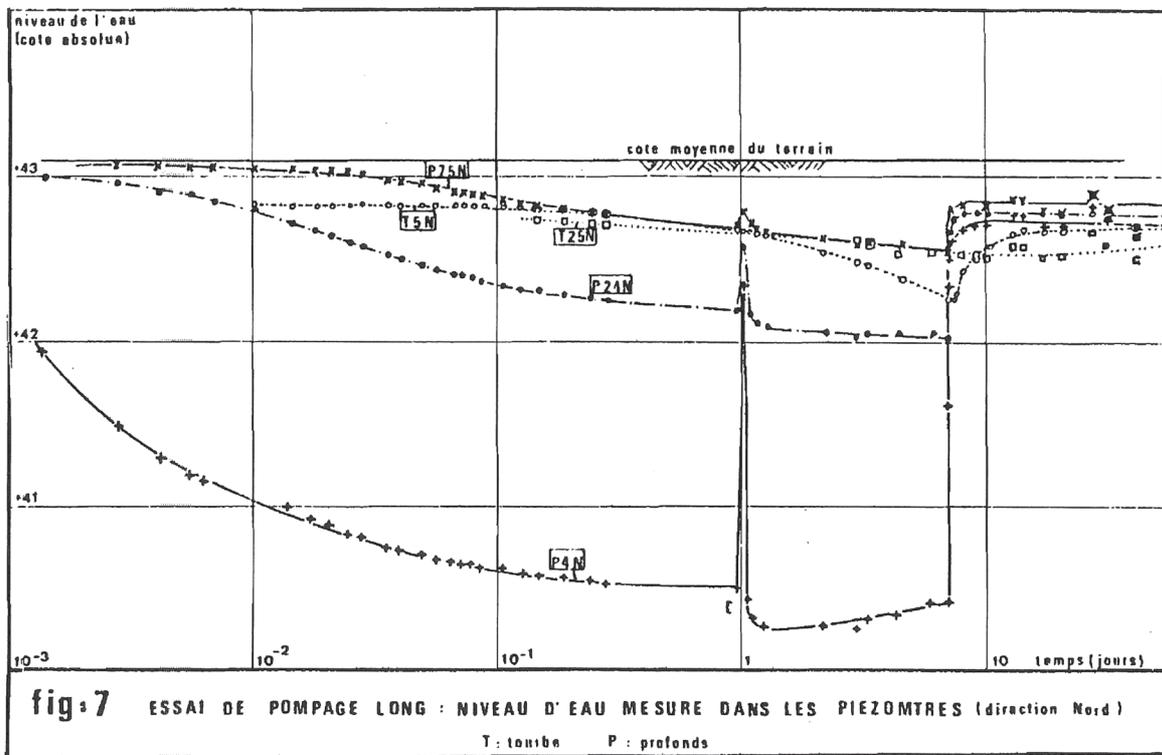
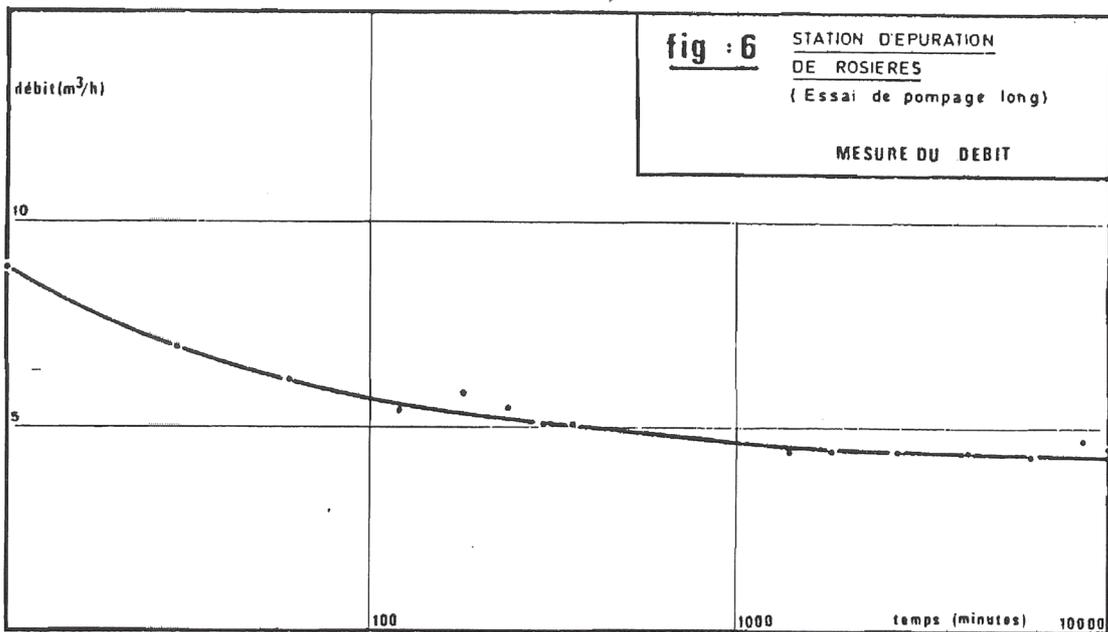
Pour déterminer les caractéristiques hydrologiques in situ, on a foré un puits de pompage d'un diamètre de 380 mm, de 14 m de profondeur (base vers + 29.00 DGN), dans lequel est installé un tuyau de 200 mm de diamètre, comportant à la partie inférieure une partie filtrante de 10 m de long. La pompe installée à la base a un débit nominal de 8 m³/h pour une hauteur de 18 m. Le tuyau de refoulement a un diamètre de 50,8 mm.

