

Mesure directe de l'inféro-flux

Application au mayo Tsanaga

R. LEFEVRE

Ingénieur hydrologue de l'O.R.S.T.O.M.,
Directeur du Centre O.R.S.T.O.M. de Yaoundé (Cameroun).

G. DELFIEU

Hydrologue du Centre O.R.S.T.O.M. de Yaoundé.

RÉSUMÉ.

Dans l'étude du bilan de l'eau d'un bassin où l'écoulement des rivières est intermittent, il peut être intéressant de voir quelle est l'importance de l'écoulement souterrain dans le lit alluvionnaire par rapport aux écoulements superficiels.

Le présent rapport rend compte de la méthode qui a été utilisée sur un mayo intermittent du Cameroun septentrional et des résultats obtenus qui, bien qu'imprécis, permettent d'approcher le problème.

ABSTRACT.

In the water balance's study of a watershed with intermittent runoff, the part of the ground runoff in the alluvial channel in comparison with the surface runoff is worth knowing. The present paper shows the using method on an intermittent mayo of septentrional Cameroon and the results, in spite of their lack of precision, provide an approach of the problem.

SOMMAIRE

1. *Méthodologie.*
 - 1.1. Mesure de la vitesse.
 - 1.1.1. Technique de l'injection.
 - 1.1.2. Mesure des variations de salinité.
 - 1.1.3. Détermination du temps d'arrivée du sel.
 - 1.2. Mesure de la section utile.
 - 1.2.1. Détermination de la section mouillée.
 - 1.2.2. Mesure de la porosité efficace.
2. *Résultats.*
 - 2.1. Régime du mayo Tsanaga.
 - 2.2. Mesure de la vitesse de l'inféro-flux du mayo Tsanaga.
 - 2.3. Mesure de la section.
 - 2.4. Mesure de la porosité.
 - 2.5. Débit souterrain du mayo Tsanaga.

1. MÉTHODOLOGIE.

1.1. MESURE DE LA VITESSE DE L'INFÉRO-FLUX.

La vitesse apparente des nappes d'inféro-flux peut être calculée par la formule de DARCY si l'on connaît

le coefficient de perméabilité et la pente. L'hydrologue préfère mesurer la vitesse réelle directement dans la couche aquifère au moyen de traceurs. Il s'agit de calculer le temps mis par le traceur pour aller d'un point à un autre. Le traceur peut être chimique, facilement soluble et repérable par des réactions chimiques ou par des mesures de conductivité électrique ; on peut également utiliser des traceurs radio-actifs.

La méthode que nous avons employée consiste à suivre la propagation d'un écran salé : on injecte en P une solution de sel de cuisine et en deux points A et B, situés à l'aval du point d'injection, on repère électriquement le passage du sel.

Le sel ayant la propriété d'abaisser la résistivité de l'eau, cette dernière mesure s'effectue avec un pont de Kohlrauch.

À partir des courbes de variations de la salinité en A et B, on détermine le temps de passage du sel de A en B et, par suite, la vitesse de l'inféro-flux.

Cette opération n'est pas aussi simple qu'elle apparaîtrait au premier abord ; et à tous les stades, des difficultés surgissent :

- à l'injection de P ;
- à la mesure des variations de salinité en A et B ;
- à la détermination, sur les courbes de salinité, du temps d'arrivée du sel.

1.1.1. *Technique de l'injection.*

Après de nombreux tâtonnements sur la méthode à utiliser pour injecter un volume défini d'eau salée dans la nappe, on a retenu la solution suivante qui semble avoir donné les résultats les meilleurs.

Un pieu métallique creux dont l'extrémité inférieure pointue comporte plusieurs fentes transversales est enfoncée à la masse dans le sable, la profondeur des ouvertures étant fonction de la profondeur à laquelle on veut déterminer la vitesse de l'inféro-flux.

Un deuxième tube de section inférieure dont on a obturé l'extrémité inférieure par un sac en plastique est aussitôt introduit dans le pieu.

Cette opération est faite plusieurs heures avant la mesure de façon à ce que le milieu reprenne son équilibre naturel.

Au moment de l'injection, le liquide salé est versé dans le tube intérieur et le sac en plastique est crevé au moyen d'une longue aiguille.

Cette méthode a été essayée avec succès jusqu'à une profondeur de 2 m.

Quelle quantité d'eau salée doit-on injecter et quelle doit en être la concentration ?

Au début, on versait un volume d'eau salée trop grand et trop fortement concentré. Il semble que le volume optimal soit de 0,5 à 1 l avec une concentration de 100 g de sel par litre.

Il est évident que pour éviter le phénomène de succion et par suite un ralentissement de l'écoulement, le pieu d'injection doit être laissé en place pendant toute la durée de la mesure.

Afin d'augmenter les chances d'observer à l'aval le passage de l'écran salé, on doublait fréquemment le nombre des pieux pour les injections profondes et le système que l'on a adopté à la fin comprenait toute une batterie de pieux d'injection :

- 1 pieu 50 × 60 à la profondeur de 20 cm ;
- 1 pieu 50 × 60 à la profondeur de 80 cm ;
- 2 pieux 20 × 27 à la profondeur de 140 cm ;
- 2 pieux 20 × 27 à la profondeur de 200 cm.

La méthode d'injection par pieu était employée lorsque la distance entre les sondes de mesure de la salinité était faible, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

Pour les mesures sur grande distance, entre 15 et 20 m et lorsque seule la vitesse de surface de la nappe

était à mesurer, on a creusé une tranchée transversale de 4 m et, plusieurs heures après, une quarantaine de litres de solutions à 200 g de sel par litre a été versée dans cette tranchée. Les lignes de courant étaient perturbées par cet apport, mais les observations duraient plusieurs jours, et lorsque l'écran salé franchissait le premier rideau de sondes, l'écoulement était redevenu normal, ce qui était confirmé par les temps de passage aux deuxième et troisième rideaux.

1.1.2. Mesure des variations de salinité.

- Deux méthodes ont été successivement employées :
 - par sonde annulaire ;
 - par sonde non isolée.

Ces deux appareils sont reliés à un pont de Kohlrausch. Nous décrirons ces deux méthodes bien que nos préférences aillent à la seconde qui exige un matériel très simple d'un emploi facile.

La sonde annulaire est identique à celle que M. ROCHE a utilisée dans l'Air en 1964. Au bout d'un tube 20 × 27, se visse une pointe en laiton terminée par un axe fileté. Trois anneaux en matière isolante séparent deux anneaux en laiton de diamètre intérieur plus grand. Deux fils électriques soudés à chacune de ces électrodes, traversent le tube dans toute sa longueur pour aboutir au pont de mesure (fig. 1).

