

Tableau II - 8 - 6

DATE	L cm	Qi mm/h	Tr h	Tm h	Tv h	QM mm/h	Qm mm/h
19 - 20	50	0,005	12,0	12,0	15,0	0,12	0,09
Février	100	0,02	21,0	9,0	8,0	0,07	0,08
1968	150	0,02	22,0	10,0	9,0	0,07	0,08
	150	0,02	21,0	10,0	10,0	0,07	0,08
20 - 21	50	0,09	10,2	7,0	6,0	0,28	0,21
Février	100	0,08	12,5	8,0	4,0	0,16	0,20
1968	150	0,08	12,0	7,0	4,0	0,26	0,20
	150	0,08	11,0	7,0	4,0	0,23	0,18
21	50	0,21	3,0	3,2	11,0	0,57	0,25
Février	100	0,20	3,8	2,5	12,0	0,64	0,22
1968	150	0,20	2,2	3,0	12,0	1,00	0,17
	150	0,18	2,5	4,0	11,0	0,75	0,18
22	50	0,25	5,0	3,5	17,0	0,60	0,25
Février	100	0,22	5,0	3,5	17,0	0,68	0,22
1968	150	0,17	4,5	3,0	18,0	0,90	0,20
	150	0,18	3,5	4,0	18,0	0,78	0,20
23	50	0,25	3,0	4,5	670,0	0,42	ε
Février	100	0,22	4,0	3,5	672,0	0,42	0,006
1968	150	0,20	4,0	4,5	670,0	0,44	0,008
	150	0,20		2,0	670,0	0,40	0,008

Caractéristiques des hydrogrammes du drainage

Légende : voir tableau III - 8 - 5 page 59

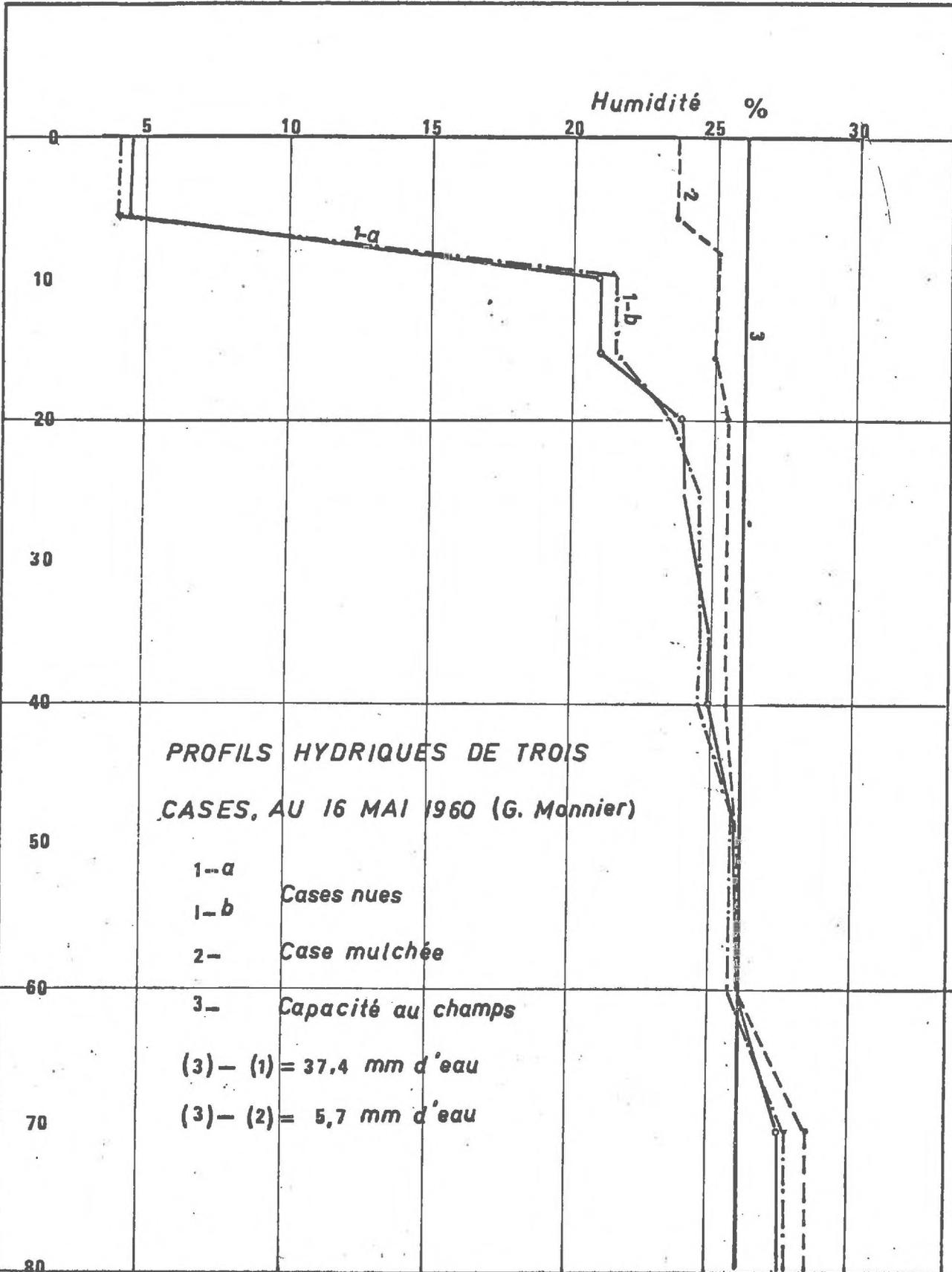
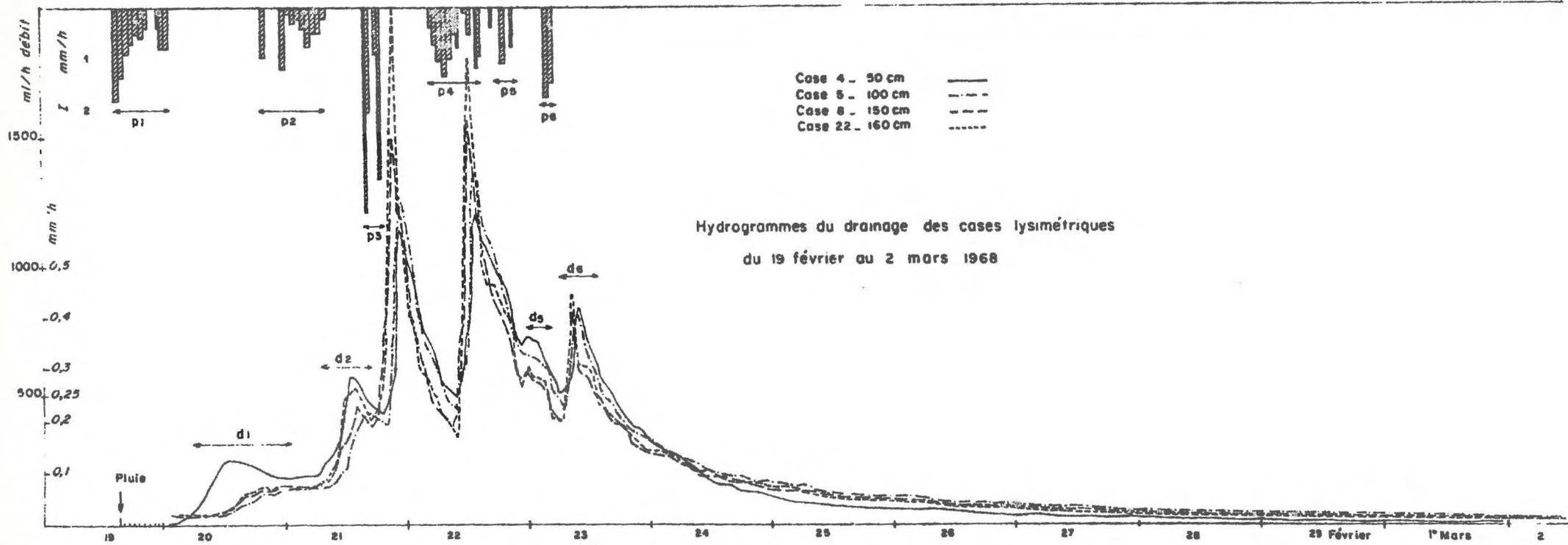