Autour de la pompe ont été placés 12 piézomètres ouverts profonds, de 32 mm de \emptyset intérieur, dans des forages lancés de 150 à 200 mm de \emptyset , comportant une partie filtrante de 2 m de haut à la base, située dans la couche sablo-graveleuse; un bouchon d'argile de 1 m de haut est placé au-dessus. Ces piézomètres sont installés dans les 4 directions principales (ouest, sud, est, nord) à des distances de la pompe allant de 4 m (pour le sud et le nord) ou 6 m (est et ouest), à 24 m (sud et nord) ou 26 m (est et ouest) et à 75 m (uniquement nord et sud) (voir figure 2). A côté de ces piézomètres profonds, ont été placés des piézomètres ouverts dans la tourbe : il s'agit de tubes de 19 mm de \emptyset intérieur, munis d'une partie filtrante de 1 m à la base, enfoncés de 4 à 5 m dans la tourbe.

L'essai de pompage long a duré 7 jours. Au cours de cet essai ont été notés régulièrement les niveaux dans tous les piézomètres, ainsi que les débits pompés.

La figure 6 donne le débit en fonction du temps, tandis que la figure 7 donne les variations de niveaux pour la direction nord et pour les différentes distances auxquelles des piézomètres étaient installés, soit dans la tourbe (piézomètres T5 et T25) et dans les couches perméables de sable graveleux (P4, P24 et P75) en fonction du temps, selon une échelle logarithmique. Les cotes indiquées sont des cotes DNG (terrain et niveaux d'eau).

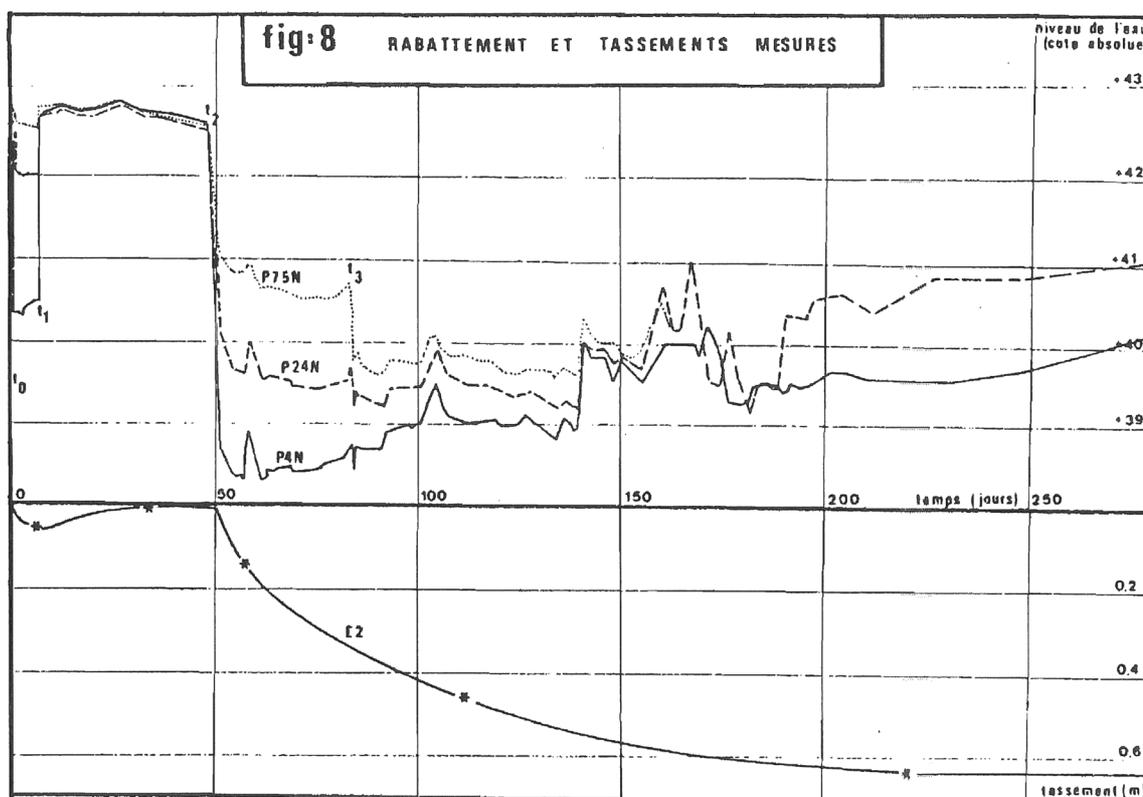
7 jours après l'essai de pompage du type long, on a procédé à une série de pompages courts selon la méthode de l'onde. La méthode de mesure consiste à faire fonctionner la pompe pendant un temps tel que l'on obtienne dans un piézomètre choisi un rabattement prédéterminé (p. ex. 0,50 m); dès que ce rabattement est atteint, on arrête la pompe mais le niveau de l'eau continue à descendre dans le piézomètre choisi, passe par un minimum (niveau stationnaire) et repasse par le niveau atteint lors de l'arrêt de la pompe (niveau de retour). On note le temps écoulé entre l'arrêt de la pompe et l'obtention du niveau de retour. La méthode permet d'obtenir directement la transmissivité de la couche et le coefficient d'emmagasinement. A titre d'exemple, dans le site étudié, les temps de pompage vont de 60 à 120 secondes et le temps total jusqu'à l'obtention du niveau de retour va de 120 à 1800 secondes, selon les distances et les directions, pour des rabattements allant de 0,5 m à 4 m de la pompe jusqu'à 0,1 m à 24 m de celle-ci.