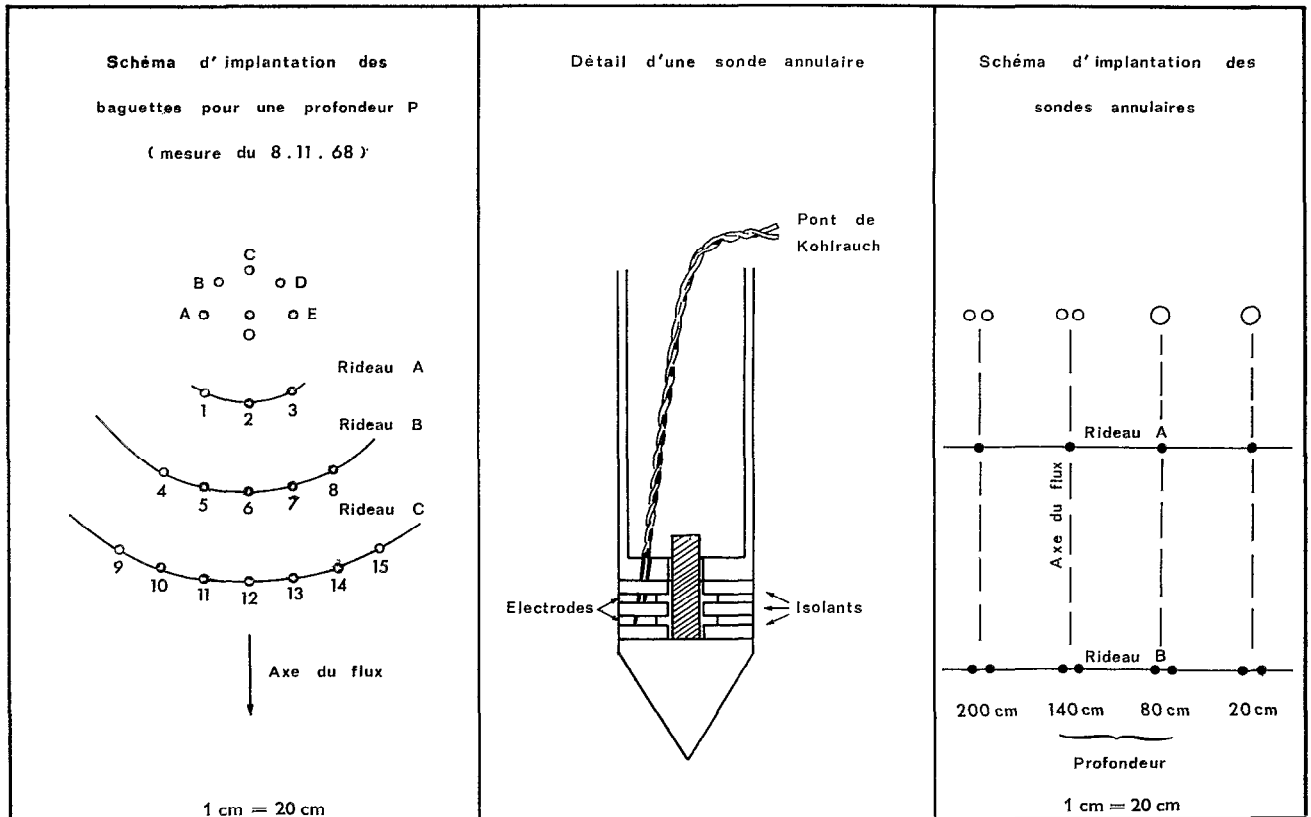


Fig. 1.

La mise en place de ces sondes annulaires, au moyen d'une masse, peut causer des dommages à la pointe de mesure, en particulier aux anneaux isolants pour lesquels nous n'avons pu nous procurer une matière suffisamment résistante. Un deuxième inconvénient provient du fait que des dépôts de sels peuvent rester sur les anneaux, provoquant un court-circuit ; ceci nous oblige après chaque mesure à desserrer la pointe et à nettoyer à l'eau courante l'extrémité du tube.

L'implantation de ces sondes s'effectue suivant un schéma identique pour chaque mesure. A 30 cm en aval du pieu d'injection, une sonde permet de déceler le passage de l'écran salé au point A. Une deuxième sonde B est enfoncée à 50 cm en aval de A et la vitesse de l'inféro-flux est mesurée sur la distance A B.

En réalité, le parcours de l'eau dans la nappe n'est pas rectiligne et il peut arriver que la solution salée ne touche pas les électrodes ; ceci nous a amené à doubler les sondes en particulier celles situées le plus à l'aval.

Pour une mesure classique de la vitesse à quatre profondeurs différentes, on aboutit au schéma d'installation de la figure 1 qui nécessite l'utilisation de 12 sondes, sans compter les sondes témoins situées en amont et selon la traverse des points d'injection.

La deuxième méthode utilise une électrode isolée, en l'occurrence une baguette de soudure en laiton de 2 mm de diamètre environ. Cette tige époincée s'enfonce très facilement dans le sable même à 2 m de profondeur. Pour une profondeur d'injection

donnée, on enfonce un premier rideau de baguettes à 20 cm en aval du pieu d'injection. Les baguettes sont disposées suivant un arc de cercle, à 10 cm les unes des autres ; leur profondeur est supérieure à celle de l'injection de façon à déceler le passage salin même si celui-ci suit une pente supérieure à la pente superficielle de la nappe.

Vingt centimètres plus en aval, on place de la même façon un deuxième rideau de baguettes. En mesurant la résistivité entre les baguettes 1 et 2, 2 et 3, puis 3 et 4, on déterminera le temps et le point de passage de la concentration la plus élevée pour le rideau A. En procédant de même pour le rideau B, on obtiendra la durée du trajet A B et, également, la direction de marche de l'écran salé. Si l'on ne désire que la durée du trajet, les mesures de résistivité pourront être réduites en mettant en parallèle les couples de baguettes :

— 1-2 et 2-3 pour le rideau A ;

— 4-5, 5-6, 6-7 et 7-8 pour le rideau B.

On n'aura plus que deux mesures à effectuer, l'une pour A, l'autre pour B. Il est cependant recommandé de mettre un troisième rideau C et de calculer également la vitesse sur B C.

La recherche de la direction de l'inféro-flux est surtout intéressante lorsque la mesure de la vitesse s'effectue sur une grande distance.

Ainsi, lorsque nous avons opéré avec 3 ou 4 rideaux distants respectivement de 5, 10 et 15 ou 20 m, chaque rideau comprenait de 5 à 8 couples de baguettes éloignés d'un mètre environ l'un de l'autre (graphique 2).