Fig. I-9



faute d'évaporation importante, l'humidité est voisine de la capacité au champ et l'écoulement est presque gravitaire; dans le second cas, le 23 avril 1969, où il existe un déficit, l'eau apportée par la pluie a tendance à occuper tout d'abord la partie de porosité concernée par ce déficit hydrique (A. Féodoroff, 1969). Au cas où la pluie continue, l'eau s'écoule lentement vers le bas pour être ensuite drainée.

Pour voir cela plus clairement, nous examinons un épisode au cours duquel nous assistons au remplissage répété des réserves et, à la fin, la vidange quasi-totale des couches drainantes. La figure I - 8 - 1 montre les hyétogrammes de cinq épisodes de pluie et les oscillations que subissent les quatre hydrogrammes du drainage, à la suite des recharges successives du sol par les pluies. Pour résumer la position des hydrogrammes et leurs variations, on a rassemblé pour chaque épisode pluvieux, leurs caractéristiques de forme dans un tableau. Deux séries de comparaisons sont ensuite possibles :

- les comparaisons inter-épisodes pour étudier l'effet des facteurs pluviométriques et celui de la teneur en eau du milieu ;
- et les comparaisons inter-cases, pour voir bien entendu l'effet de la profondeur.

L'examen du tableau III - 8 - 6 montre qu'au fur et à mesure que les pluies alimentent la réserve en eau du sol et que, par conséquent, le débit initial du drainage augmente, le temps de réponse diminue et cela d'autant plus que l'intensité des précipitations est plus importante. Le rôle de l'épaisseur de la couche drainante semble être assez mal défini pour ce qui concerne le passage du front vers la base. D'après les observations effectuées au cours de quelques épisodes pluvieux, il semble que la vitesse du mouvement descendant de l'eau serait plus élevée dans un sol plus profond et, bien entendu, initialement humide (Tableau III - 7 -) ; à moins que les comportements du sol des cases étudiées ne soient différents, jouant ainsi un rôle dans ce phénomène. Les résultats présentés dans la colonne 4 du tableau III - 8 - 6 montrent que les valeurs de  $T_r$  (temps de réponse) s'approchent beaucoup pour les cases dont la profondeur varie de 50 à 150 cm.

C'est seulement quand le sol est suffisamment ressuyé que  $T_r$  croît avec la profondeur des cases, par exemple, le 19 février avec  $Q_i = 0,005$  à  $0,02$  mm/h  $T_r = 12$  h pour  $L = 50$  cm et 21 à 22 h pour  $L = 150$  cm. Dès que les débits initiaux sont assez élevés,  $T_r$  devient presque le même pour toutes les cases étudiées, et pour les plus forts débits initiaux, il est même plus petit dans les cases peu profondes, comme le montre l'exemple suivant :

Le 21 et le 22 février 1968

$$Q_1 = 0,17 \text{ à } 0,25 \text{ mm/h}$$

$$Tr_{5 Q, 100} = 5 \text{ heures}$$

$$Tr_{150} = 3,5 \text{ heures}$$

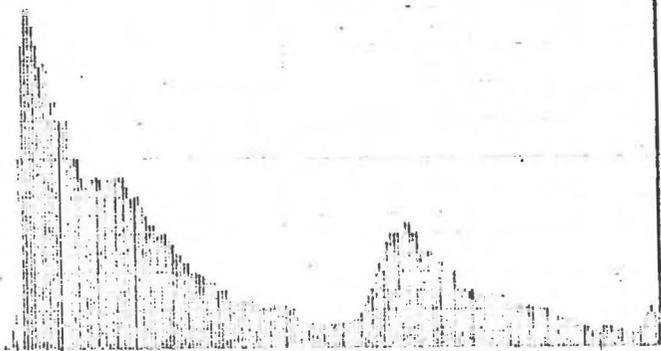
D'autre part, au-dessus d'une certaine humidité, les pluies intenses provoquent généralement un débit qui est, semble-t-il, lié à la profondeur pendant deux ou trois heures après la fin de la pluie ; sur les hydrogrammes (cf. fig. I - 6 et I - 8 - 1), les débits de pointe les plus forts correspondent aux plus grandes profondeurs. Pour les deux pluies P3 et P4, qui ont donné pour les quatre cases des débits de pointe supérieurs à 0,55 mm/h on a :