3.3 Mesures de tassements

Pendant le pompage d'essai du type long et le rabattement, on a procédé à intervalles réguliers, à des mesures de tassements de la surface du sol.

La figure 8 donne le tassement du point E2 en fonction du temps. Les différents temps sont notés : t_0 , début de l'essai de pompage long; t_1 , fin de cet essai; t_2 , début du rabattement (lignes de cannes filtrantes a, b, c); accentuation du rabattement (lignes de cannes filtrantes e et d).



3.4 Rabattement

L'installation de rabattement, calculée d'après les résultats des essais de pompage, mise en place au début des travaux, est reprise au plan de situation de la figure 2. Il s'agit d'un ensemble de cannes filtrantes installées dans la couche sablo-graveleuse et implantées en fonction des fouilles à assécher; le but principal de ce rabattement est d'empêcher les sous-pressions d'eau de provoquer une instabilité du fond de fouille; les fouilles elles-mêmes sont asséchées par épuisement direct.

Pour chaque ligne de rabattement, le nombre de cannes placées est indiqué ci-dessous.

<u>Ligne n°</u>	<u>Nombre de cannes</u>
a	5
b	12
c	7
d	2 x 5
e	5

La figure 8 donne aussi une représentation des variations de niveaux d'eau mesurés dans les 3 piézomètres profonds P4, P24 et P75 de la direction nord, pendant toute la durée des travaux.

4. Interprétation des résultats des mesures

4.1 Paramètres hydrologiques

4.1.1 Perméabilité déterminée par les essais en laboratoire

Les perméabilités horizontale et verticale d'éprouvettes cylindriques consolidées sous 6, 10 et 20 kN/m² ont été déterminées au perméamètre à niveau variable. La perméabilité horizontale moyenne sous une charge verticale de 6 kN/m² est de 4.10⁻⁶ m/s dans la tourbe; elle est maximale vers 4 mètres de profondeur. Vers 7,5 mètres, on observe des valeurs 10 fois plus faibles. La perméabilité verticale dans la tourbe a une valeur moyenne de 2.10⁻⁶ m/s, tandis que dans la zone inférieure, contenant du limon et du sable argileux, elle est de 0,015.10⁻⁶ m/s, soit environ 100 fois moins élevée.

4.1.2 Perméabilité de la tourbe déterminée par essais Lefranc

Les mesures de perméabilité horizontale mesurée à partir d'essais du type Lefranc ont mis en évidence l'hétérogénéité de cette caractéristique locale du sous-sol, tant en profondeur qu'en plan. Sur les 5 premiers mètres investigués par cette technique, on a trouvé des valeurs de k_h oscillant de 2.10⁻⁸ à 1.10⁻⁶, voire localement 1.10⁻⁵ m/s. La moyenne des mesures donne pour l'ensemble des essais effectués dans la tourbe une valeur de 6.10⁻⁷ m/s.