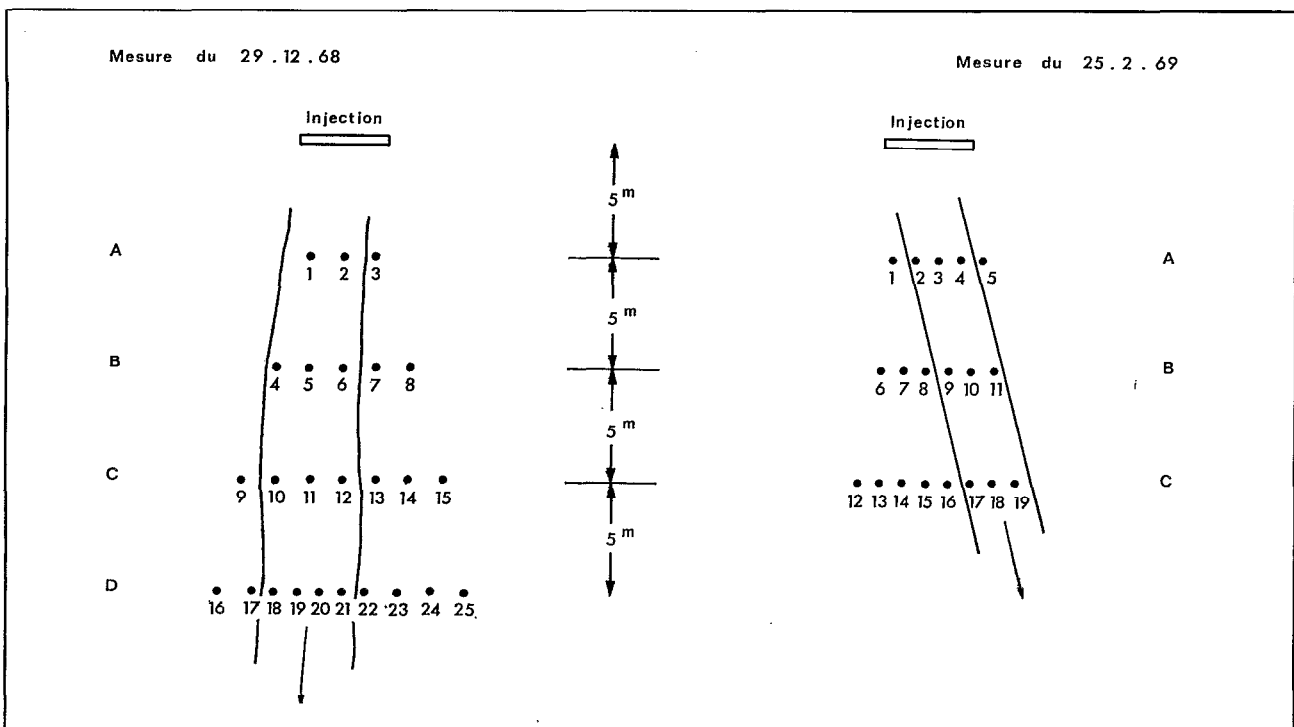


Fig. 2. — Schéma d'implantation des sondes.

1.1.3. Détermination du temps d'arrivée du sel.

Les lectures de la résistivité effectuées au pont de Kohlrausch sont reportées sur un graphique afin de mieux déterminer l'heure d'arrivée de l'écran salé à chacun des rideaux de mesures.

Sur la courbe ainsi obtenue, le temps de passage pourra être calculé, soit en prenant les valeurs minimales de résistivité, soit en choisissant les points d'inflexion de la courbe descendant.

Cette deuxième solution est dans la plupart des cas, la meilleure car il y a, bien souvent, incertitude pour le passage du minimum.

Ainsi, dans le cas de la mesure du 12 novembre 1966 (graphique 3), le minimum est bien net pour les sondes amont 10 cm, il l'est beaucoup moins pour la sonde aval 10 cm.

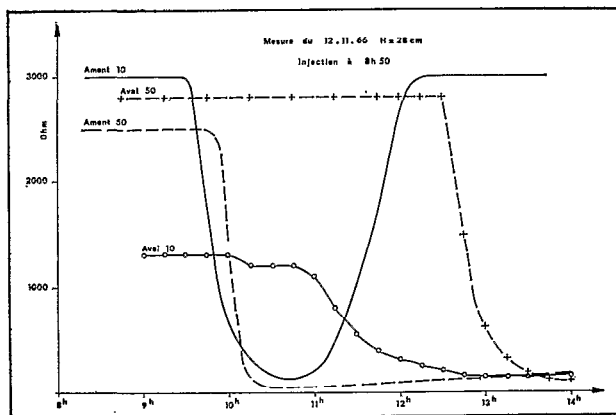


Fig. 3. — Variation de la résistance des sondes.

1.2. MESURE DE LA SECTION UTILE.

Le volume d'eau de la nappe dont on a mesuré la vitesse d'écoulement par un des procédés décrits plus haut doit être déterminé pour que l'on puisse calculer le débit de l'inféro-flux d'une rivière. Alors que, pour l'eau de surface, il suffit d'avoir le profil en travers du cours d'eau pour obtenir la section mouillée, dans le cas de l'inféro-flux il faut mesurer la section mouillée du lit que l'on corrigera par la porosité efficace des alluvions sableux.

1.2.1. Détermination de la section mouillée.

La section mouillée de la nappe d'inféro-flux peut se mesurer au moyen d'une sondeuse ou d'une tarière. Un certain nombre de verticales permettra comme pour un jaugeage classique d'avoir le relevé de la limite inférieure de la nappe.

1.2.2. Mesure de la porosité efficace.

Le volume d'eau, contenu dans les sables de la rivière, est fonction du matériau, donc de la porosité de ces grains de sable. La porosité est constituée par l'ensemble des vides contenus dans le sable et dépend

de la diversité de taille et du tassement des grains de sable ; cependant, la détermination de la porosité totale ne donne pas la valeur de la masse d'eau qui coule dans les alluvions, on doit en effet faire la distinction entre plusieurs catégories d'eau.

L'eau qui constitue une nappe est dite de saturation en ce sens que tous les vides entre les grains de sable sont occupés par l'eau (porosité totale).

L'eau de saturation se décompose en eau de rétention qui peut être retenue contre la gravité (capacité capillaire) et en eau de gravité qui s'échappe librement du terrain (porosité efficace). La porosité efficace qui ne représente qu'une faible portion de la porosité totale est assez délicate à mesurer.

La méthode que nous avons utilisée dans le Nord-Cameroun consiste tout d'abord à prendre un échantillon de sable dont on mesure le volume exact. Pour cela on creuse une tranchée et on prend l'échantillon dans la frange capillaire juste au-dessus de la nappe en enfonçant horizontalement dans le sable un cylindre aux bords biseautés dont le fond est percé de trous.

Le volume V_1 de sable prélevé sera égal au volume intérieur du cylindre ; comme il a été pris dans la couche de sable encore humectée, on peut estimer qu'il possède l'eau de rétention.

Pour mesurer l'eau de gravité, il suffit de faire tomber lentement le sable du cylindre dans une éprouvette remplie d'eau. Le volume V_2 de l'eau qui a débordé correspond au volume de sable et de l'eau de rétention. L'eau de gravité sera égale à $V_1 - V_2$.

2. RÉSULTATS OBTENUS.

La méthode exposée au chapitre précédent pour la détermination du débit d'inféro-flux a été appliquée dans le Cameroun septentrional au cours de deux campagnes de saison sèche.

Nous avons choisi pour cette étude, le mayo Tsanaga dont nous résumons ci-après les caractéristiques.

2.1. RÉGIME DU MAYO TSANAGA.

La Tsanaga prend naissance dans le massif montagneux des Mandara, sa pente est forte, son cours est torrentiel avant de déboucher dans la plaine alluviale où son bassin n'est plus qu'une bande de quelques kilomètres de large. La pente devient faible, les méandres sont prononcés et finalement les eaux du mayo se répandent dans les plaines ou yaérés qui bordent le Logone.

La station de Maroua où nous avons effectué nos mesures est située dans la plaine alluviale avant que la dégradation hydrographique ne soit observée.

Le bassin d'une superficie de 830 km², reçoit annuellement de 800 à 900 mm de pluie. L'écoulement du mayo Tsanaga est permanent de juillet à octobre ; les principales crues présentent un débit maximal d'une centaine de mètres cubes seconde, elles atteignent parfois 300 m³/s. Le module est de 5 à 7 m³/s et le coefficient d'écoulement varie de 20 à 30%.

2.2. MESURES DE LA VITESSE DE L'INFÉRO-FLUX DU MAYO TSANAGA A MAROUA.

Toutes les mesures de vitesse ont été effectuées au droit de l'échelle limnimétrique à quelques dizaines de mètres en amont du pont.