		50 cm	100 cm	150 cm	
Pour P3	QM est	0,57	0,64	0,75	1,0
Pour P4	QM est	0,60	0,68	0,78	0,9

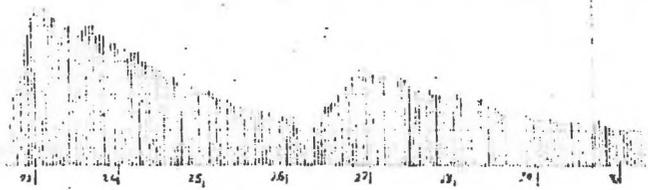
Mais pour les pluies P1, P2 et P6 qui ont donné pour les quatre cases des débits de pointe inférieurs à 0,45 mm/h, la règle n'est pas si claire ; la pluie P1 a servi le 19 février en grande partie, à remplir les déficits ; la réponse et la montée du drainage sont plus sensibles dans la case de faible profondeur.

CASE N° 4 (50 cm)  
20 Mars - 7 Avril 1968

Fig. I-8-4



CASE N° 5 (100 cm)  
20 Mars - 20 Avril 1968



CASE N° 5  
Mars - 7

Handwritten notes on the left margin:  
L  
P  
S  
P  
S

21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

### III. - 3 - 3 Quantité totale de drainage et sa répartition dans le temps

L'examen des hydrogrammes montre que, dans la majorité des cas et surtout pendant les périodes où le déficit du sol n'est pas très grand, (périodes de faible évaporation), la plus grande partie du drainage est écoulee au cours de quelques heures ; surtout quand la pluie a une courte durée, le débit du drainage retombe après 25 à 30 heures à sa valeur initiale ; c'est le cas, par exemple, de l'épisode I - a (7 février 1968), le débit initial étant 0,12 mm/h (cf graphique I - 8 - 2). Il est clair que cet épisode se situe dans une zone de drainage intense, c'est-à-dire que les débits initiaux pour les trois cases dépassent 0,10 mm/h qui correspondent à 2,4 mm/j, étant bien sûr supérieur à 0,5 mm/j que nous avons choisi comme un seuil entre les débits intenses et les débits faibles. De même, les débits minimums observés à la fin de l'épisode sont du même ordre de grandeur. Cela indique que cette pluie du 7 février est survenue au moment où le sol draine encore avec un débit assez fort. Par conséquent, pendant la saison froide où en absence d'évaporation importante, la teneur en eau sur l'ensemble du profil s'est suffisamment élevée, la totalité de la pluie est susceptible d'être drainée au cours d'un temps assez court.

Si nous effectuons des bilans entre les apports qui sont seulement les pluies et les pertes dues au drainage à l'échelle de l'épisode, c'est-à-dire entre deux instants  $t_2$  et  $t_3$  de l'hydrogramme, il y a trois possibilités :

- 1) Le drainage dépasse largement la pluie
- 2) Le drainage est à peu près égal à la pluie
- 3) Le drainage est inférieur à la pluie

Le premier cas se produit sans doute pendant la saison froide où les évaporations ne jouent qu'un rôle presque négligeable.

Exemple :

Episode I - b 8 - 9 février 1968 : le tableau ci-dessous présente la hauteur totale du drainage, ainsi que les fractions de celui-ci écoulees pendant et après la pluie.

Drainage	Case 50	Case 100	Case 150 cm
Pendant P	0,65	0,65	1,05 mm
<u>Après P</u>	<u>5,90</u>	<u>7,80</u>	<u>7,30 mm</u>
Total	6,55	8,45	8,35 mm

Ces chiffres sont certainement supérieurs à 2,5 mm de pluie qui a provoqué ce drainage. On peut donc considérer la pluie de 2,5 mm du 8 février comme une pluie parasite qui provoque une recharge sensible de réserve, alors que les cases sont en régime décroissant, à la suite d'une pluie précédente. Autrement dit, le tarissement se poursuit avec un débit instantané que nous connaissons. On peut supposer donc que cette faible quantité de pluie soit drainée presque complètement après peu de temps, car son hydrogramme rattrape la courbe de tarissement principale (celle de l'épisode précédent) au bout de quelques heures. Or, si la fonction de la courbe principale de tarissement entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  est  $q_1 t$  et celle de l'hydrogramme de cette nouvelle pluie dans le même intervalle de temps  $t_1 t_2$  est  $q_2 t$  ( $t_1$  étant l'instant où le débit est modifié par la nouvelle pluie et  $t_2$  l'instant où l'hydrogramme de cette pluie rattrape la courbe de tarissement) ; le volume de drainage entre les deux instants sera voisin du volume d'eau apportée par cette pluie. Autrement dit, si  $V_d$  est ce volume supplémentaire et  $V_p$  le volume d'eau de la pluie, on a :

$$V_d \approx V_p \approx \int_{t_1}^{t_2} (q_2 t - q_1 t) dt$$

Cela à condition, bien entendu, que le déficit du sol, ainsi que l'évaporation soient nuls.

À partir de  $t_2$ , les courbes peuvent être considérées comme la continuation de la courbe de tarissement principale.

D'autres exemples peuvent être soulignés ; à ce sujet, le tableau ci-dessous donne la hauteur du drainage totale de l'épisode I - a provoqué par une pluie de 9,7 mm.