4.1.3 Transmissivité T et coefficient d'emmagasinement S déterminés par essais de pompage

Les essais de pompages réalisés ont été interprétés par diverses méthodes; en ce qui concerne le pompage long, on a utilisé les méthodes de JACOB, THEIS, CHOW, l'analyse de la remontée, la méthode de THIEM-DUPOINT et celle de HANTUSH; en ce qui concerne les pompages courts, on a utilisé la méthode de l'onde.

Les résultats de ces interprétations sont repris au tableau 2.

L'interprétation selon DUPUIT, qui suppose la nappe captive et en régime permanent, permet de dégager une transmissivité comprise entre 0,5 et 2.10⁻⁴ m²/s. La méthode de JACOB, basée sur l'approximation logarithmique de la descente piézométrique d'une nappe captive en régime transitoire, donne une transmissivité nord-sud moyenne de 17.10⁻⁴ m²/s et un S de 4.10⁻⁵. Cette dernière valeur basse met en évidence le caractère dominant captif de la nappe rabattue.

Selon THEIS, par ajustement d'une courbe standard dans un diagramme bilogarithmique, on a des valeurs de T comprises entre 1,3 et $7,4 \cdot 10^{-4}$ m²/s et un S de 0,5 à $2 \cdot 10^{-3}$, ce qui contraste avec la valeur obtenue selon JACOB.

La méthode de CHOW, par tracé de tangente et interprétation à l'aide d'une abaque, permet de dégager des couples de valeurs de T et S qui, dans le cas présent, dépendent du point choisi pour tracer la tangente à la courbe de rabattement en fonction du logarithme du temps. Les valeurs T obtenues croissent avec le temps adopté et la distance du piézomètre par rapport à la pompe. Pour des valeurs de temps relativement faibles, on obtient $T = 2$ à $9 \cdot 10^{-4}$ m²/s et $S = 7$ à $0,4 \cdot 10^{-6}$, ce qui corrobore les valeurs selon THEIS.

La remontée piézométrique, examinée par l'approximation logarithmique, produit des valeurs de T comprises entre 1,5 et $4,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Le fait que les valeurs obtenues dépendent du temps choisi pour l'interprétation peut être attribué à la communication relative entre la nappe principale dans laquelle les rabattements se propagent et l'eau contenue dans les couches alluvionnaires supérieures. Cette communication résulte de l'abaissement du niveau piézométrique dans la couche de tourbe.

La méthode de HANTUSH a été menée en vue d'examiner l'hypothèse de la nappe semi-captive. Dans l'ensemble, les valeurs de T qui en ont résulté varient de 2 à $7 \cdot 10^{-4}$ m²/s et celles de S de 0,4 à $1,5 \cdot 10^{-3}$. Un paramètre supplémentaire déduit de cette analyse est la perméabilité verticale de la tourbe : 2 à $7 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Les essais de pompage rapide ont été interprétés par la méthode de l'onde : la transmissivité et le coefficient d'emménagement obtenus sont légèrement plus élevés que l'ensemble des résultats précédents : de 2 à $10 \cdot 10^{-4}$ m²/s pour T et de 0,5 à $4 \cdot 10^{-3}$ pour S.

4.1.4 Pour résumer l'ensemble des interprétations, on a les caractéristiques moyennes suivantes :

- pour la nappe captive :

$$\left. \begin{array}{l} T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \\ S = 10^{-3} \end{array} \right\} \text{ pour l'ensemble des méthodes,} \\ \text{sauf JACOB}$$

- pour l'horizon tourbeux :

$$\begin{array}{l} k_h = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m/s (Lefranc) et } 4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s (laboratoire)} \\ k_v = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s (Hantush) et } 2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s (laboratoire)} \end{array}$$

- pour l'épisode limoneux intermédiaire :

$$\begin{array}{l} k_h = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s (laboratoire)} \\ k_v = 0,08 \cdot 10^{-6} \text{ m/s (laboratoire)} \end{array}$$