Nous aurions dû effectuer plusieurs séries de mesures en différents points du profil en travers pour diverses hauteurs d'eau de la nappe. Cependant, comme le but était plus de trouver une méthode valable que de faire le bilan de l'inféro-flux, seules deux ou trois verticales, tantôt au premier tiers, côté rive gauche, tantôt au premier tiers, côté rive droite, ont été effectuées.

Au cours de deux campagnes de saison sèche, 1966-1967 et 1968-1969, 29 mesures de vitesses ont été effectuées. Nous en décrivons quelques-unes.

Mesure du 12 novembre 1966

A 30 cm en aval du pieu d'injection, nous avons disposé un premier rideau A de 3 sondes annulaires dont les électrodes sont enfoncées respectivement à 10, 50 et 100 cm dans la nappe. Un deuxième rideau B composé également de 3 sondes est implanté aux mêmes profondeurs et à 50 cm en aval du rideau A. Enfin, on installe une sonde témoin à 30 cm en amont du pieu d'injection. L'injection de 10 l de solution NaCl à 200 g/l a lieu à 8 h 50 dans un seul pieu que l'on remonte lentement. Les mesures de résistance sont effectuées aux 7 sondes jusqu'à 14 h, à raison d'une mesure toutes les 15 mn. Sur le graphique 3, nous avons reporté les valeurs lues au pont de Kohlrausch pour les sondes situées à 10 et à 50 cm de profondeur. La résistance des sondes — 100 cm n'a pas varié durant toute la mesure : on peut en conclure que l'injection à 100 cm n'a pas été bonne ou que l'écran salé n'a pas touché les bornes des sondes amont et aval.

L'absence de variation de la résistance à la sonde témoin est également significative.

Les sondes amont 10 cm et 50 cm du rideau A ont bien réagi et on peut estimer l'arrivée du nuage salé à 10 h et 10 h 15 mn. Le passage à la sonde aval 50 cm est très facile à déterminer, 13 h, tandis que la décroissance de la résistance de la sonde aval 10 cm dure 2 h, le point d'inflexion se situant vers 11 h 30 mn. On en déduit des vitesses de :

- 33 cm/h à la profondeur 10 cm ;
- 18 cm/h à la profondeur 50 cm.

Il est à noter que seule la sonde amont 10 cm ne garde pas trace de sel sur ses électrodes puisque la résistance à 12 h est identique à celle que l'on a mesurée avant le passage de la solution salée.

Mesure du 23 décembre 1966

La nappe est à 61 cm de profondeur et le dispositif de mesures est sensiblement analogue à la mesure ci-dessus ; mais les sondes annulaires 100 cm sont doublées et un couple de sondes supplémentaires est enfoncé à la profondeur 150 cm.

L'injection de 8 l de solution salée à 100 g/l de 8 h à 8 h 10 mn semble bonne sur toute la hauteur du pieu qui est retiré sans difficulté.

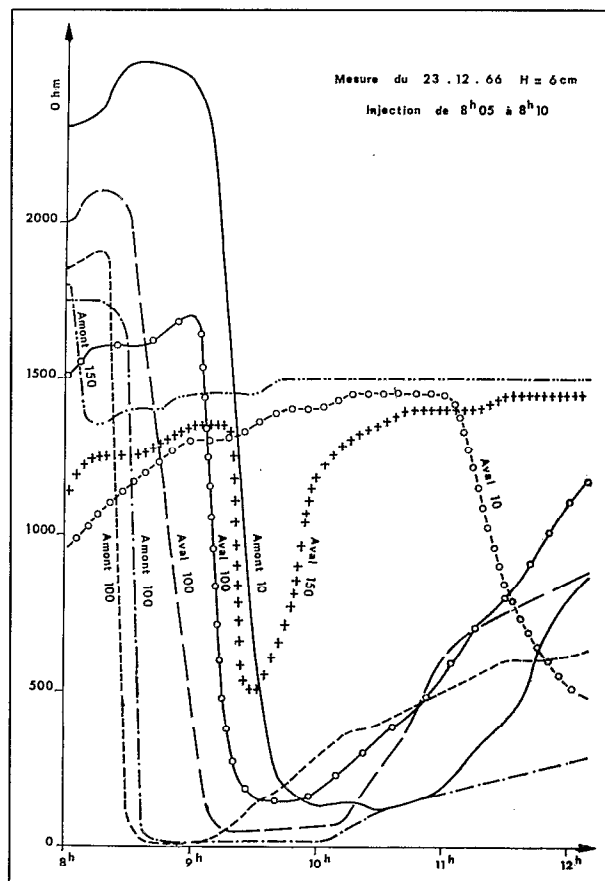


Fig. 4. — Variation de la résistance des sondes.

Sur la figure 4, les variations des sondes 50 cm n'ont pas été portées, seule la sonde amont ayant réagi au passage de l'écran de sel. On obtient les temps de passage suivants :

Profondeur	Rideau A	Rideau B
10	9 h 20 mn	11 h 20 mn
50	9 h 15 mn	11 h 20 mn
100	8 h 25 mn	8 h 50 mn
100	8 h 35 mn	9 h 15 mn
150	8 h 05 mn	9 h 20 mn

(Le minimum de résistance à la sonde 150 amont s'observe quelques minutes après l'injection. On suppose que la sonde amont a été enfoncée obliquement et le temps de passage du sel sera déterminé avec la sonde aval) d'où les vitesses :

- 25 cm/h à la profondeur 10 cm ;
- 25 cm/h (estimée) à la profondeur 50 cm ;
- 120 et 75 cm/h à la profondeur 100 cm ;
- 66 cm/h à la profondeur 150 cm.

Mesure du 8 novembre 1968

Pour cette mesure nous avons employé des baguettes non isolées enfoncées de 30 cm alors que l'injection a lieu à 10 cm de profondeur. L'implantation des sondes, représentée sur la figure 1 comporte 3 rideaux espacés de 20 cm, chaque rideau ayant 3, 5 et 7 sondes disposées sur un arc de cercle à 10 cm d'intervalle. Cinq sondes témoins situées en demi-cercle en amont du pieu d'injection complètent le dispositif. Les mesures de résistance des couples de baguettes, qui se font également au pont de Kohlrauch, sont consignées dans le tableau I et les résultats des sondes qui ont réagi sont reportés sur la figure 5.

Pour le premier rideau, les variations des couples 1-2 et 2-3 sont nettes et on prendra 8 h 20 mn et 8 h 30 mn comme temps de passage. Deux couples de sondes seulement ont détecté le passage de l'écran salé au deuxième rideau qui est à 8 h 40 mn pour le couple 5-6 et à 8 h 50 mn pour le couple 6-7. Au troisième rideau, on peut mesurer le temps à deux des six couples, 11-12

et 12-13, mais les variations de la résistance sont plus lentes qu'en amont et par suite l'arrivée du sel est plus grossière. Le minimum est estimé à 9 h et à 9 h 10 mn.

On trouve ainsi un temps de passage de 20 mn entre les rideaux qui sont espacés de 20 cm. d'où une vitesse de 60 cm/h.

Au cours de cette expérience, nous avons également utilisé la méthode de SLICHTER (cf. « les eaux souterraines », de H. SCHOELLER), en observant le déplacement de l'écran salé du puits d'injection aux divers rideaux de sondes. Pour cela, nous avons mesuré les variations de résistance aux couples 0-2, 2-6 et 6-12 qui sont reportés sur le graphique n° 5. Les variations sont moins nettes que si l'on procède en mesurant les variations aux différents points des rideaux.