Drainage	Case 50 cm	Case 100 cm	Case 150 cm
Pendant P	0,90	0,50	1,70
Après P	8,95	9,70	8,55
<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Total	9,85	10,20	10,30

Dans cet exemple, le drainage est très voisin de la pluviométrie. Par contre, si on compare le drainage et la pluviométrie de la période du 7 au 20 février, on a :

Date	P mm	Drainage mm		
		Case 50	Case 100	Case 150
7 - 8 fév.	9,7	9,85	10,20	10,30
8 - 13 fév.	2,5	6,55	8,46	8,35
13 - 20 fév.	8,0	6,31	-	7,98
	<hr/>	<hr/>	<hr/>	<hr/>
Total	20,2	22,71	-	26,63

Il y a donc, au total, un excès net du drainage par rapport à la pluviométrie au cours de cette période. L'évaporation à partir de la surface du sol n'est certainement pas nulle pendant ce temps. Etant donné que le drainage a encore un débit non négligeable à la fin de cette période, il faut penser à une réserve  $R_2$ . La relation suivante devient par conséquent très évidente :

$$Dr + E + R_2 > P$$

Pour l'égaliser, il faudra ajouter à P une quantité  $R_1$ , qui représente la réserve en eau du sol, le 7 février au point de départ :

$$Dr + E + R_2 = P + R_1$$

ou

$$P = Dr + E + (R_2 - R_1)$$

D'après le tableau ci-dessus, la valeur de  $R_2 - R_1$  pour la période du 7 au 20 février est de 2,5 mm pour la case 50 et 6,4 mm pour celle de 150 cm, à la valeur de E près. On peut estimer que la différence entre ces deux valeurs (3,9 mm) représente la différence de la réserve en eau de deux cases au début de la période, autrement dit, la différence entre les deux valeurs  $R_1$ .

### III. - 3 - 4 Courbes de pluies et de drainages cumulés

Pour voir mieux la variation de la hauteur totale de drainage par rapport à la hauteur de pluie, suivant les conditions atmosphériques, nous avons choisi quatre périodes au cours de notre observation, et nous avons tracé pour chacune, la courbe cumulative de la pluie, ainsi que deux ou trois courbes de drainage cumulé, correspondant à des cases de différentes profondeurs.

Ces quatre périodes sont les suivantes :

1. - du 7 au 20 février 1968 : très froide
2. - du 20 fév. au 11 mars 1968 : froide
3. - du 10 mars au 22 avril 1969 : tiède
4. - du 22 avril au 20 mai 1969 : chaude

Ces courbes sont présentées respectivement sur les graphiques I - 10 - 1 à I - 10 - 4.

La position des courbes de drainage des cases suivant la profondeur montre qu'en général, la partie finale de la courbe des cases profondes a une pente plus forte que celle des cases moins profondes, ce que nous avons déjà vu (importance du drainage à la fin des épisodes dans ces cases). D'autre part, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la saison froide, les courbes du drainage s'éloignent de celles de la pluie, sous l'influence de l'évaporation.

-74-

Fig. I-10-1

Courbes de précipitations et de drainage cumulés du 7 au 20 février 68

(Saison froide)

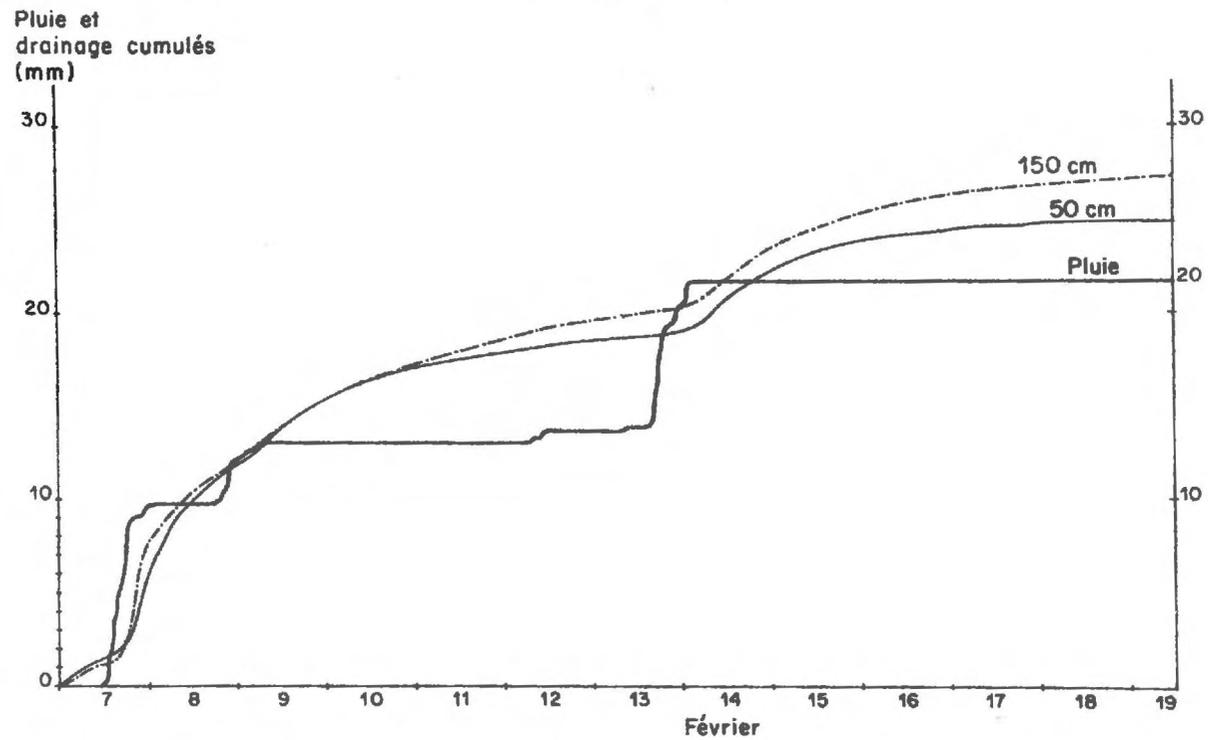


Fig. I-10-2

Courbes de précipitations et de drainage cumulés du 19 février au 10 mars 1968  
(Saison froide)