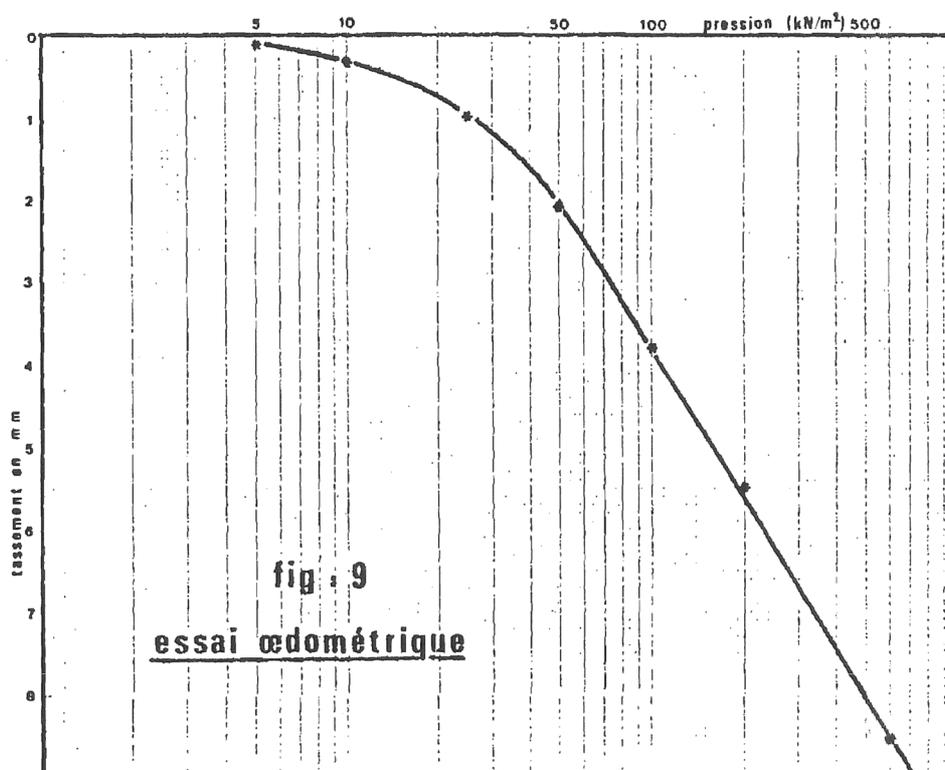
Tableau II - Comparaison des paramètres hydrologiques

Piézomètre	N4	N24	N75	S4	S24	S75	E6	E26	W6	W76
<u>Méthode</u>										
THIEM-DUPOUIT T		1.3 10 ⁻⁴			1.1 10 ⁻⁴		0.5 10 ⁻⁴		2.1 10 ⁻⁴	
JACOBS T		17 10 ⁻⁴			-		-		-	
S		4 10 ⁻⁵			-		-		-	
THEIS T	-	5.3 10 ⁻⁴	7.3 10 ⁻⁴	1.3 10 ⁻⁴	6.6 10 ⁻⁴	4 10 ⁻⁴	5.3 10 ⁻⁴	5.3 10 ⁻⁴	-	6.6 10 ⁻⁴
S	-	10 ⁻³	10 ⁻³	2 10 ⁻³	0.2 10 ⁻³	1.5 10 ⁻³	0.6 10 ⁻³	0.5 10 ⁻³	-	0.7 10 ⁻³
CHOW T	6.10 ⁻⁴	6.1 10 ⁻⁴	9 10 ⁻⁴	6.4 10 ⁻⁴	11 10 ⁻⁴	7.1 10 ⁻⁴	6.4 10 ⁻³	6.4 10 ⁻³	5.9 10 ⁻⁴	10 10 ⁻⁴
S	0.04 10 ⁻³	0.9 10 ⁻³	0.9 10 ⁻³	0.1 10 ⁻³	0.02 10 ⁻³	1.8 10 ⁻³	10 ⁻³	0.4 10 ⁻³	0.02 10 ⁻³	0.6 10 ⁻³
Remontée T	1.8 10 ⁻⁴	-	-	1.8 10 ⁻⁴	-	-	3.1 10 ⁻⁴	4.3 10 ⁻⁴	-	-
HANTUSH T	2 10 ⁻⁴	4.7 10 ⁻⁴	4.9 10 ⁻⁴	2.2 10 ⁻⁴	3.7 10 ⁻⁴	6.6 10 ⁻⁴	5.3 10 ⁻⁴	5.5 10 ⁻⁴	1.6 10 ⁻⁴	14 10 ⁻⁴
S	10 ⁻³	10 ⁻³	0.8 10 ⁻³	1.8 10 ⁻³	0.5 10 ⁻³	1.7 10 ⁻³	1.3 10 ⁻³	0.4 10 ⁻³	1.3 10 ⁻³	1.5 10 ⁻³
k _v	7 10 ⁻⁶	5 10 ⁻⁷	5 10 ⁻⁷	1.3 10 ⁻⁶	5 10 ⁻⁷	4 10 ⁻⁷	7 10 ⁻⁷	2 10 ⁻⁷	1.6 10 ⁻⁵	3 10 ⁻⁷
HOLEYMAN T	2.5 10 ⁻⁴	1 10 ⁻⁴	-	2.5 10 ⁻⁴	6 10 ⁻⁴	-	4 10 ⁻⁴	5 10 ⁻⁴	4 10 ⁻⁴	9 10 ⁻⁴
S	2.5 10 ⁻³	2 10 ⁻³	-	4.5 10 ⁻³	0.5 10 ⁻³	-	5 10 ⁻³	0.7 10 ⁻³	3 10 ⁻³	10 ⁻³