On trouve respectivement des temps de 15 mn et 20 mn entre les minimums des 3 courbes d'où une vitesse de passage du sel sensiblement identique à celle déterminée plus haut.

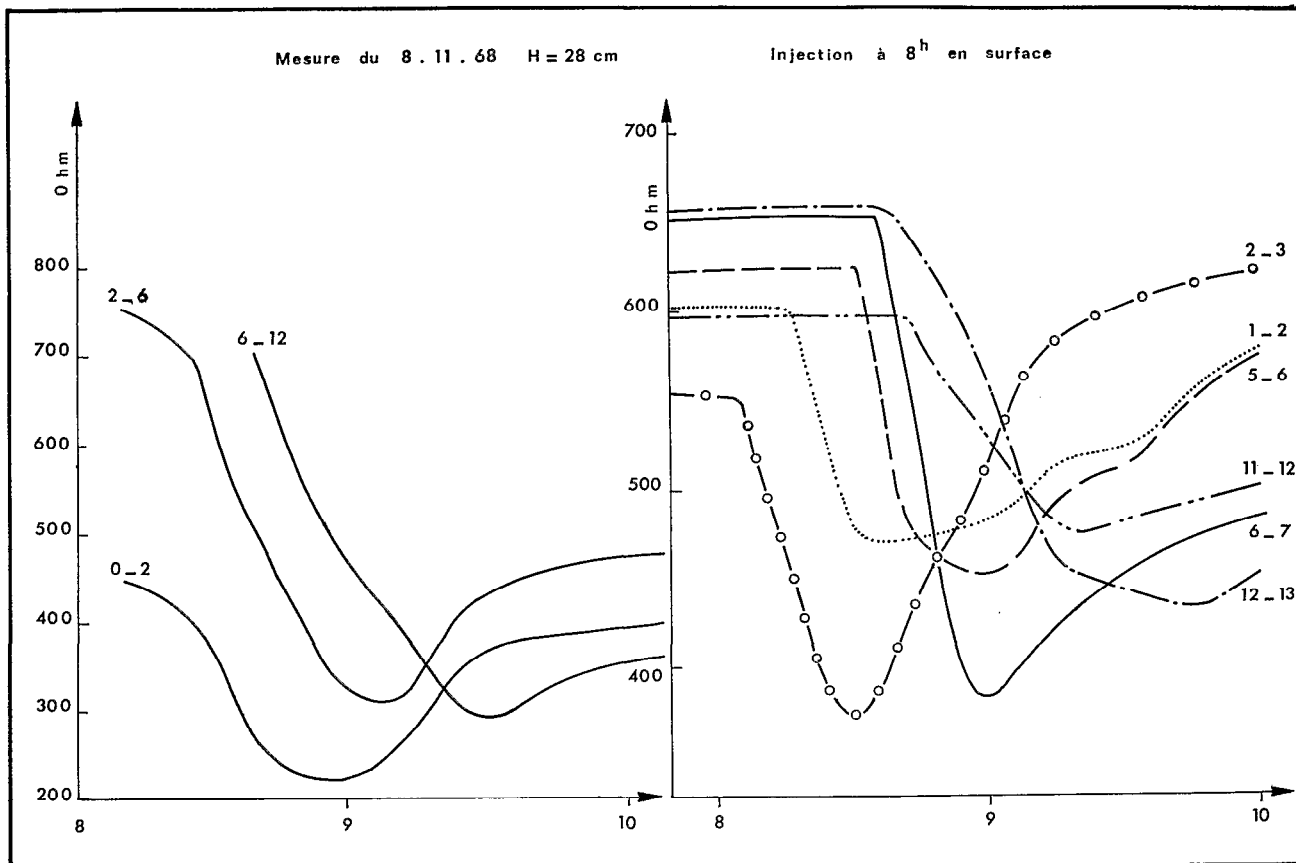


Fig. 5. — Variation de la résistance des sondes.

TABLEAU I
 TSANAGA A MAROUA
 Mesure du 8 novembre 1968. Injection à 8 h 00

Couples de sondes	7 h 55	8 h 05	8 h 10	8 h 20	8 h 30	8 h 45	9 h	9 h 15	9 h 30	9 h 45	10 h
0-2	650	450	420	370	260	220	250	350	380	390	380
2-6	800	750	730	640	500	350	310	410	450	470	475
6-12	750	750	750	770	700	500	400	300	310	340	360
1-2	680	600	600	570	480	470	480	510	520	550	
2-3	550	550	500	420	370	440	510	580	600	620	620
4-5		750				750	750	750			
5-6		650				470	450	490	510	550	
6-7		800				530	330	420	450	470	480
7-8		650				520	520	530	530		
9-10		700				700	700	700			
10-11		800				800	800	800			
11-12		600				580	530	480	480	490	500
12-13		650				630	560	460	440	430	450
13-14		700				710	680	660	640	620	650
14-15		650				680	690	690			
A-B	430	80	320	420	450	450					450
B-C	700	400	510	580		640					650
C-D	550	350	460	475		510					550
D-E	550	350	460	470	480	500					520

Mesure du 29 décembre 1968

Alors que pour les différentes mesures antérieures, la vitesse de la solution de sel était mesurée sur une distance très courte, de 20 à 50 cm nous avons, pour la mesure du 29 décembre 1968 adopté un dispositif de mesures sur grande distance. En aval de l'injection, 4 écrans de sondes sont espacés de 5 m selon le graphique 2 où chaque point numéroté représente en réalité un couple de baguettes.

Soixante litres de solution salée à 100 g/l ont été versés à 17 h 50 le 29 dans une tranchée ouverte perpendiculairement au flux. Bien que ce procédé d'injection perturbe les lignes de courant, l'expérience dure suffisamment longtemps pour que les résultats n'en soient pas faussés. Le graphique 6 représente les variations de la résistance des couples de sondes qui ont réagi.

Le temps de passage est aisément mesurable aux trois premiers rideaux, bien moins net pour le quatrième rideau situé à 20 m de l'injection. On adoptera une durée moyenne de 14 h entre chacun des rideaux, soit :

Une vitesse moyenne de surface de 35 cm/h.

Mesure n° 1 du 25 février 1969

Lors de cette mesure effectuée sur grande distance, la nappe est à 1 m de profondeur et le dispositif qui comprend 3 rideaux de sondes espacés de 5 m est sensiblement le même que lors de la mesure du 29 décembre 1968 ; l'injection de 40 l d'eau salée à 20% se fait dans une tranchée de 4 m le 25 à $t_0 = 10$ h 45 mn. L'examen des variations de la résistance des sondes sur la figure 7 permet de suivre le déplacement de l'écran salé qui n'est pas parallèle à l'axe du lit. Cela est dû au fait que la mesure est effectuée en amont du pont à l'endroit où nous avons mesuré une pente transversale de la nappe de 0,66 ‰. La déviation de l'inféro-flux est de 23 cm par mètre.

Trois couples de baguettes ont, pour chacun des trois rideaux, nettement réagi ; cependant le temps de passage du sel est malaisé à déterminer : au rideau amont A, on trouve pour t_1 : 0 h 30 mn, 2 h 30 mn et 7 h. Le passage du sel au couple 3, particulièrement, a été perturbé certainement par des strates argileuses et on adoptera comme temps moyen de passage à ce rideau : — le 26 à 1 h 30 mn.