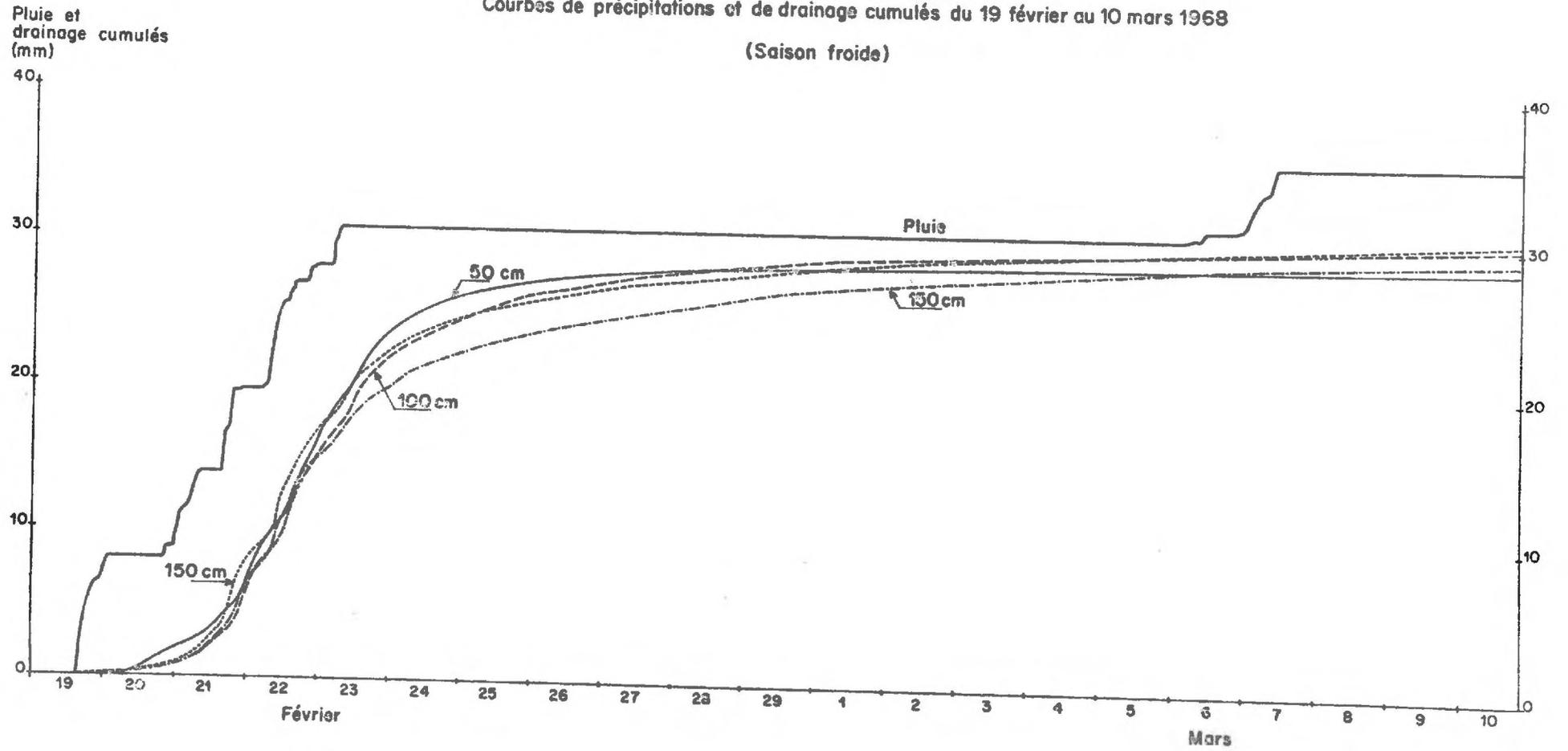


Fig. I-10-3  
Courbes de précipitations et de drainage cumulés. Mars-avril 1969  
(Saison tempérée)

Pluie et drainage cumulés (mm)