4.2 Paramètres géomécaniques

Les essais oedométriques réalisés dans la tourbe avec un doublement de la charge à chaque palier ne permettent pas de mettre en évidence la phase hydrodynamique. Sous charge constante, la compression de l'éprouvette se produit de façon linéaire en fonction du logarithme du temps avec une pente par décade de 0,015 ($C\alpha = \Delta\epsilon/\Delta\log t$), indépendante de l'amplitude de cette charge, dans la gamme des contraintes qui nous intéresse. Cette compression secondaire est suivie d'une phase de fluage tertiaire à partir d'environ 2 jours ($C\beta = \Delta\epsilon'/\Delta\log t \approx 0,030$).

Afin de mettre en évidence la phase hydrodynamique, il a été nécessaire d'appliquer des accroissements de charges 5 à 10 fois plus élevés. Cette opération a permis de dégager les valeurs du coefficient de consolidation, soit 0,4 à 0,8. 10^{-6} m²/s, tandis que l'on adoptait l'enfoncement correspondant à l'arrêt de la phase hydrodynamique pour obtenir la courbe des enfoncements en fonction du logarithme des pressions (figure 9). Cette courbe fait ressortir le caractère normalement consolidé de la tourbe ainsi qu'une valeur du coefficient de compressibilité de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-6}$ Pa⁻¹ dans la gamme de 0,5 à 1 MPa. Le caractère normalement consolidé est confirmé par la valeur de $C\alpha$, comprise entre 0,005 et 0,02 (selon Lambe et Withman, p. 420).



4.3 Evaluation des dangers de tassements

Dans les conditions d'un rabattement dans la couche aquifère, du fait de la grande hauteur d'ascension capillaire dans les alluvions tourbeuses et de plus, à cause de la couche de terre arable pouvant faire écran à un éventuel effet de vidange, on peut s'attendre à ce que ce rabattement se transmette intégralement en contrainte effective sur toute l'épaisseur des alluvions compressibles. Il en résulterait sur la couche d'alluvions prise égale en moyenne à 6 mètres, un tassement de 0,15 m par mètre de rabattement. Si l'on néglige cet effet de suction, cela ramène les tassements estimés à la moitié de cette valeur.

En ce qui concerne la prévision de l'évolution du tassement dans le temps, en faisant appel à la théorie de la consolidation de TERZAGHI, on devrait obtenir un tassement de 50 % du tassement final à 206 jours.

4.4 Observations sur site

Les variations piézométriques observées dans la couche aquifère lors du rabattement ont été en accord avec les prévisions établies à partir des paramètres adoptés d'après les essais de pompage. L'amplitude maximale du rabattement a été de 5 mètres pendant quelques dizaines de jours, pour ensuite diminuer lentement jusqu'à environ 3,5 mètres après une centaine de jours (figure 8).

L'évolution des tassements mesurés pendant le rabattement (figure 8) permet de confirmer l'importance des tassements. Cependant, ils semblent se produire de manière plus rapide que prévue par application de la théorie de Terzaghi.

Afin d'expliquer ce décalage, il a été fait appel à un schéma plus complexe : le cas représenté à la figure 10 suppose 6 m de tourbe (avec $m_v = 2,5 \cdot 10^{-6}$ m/N et $c_v = 4 \cdot 10^{-5}$ m²/s) en relation avec un abaissement piézométrique instantané de 5 mètres d'eau par l'intermédiaire de 2,5 mètres de limon ($m_v = 0,25 \cdot 10^{-6}$ m/N et $c_v = 4 \cdot 10^{-5}$ m²/s). Les isochrones du rabattement dans ces deux couches, calculées au moyen d'un programme ordinateur utilisant la méthode des différences finies, indiquent que le limon joue le rôle de filtre par rapport à la réserve d'eau contenue dans la tourbe qui se vide de manière plus uniforme. Il faut remarquer que pour le cas étudié les valeurs de k_v adoptées sont de 10^{-6} m/s dans la tourbe et 10^{-7} m/s dans le limon, valeurs inspirées des essais de perméabilité, ce qui suppose des valeurs du coefficient de consolidation 100 fois supérieures à celles obtenues dans l'essai oedométrique.