Les sondes 9 et 10 du rideau B ont des courbes voisines et le temps t_2 est estimé égal à 10 h 30 mn. Le

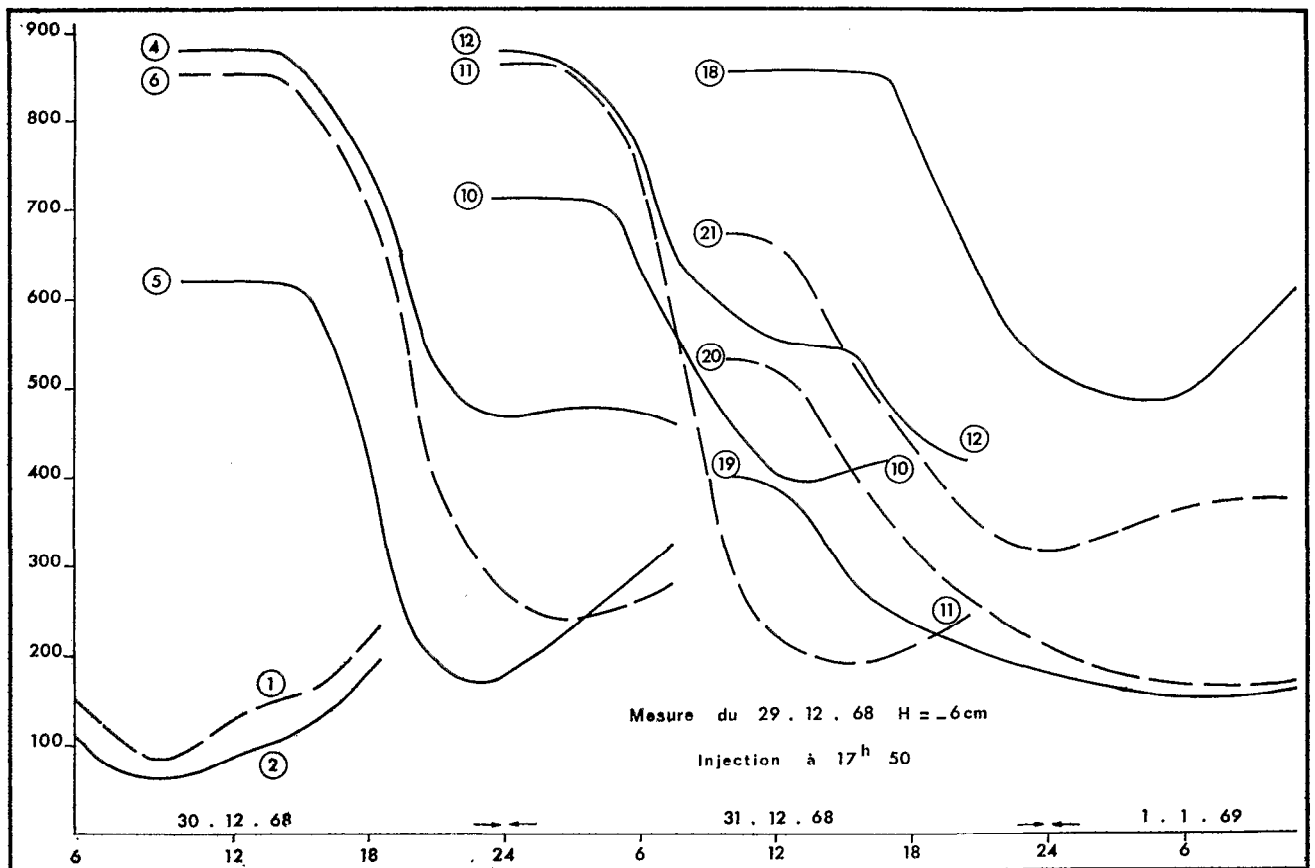


Fig. 6. — Variation de la résistance des sondes.

passage au rideau C a lieu le 27 février vers 15 h 30 mn pour les sondes 17 et 19. Il a lieu 4 h plus tard à la sonde intermédiaire n° 18.

Le sel a donc mis 17 h pour aller du rideau A au rideau B et autant pour aller de B à C, soit une vitesse de surface de 29 cm/h.

Mesure n° 2 du 25 février 1969

Cette mesure s'est effectuée à proximité de la mesure précédente en utilisant le dispositif court, c'est-à-dire quatre installations de 3 rideaux de baguettes espacés de 20 cm, chacune de ces installations correspondant à des profondeurs différentes : 20, 80, 140 et 200 cm. L'injection de quelques litres de solution salée à 10% a été effectuée dans 4 pieux enfoncés aux 4 profondeurs de mesures. Le fonctionnement des sondes est correct pour les profondeurs 20, 80 et 200 cm. Par contre, les sondes à 140 cm n'ont décelé aucun passage de sel, ce qui est dû à un défaut dans l'injection.

L'examen des graphiques de la figure 8 permet, malgré le manque de netteté des variations au rideau C, de déterminer les vitesses suivantes :

$V = 30$ cm/h à la profondeur 20 cm ;
 $V = 30$ cm/h à la profondeur 80 cm ;
 $V = 80$ cm/h à la profondeur 200 cm.

Bilan des mesures de vitesse

Les résultats des mesures de vitesse de l'inféro-flux des campagnes 1966-1967 et 1968-1969 ont été consignés dans les tableaux II et III ; pour le report de ces valeurs sur les graphiques 9 et 10, nous avons pris comme profondeur de mesure, non pas la distance surface de la nappe-électrodes, mais la distance surface du lit-électrodes ; ce qui permet de mieux comparer les résultats, puisque la nappe descend durant la campagne de mesures alors que la granulométrie du sable varie en fonction de la profondeur.

Les mesures ont été effectuées en différents points de la section du mayo, mais il serait illusoire de déterminer les variations de la vitesse en fonction de la profondeur pour chacune des verticales de mesures, les strates d'argile perturbant fortement les mesures.

Nous avons donc groupé sur un même graphique les résultats de toute une campagne. Sur le graphique 9 (campagne 1966-1967), on remarque qu'entre 40 cm