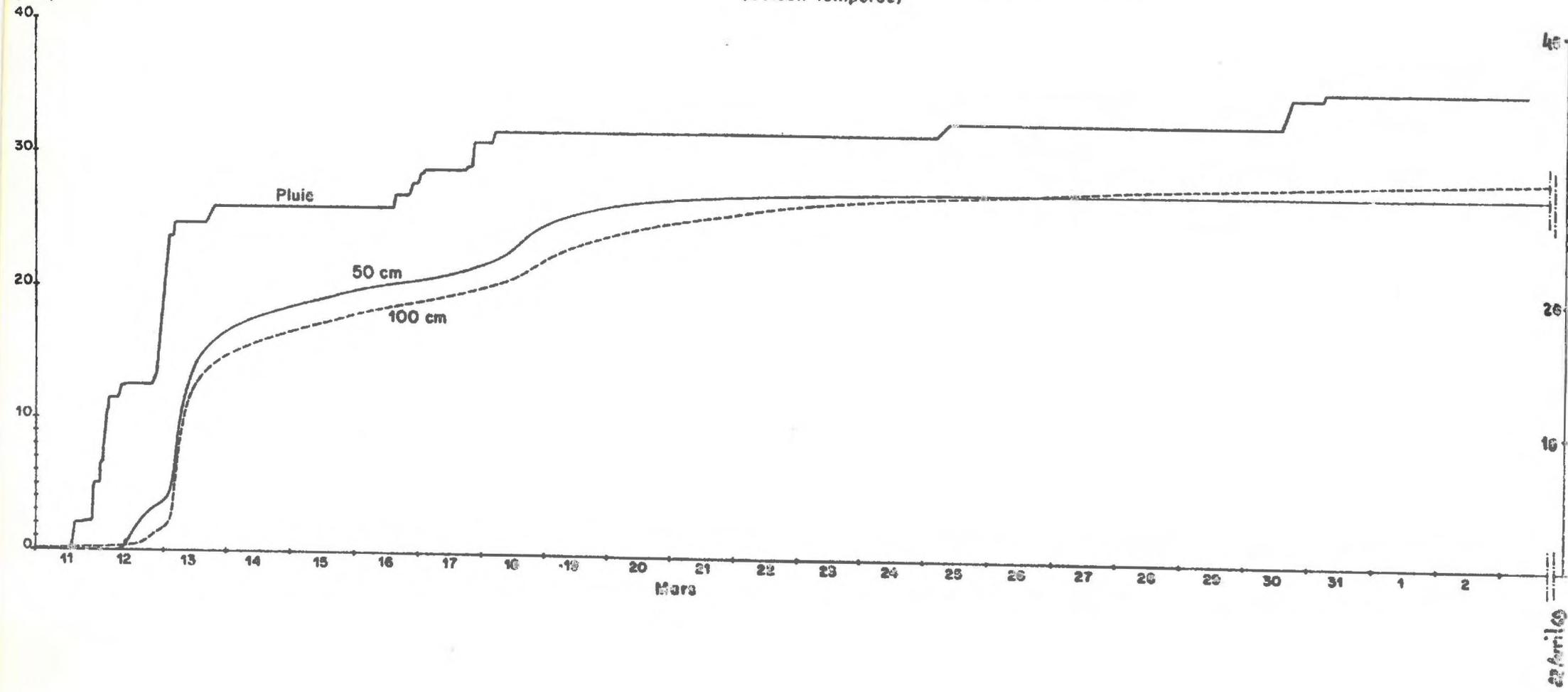
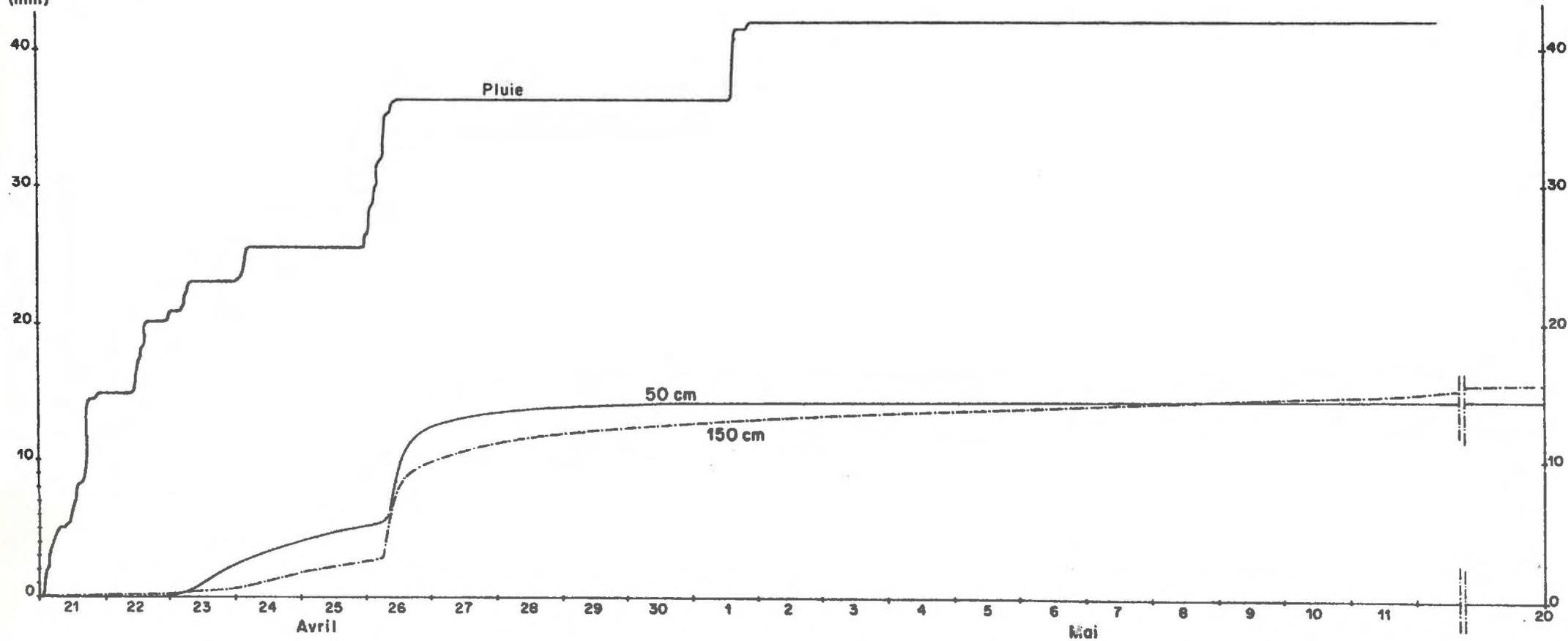


Fig. I-10-4

Courbes de précipitations et de drainage cumulés. Avril-mai 1969  
(Saison chaude)

Pluie et  
drainage cumulés  
(mm)



III. - 3 - 5 Hydrogramme du drainage à partir d'une fonte de neige et pendant la période de gel.

Les enregistrements du drainage des trois cases ont commencé le 6 février 1968, et nous n'avons pas rencontré de jour pour lequel la moyenne de température nyctémérale soit au-dessous de zéro °C. Mais le drainage d'une seule case lysimétrique avec une profondeur de 150 cm a été enregistré et suivi depuis le 3 janvier 1968. La courbe représentative de l'évolution du débit jusqu'à la fin de janvier est établie en portant toujours en abscisse le temps en heures, et en ordonnée, le débit en mm/h. Ainsi, au cours de ce mois, nous distinguons quelques cinq ou six hydrogrammes, dont deux sont bien caractéristiques, le premier étant dû à une pluie et le second à une fonte de neige et rencontrant 3 jours de gel pendant la décroissance de son débit. Cet hydrogramme se situe entre le 9 et le 14 janvier. La neige étant tombée à deux reprises, la partie la plus importante est terminée le 9 à 10 heures, avec une hauteur d'eau équivalente à 10,3 mm.