D'ailleurs, les observations confirment ce schéma de deux manières. D'une part, l'évolution du niveau piézométrique en fonction du temps, observé dans la tourbe à proximité de l'endroit du rabattement maximum (figure 11) correspond assez bien à celle que l'on obtient à une profondeur de 5 mètres dans ce schéma. On peut remarquer au passage que dans ce cas, la profondeur d'implantation du piézomètre n'est pas aussi déterminante que l'on aurait pu le penser à première vue. D'autre part, l'évolution des tassements mesurés en fonction du temps indique la bonne concordance avec les valeurs calculées (figure 12). Le décalage de la courbe observée (point E2 situé à 2 mètres du puits dans la direction est) par rapport à la courbe théorique peut être expliqué par le fait que le rabattement n'a pas été maintenu constant à 5 m, ainsi que le suppose le calcul. On notera que le tassement tracé en fonction du logarithme du temps est assez difficile à extrapoler étant donné son arrêt assez brutal (ralentissement notable du rabattement à partir de 10^7 secondes).

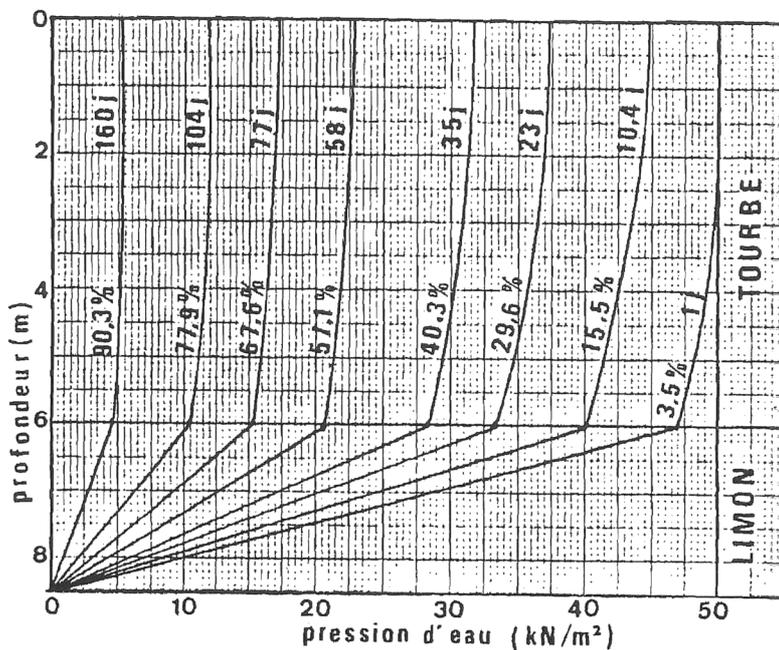
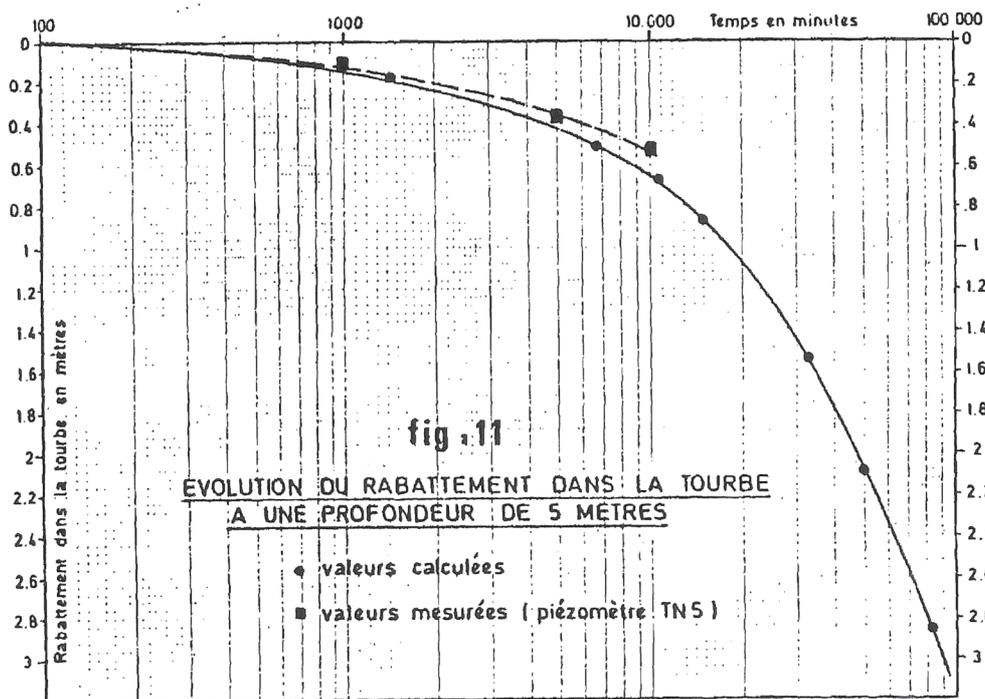
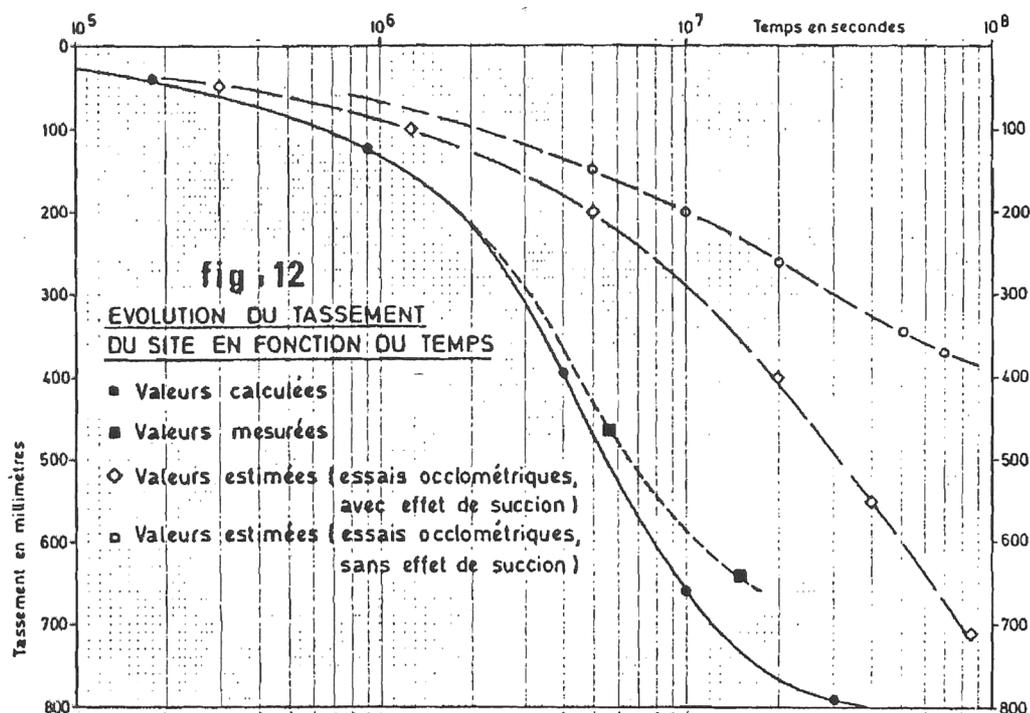