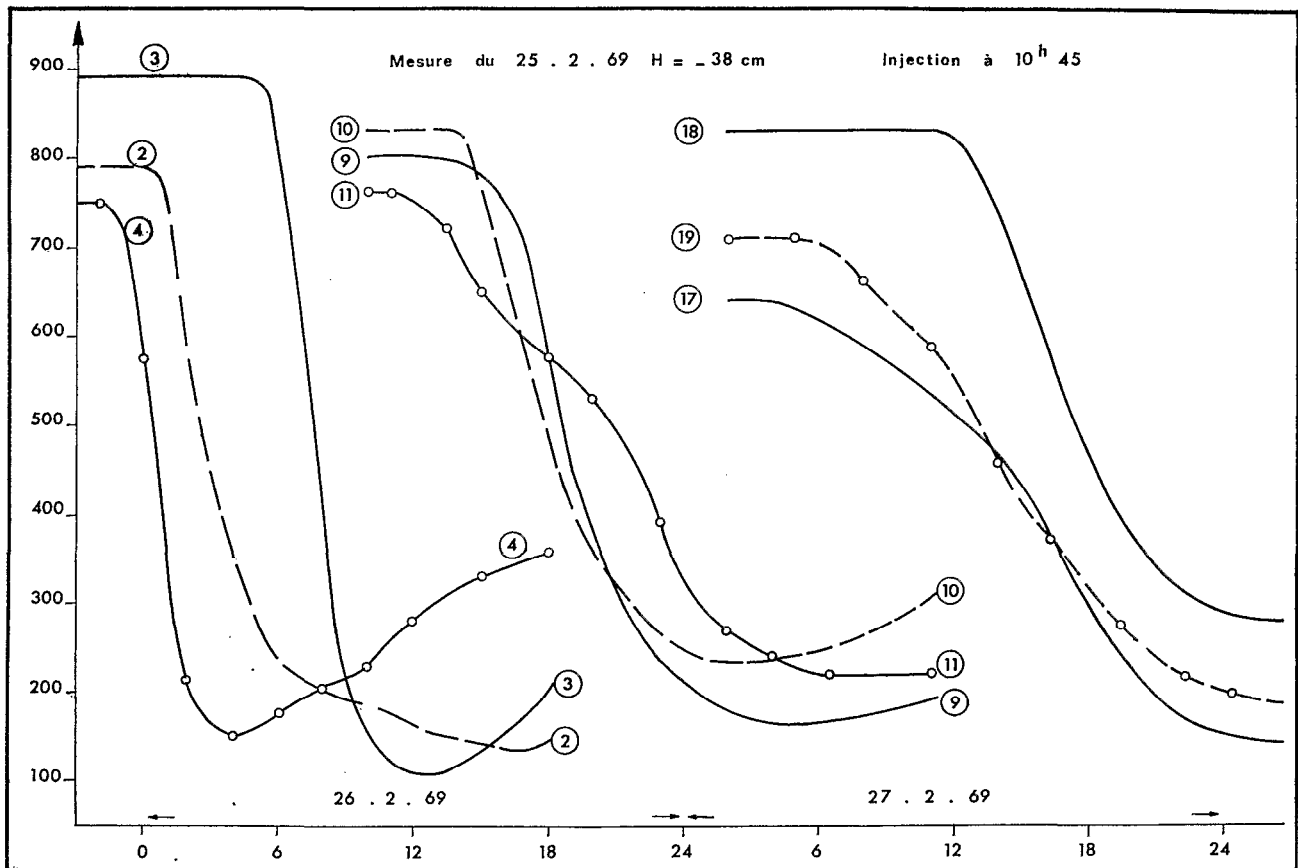


Fig. 7. — Variation de la résistance des sondes.

et 110 cm de profondeur, les vitesses varient entre 8 et 25 cm/h. Au-delà de 110 cm, la vitesse croît avec la profondeur, et à différentes reprises, des vitesses supérieures à 100 cm/h ont été mesurées. Les résultats de la campagne 1968-1969 (graphique 10), sont tout à fait dissemblables de ceux de la campagne précédente. On a un nuage de points entre 20 et 50 cm/h, quoiqu'on ait mesuré des vitesses de 80 cm/h à 55 et 300 cm de profondeur. Il faut noter que les mesures sur grande distance indiquent des vitesses voisines à des profondeurs pourtant différentes : de 29 à 35 cm/h entre 70 et 140 cm de profondeur.

La dispersion des résultats obtenus n'est pas due au procédé de mesures mais provient de l'hétérogénéité des matériaux qui constituent les alluvions du mayo : granulométrie variable, présence de strates argileuses, de graviers en profondeur.

Pour l'étude du bilan de l'écoulement de la nappe d'inféro-flux, on peut adopter pour la vitesse moyenne d'écoulement de la nappe, la valeur de 35 cm à l'heure.

2.3. MESURE DE LA SECTION.

Sept sondages effectués sur la Tsanaga à la station de mesures de Maroua ont permis de déceler avec certitude le fond du lit du mayo et d'en déduire la surface de nature sableuse du profil en travers choisi ; le mode de prélèvement des échantillons que nous avons utilisé donne une estimation imparfaite de la granulométrie car les particules argileuses ne sont pas retenues dans la sonde lorsque celle-ci traverse les couches humides.

Quelques jours après la fin de l'écoulement superficiel, soit au 1^{er} novembre 1968, la surface mouillée de la Tsanaga est trouvée égale à 294 m² ; au 1^{er} mars 1969 la nappe d'eau a baissé de 80 cm et la section mouillée n'est plus que de 190 m². A la fin de la saison sèche, avant la première crue dont les eaux sont absorbées en grande partie dans les alluvions du mayo, la section mouillée est voisine de 150 m², soit à moitié de ce qu'elle était à la fin de l'écoulement de surface.

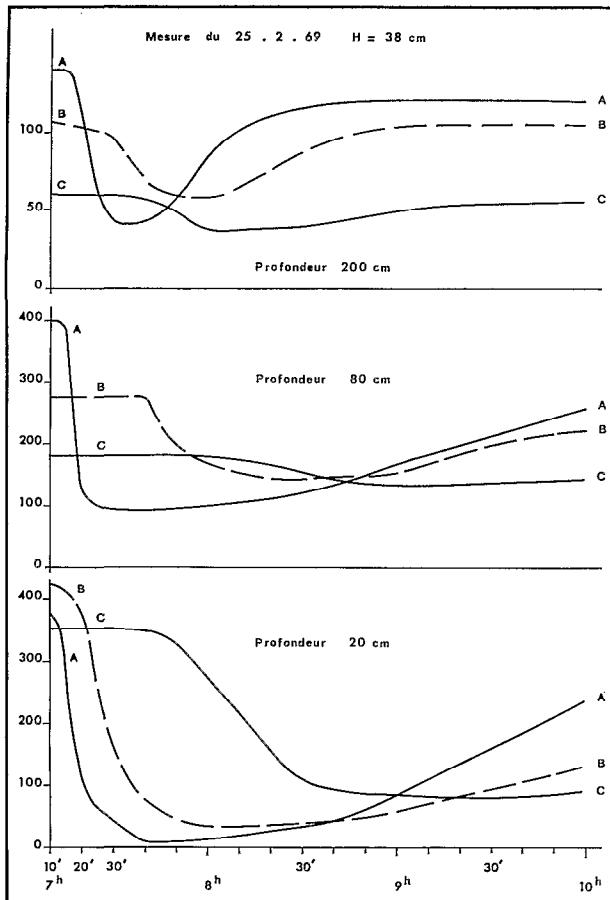


Fig. 8.

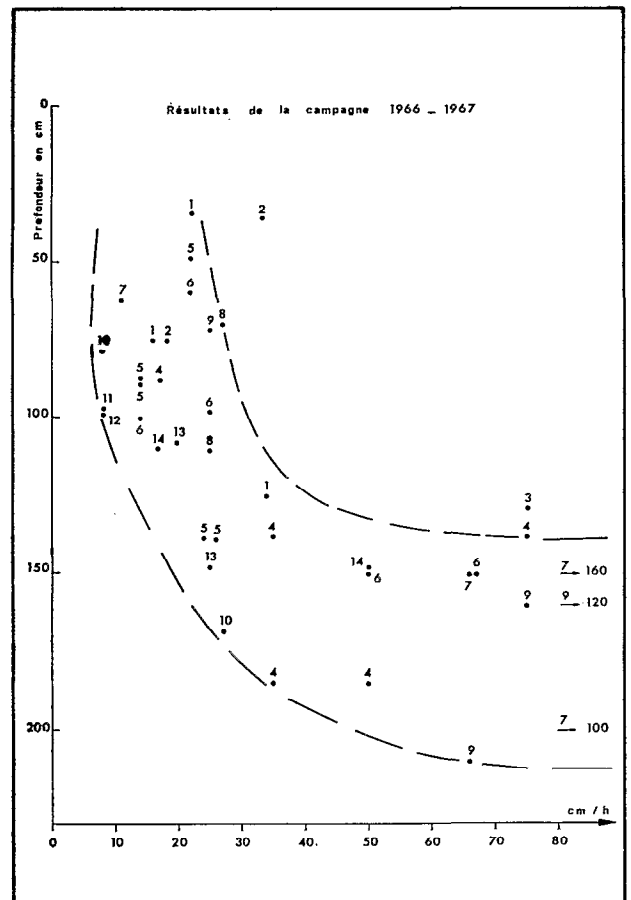


Fig. 9. — Vitesse de la nappe selon la profondeur.