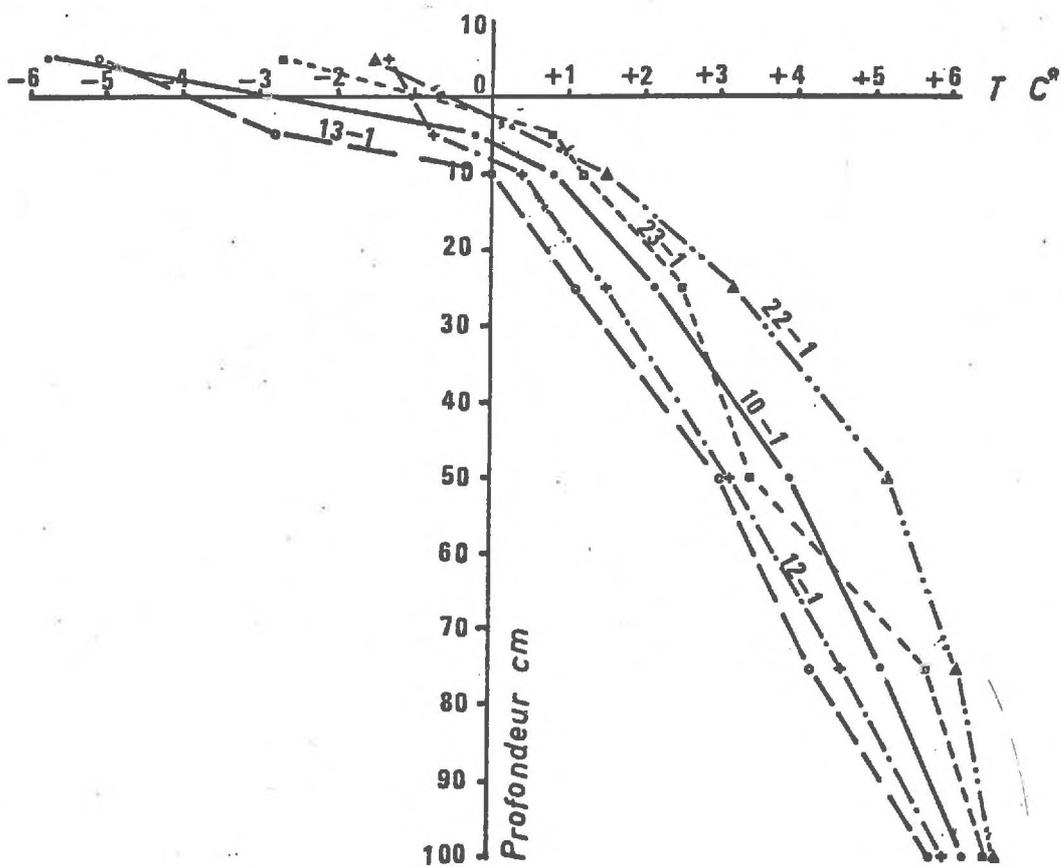
La croissance du débit commence trois heures après, c'est-à-dire à 13 heures, car la fonte de neige s'est produite assez rapidement. Une autre chute de neige s'est terminée à 23 heures, avec une hauteur d'eau équivalente de 2,6 mm. Le drainage n'a pas été beaucoup affecté par cette seconde chute de neige qui a été répartie sur plusieurs heures et fondue au fur et à mesure de la chute. Les températures moyennes journalières des 10, 12 et 13 janvier, où le drainage est en baisse, sont respectivement : - 4,05, - 0,85 et - 3,25 °C. Mais il paraît que le drainage a suivi une baisse régulière sans être apparemment gêné par le gel, car la hauteur du drainage au cours de 110 heures (temps de base de l'hydrogramme) est très sensiblement égale à la hauteur des précipitations :

$$Dr = 12,85 \text{ mm} \quad \text{et} \quad P = 12,90 \text{ mm}$$

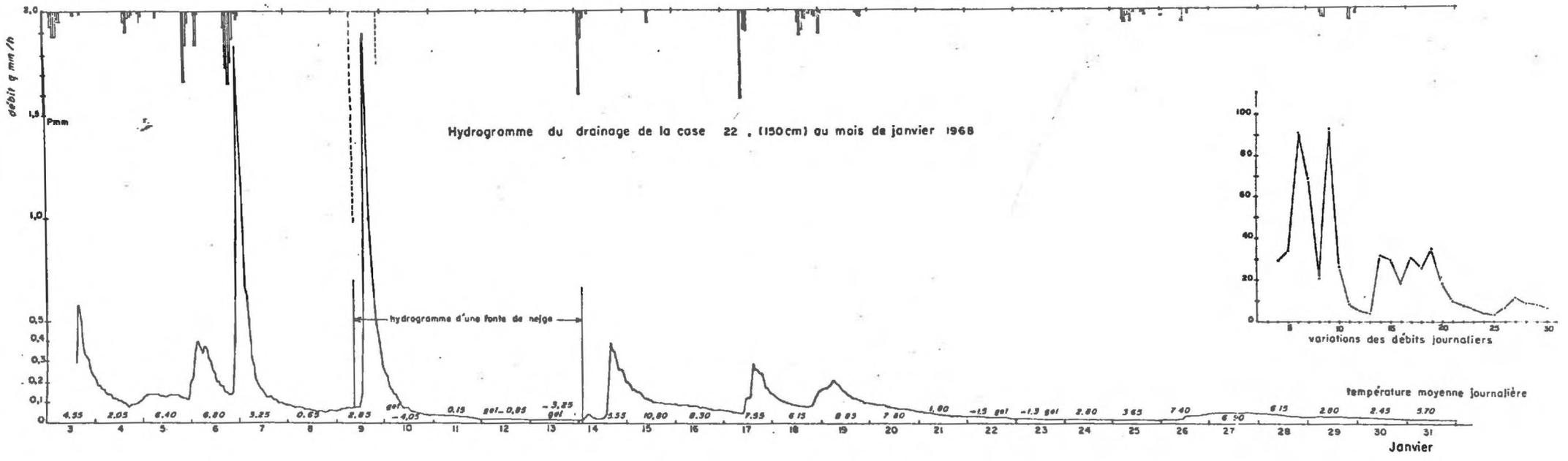
D'autre part, si on examine le gradient de température d'un sol nu voisin pendant 5 jours de gel au mois de janvier 1968 (données de la Station Centrale de Bioclimatologie du C.N.R.A. : profils thermiques observés à 9 heures du matin), (Cf graphique I - 11), on remarque que, pendant les jours les plus froids de ce mois, le gel n'intéresse qu'une couche de moins de 10 cm de profondeur. Au-delà, la température demeure positive. Mais le mouvement de l'eau dans les cases peut être perturbé par cette petite couche de gelée, faute de circulation de l'air ou bien à cause d'un mouvement ascendant de l'eau vers la couche froide.