fig:10 ISOCHRONES DANS LA TOURBE ET LE LIMON D'UN RABATTEMENT DE 5 m.





5. Conclusions

Les déterminations de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement de différentes manières à partir d'essais de pompage sont assez convergentes. En particulier, la méthode de l'onde a pu être utilisée avec succès étant donné le caractère captif à court terme de la nappe principale.

Pour l'estimation des tassements dus au rabattement en zone alluvionnaire, il s'est avéré utile dans le cas exposé

- . de mettre en évidence la phase hydrodynamique de la consolidation lors des essais oedométriques (avec grands accroissements de charge éventuellement);
- . d'adopter des valeurs de la compressibilité à partir de cet essai;
- . de calculer le coefficient de consolidation à partir de cette première mesure et d'essais de perméabilité de préférence in situ;
- . de faire intervenir par un calcul complet les formations jouant tampon entre les alluvions compressibles et la couche aquifère;
- . de considérer la succion pour le calcul de l'accroissement des contraintes.

6. Remerciements

L'étude décrite constitue une partie d'un programme de recherches sur le tassement des constructions suite au rabattement de la nappe aquifère, effectué par le Centre Scientifique et Technique de la Construction, subsidié par l'Institut pour l'encouragement de la Recherche dans l'Industrie et l'Agriculture.

Les auteurs remercient particulièrement M. Vanden Eynde, collaborateur du C.S.T.C. lors de la recherche, ainsi que les entreprises François et Fils, et particulièrement MM. Mordant et Lombard, pour leur coopération.

7. Bibliographie

TERZAGHI, K. (1951). Mécanique théorique des sols. Dunod. Paris.

KRUSEMAN, G.P. et DE RIDDER, N.A. (1974). Interprétation et discussion des pompages d'essai. Bulletin 11 F. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. Pays-Bas.

LAMBE, T.W. et WHITMAN, R.V. (1979). Soils mechanics, SI version. Ed. John Wiley & Sons. New-York.

HOLEYMAN, A. (1980). Théorie de la méthode de l'onde. Compte rendu d'étude et de recherche n° 25. Centre Scientifique et Technique de la Construction. Bruxelles.