2.4. MESURE DE LA POROSITÉ.

Suivant la méthode indiquée au paragraphe 1.2.1, nous avons effectué 6 prélèvements de sable en différents points du profil en travers de la Tsanaga. Sur un volume prélevé de 304 cm³, nous avons trouvé une porosité moyenne totale de 30% et une porosité efficace (eau gravifique) de 14%.

Cette mesure n'a été effectuée que pour un seul horizon alors qu'il aurait été nécessaire de répéter l'opération au fur et à mesure que la nappe descendait. Cependant, dans l'état actuel de la précision des mesures des vitesses, l'erreur que l'on peut commettre sur la porosité efficace est peu importante, sinon négligeable.

2.5. DÉBIT DE L'INFÉRO-FLUX DU MAYO TSANAGA.

Ce débit sera calculé à partir des éléments suivants :

- Section mouillée ;
- Porosité efficace ;
- Vitesse moyenne de l'inféro-flux.

Pour le 1^{er} novembre 1968 le débit de l'inféro-flux peut être estimé à :

$$Q_1 = 294 \times 0,35 \times 0,14 = 14,4 \text{ m}^3/\text{h}, \text{ soit } 4 \text{ l/s.}$$

Le 1^{er} mars 1969 le débit est de :

$$Q_2 = 190 \times 0,35 \times 0,14 = 9,3 \text{ m}^3/\text{h}, \text{ soit } 2,6 \text{ l/s.}$$

Rappelons que le bassin de la Tsanaga à Maroua est de 830 km² et que la pente longitudinale de la nappe à la section de mesures est de 3‰. En année moyenne, on peut estimer que le volume d'eau qui s'écoule dans la nappe alluviale du mayo est d'environ 100 000 m³, tandis que le volume écoulé d'eau de surface est de 200 millions de mètres cubes, soit 2 000 fois plus important.

Tout ceci nous montre que même pour un cours d'eau à large lit sableux comme la Tsanaga, il faut que le débit apparent descende bien bas, moins de 50 l/s par exemple, pour que le débit d'inféro-flux conduise à une erreur notable dans l'estimation du débit total passant dans la section.

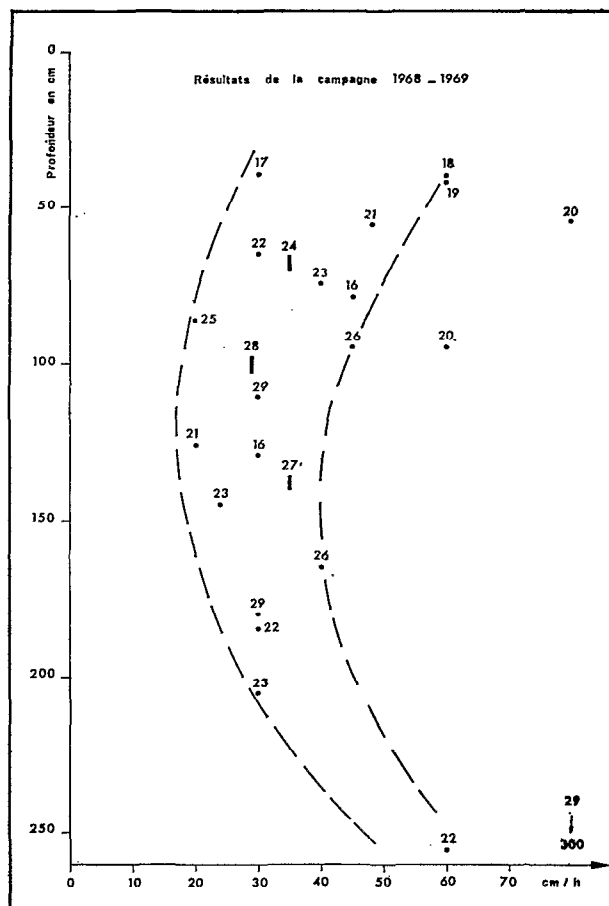


Fig. 10. — Vitesse de la nappe selon la profondeur.

TABLEAU II
RÉSULTATS DES MESURES DE LA CAMPAGNE 1966-1967

N°	Date	H à l'échelle	Profondeur nappe	Méthode	Distance (m)	Vitesse en cm/heure			
						P 10	P 50	P 100	P 150
1966									
1	11 novembre	30	25	S	0,30 + 0,50	22	16	34	
2	12 novembre	29	25	S	»	33	18	—	
3	14 novembre	26	29	S	»	—	—	75	
4	24 novembre	17	38	S	»	—	17	75/35	50/35
5	25 novembre	16	39	S	»	22	14/14	24/26	—
6	8 décembre	5	50	S	»	22	25/14	67/50	—
7	9 décembre	4	51	S	»	11	—	160/67	100
8	22 décembre	— 5	60	S	»	27	25	—	—
9	23 décembre	— 6	61	S	»	25	—	120/75	66
1967									
10	5 janvier	— 14	69	S	»	8	—	(27)	—
11	7 février	— 32	87	S	»	8	—	—	—
12	11 février	— 34	89	S	»	8	(23)	(12)	(20)
13	28 février	— 43	98	S	»	20	25	—	—
14	4 mars	— 44	99	S	»	17	50	—	—

S = sondes annulaires.

TABLEAU III
RÉSULTATS DES MESURES DE LA CAMPAGNE 1968-1969

N°	Date	H à l'échelle	Profondeur nappe	Méthode	Distance (m)	Vitesse en cm/heure					
						10	50	80	100	140	200
1968											
15	28 octobre	43	17	S	2 × 0,50						
16	5 novembre	31	29	S	2 × 0,30		45		30		
17	6 novembre	30	30	B	2 × 0,20	30					
18	7 novembre	29	31	B	3 × 0,20	60					
19	8 novembre	28	32	B	»	60					
20	27 novembre	15	45	B	»	80	60				
21	28 novembre	14	46	B	»	48		20			
22	13 décembre	5	55	B	»	30				30	60
23	28 décembre	— 5	65	B	»	40		24		30	
24	30 décembre	— 6	66	B	4 × 5	35					
1969											
25	16 janvier	— 16	76	B	3 × 0,20	20					
26	31 janvier	— 25	85	B	»	45		40			
27	31 janvier	— 25	85	B	3 × 5		35				
28	25 février	— 38	98	B	3 × 5	25					
29	25 février	— 38	98	B	3 × 0,20	30		50			80

S = sondes annulaires.

B = baguettes non isolées.