Sur le graphique I - 12, les courbes de variations du débit du 3 au 31 janvier sont présentées ; pour une des courbes, l'échelle de temps est divisée en heures, et pour l'autre, en jours. Il est clair que

Fig. I-11



PROFILS THERMIQUES D'UN SOL NU. AU  
MOIS DE JANVIER 1968 PENDANT  
LES JOURS DE GEL



les petites variations du débit au cours de 24 heures, sont beaucoup mieux marquées, sur la courbe dont l'échelle de temps est plus fine.

### III. - 3 - 6 Conclusion

L'application de la méthode des hydrogrammes à l'étude du drainage a cet avantage que l'on peut évoquer un certain nombre de paramètres de ceux-ci qui sont liés soit directement, soit indirectement, aux propriétés du sol et à son état physique en présence de l'eau. Ainsi, nous avons vu que, par exemple, le débit initial est considéré, faute de profil hydrique, comme un indice de la teneur en eau. Bien qu'une telle évaluation ne soit pas précise, nous verrons que, si l'on peut appliquer une loi de tarissement au drainage, le débit de chaque instant peut donner grosso modo une idée sur l'humidité du sol ; à condition, bien entendu, que l'effet de l'évaporation soit le moins perturbant possible. De même, nous avons montré que le temps de réponse peut également être lié à l'humidité et surtout la conductibilité hydrique des matériaux, par exemple pour le temps de réponse, nous avons observé les valeurs qui varient de 3 heures pour le sol initialement humide ayant un débit de drainage de 0,25 mm/h, à plus de 50 heures pour le même sol, mais avec une humidité beaucoup moins importante, son débit de drainage étant de l'ordre de 0,008 mm/h. Par conséquent, pendant la saison froide et en dehors des périodes de gel, une pluviométrie de quelques mm suffit pour provoquer un drainage. Le déficit du sol en humidité est très faible et le drainage commence à augmenter peu après la nouvelle pluie. La vitesse de transfert ( $L/Tr$ ) qui est, nous l'avons vu, en corrélation étroite avec le débit initial, est plus élevée dans les cases plus profondes. Cela est confirmé par tous les cas observés pendant la saison froide et la différence est d'autant plus nette que le débit initial est plus élevé

Le temps de montée nous paraît également un indice de la durée de la pluie et l'hétérogénéité de celle-ci, mais aussi de la capacité d'emmagasinement de la couche drainante. Quant au débit maximum, tout en étant lié à l'intensité de la pluie, il représente aussi la perméabilité du terrain ; nous avons calculé à partir des plus grands débits maximum, la perméabilité de trois cases étudiées ; les résultats obtenus ( $5,5$  à  $9,2 \times 10^{-5}$  cm/s) nous conduisent à une perméabilité moyenne. L'autre remarque au sujet du débit de pointe à souligner, est que, souvent, les cases plus profondes présentent à partir des pluies abondantes et le sol assez humide, un débit de pointe plus grand que celui des cases peu profondes. Il faut préciser à ce sujet que, si la nouvelle pluie survient

à un instant où le débit du drainage est assez faible, c'est-à-dire que l'épisode du drainage précédent est à peu près terminé, le temps de réponse est plus court dans les cases moins profondes et le débit de pointe le plus élevé se produit dans celles-ci ; par contre, si cette pluie interrompt l'épisode précédent à un moment où le débit est assez élevé ( $q_1 \geq 0,2$  mm/h dans le cas de nos observations), la situation se trouve inversée, le temps de réponse est plus court pour les cases profondes qui ont d'ailleurs un débit de pointe plus élevé que les cases moins profondes. Ajoutons que ce débit de pointe, même à la suite des pluies les plus importantes que nous avons observées, se produit en un seul instant sans être prolongé dans le temps

En l'absence de nouvelles pluies, le débit décroît très rapidement et atteint au bout de 25 à 30 heures sa valeur initiale, au cas bien sûr, où celle-ci n'est pas très faible (par exemple, le 7 février,  $Q_1 = 0,11$  mm/h et  $Q$  minimum après 30 heures devient 0,12 mm/h). Enfin, la courbe de pluie et de drainage cumulés correspondant à quatre périodes représentant les conditions thermiques différentes, montre que : pour la saison froide, la courbe du drainage cumulé rattrape et dépasse même celle de pluie cumulée de cette période ; nous avons estimé la différence comme la quantité d'eau drainable au début de la période, les écarts étant en effet bien supérieurs à ce qu'on pourrait attribuer à des erreurs de pluviométrie. Pendant la saison tempérée, la différence entre deux courbes est assez faible, tandis que cette différence devient considérable au cours de la période chaude. Finalement, nous n'avons pas observé de variations diurnes de drainage, contrairement à ce que l'on verra plus loin pour les "bacs" (en serre froide). Ces variations si elles existent, n'ont pas été apparentes.

### III. - 4      TARISSEMENT

Après l'étude des hydrogrammes du drainage et l'analyse des différents composants de ceux-ci, nous avons essayé de voir de plus près l'évolution dans le temps, comme nous l'avons déjà dit, du débit décroissant en absence de toute réalimentation. La courbe de tarissement considérée ici est toute la partie de la courbe de décroissance du débit à partir de la pointe de l'hydrogramme. Elle comprend donc aussi ce que l'on appelle la courbe de décrue dans l'étude de l'hydrologie des cours d'eau et qui correspond à l'évacuation d'eaux de ruissellement. Dans les cases lysimétriques, faute de ruissellement superficiel, le débit est complètement alimenté par les eaux d'infiltration. Nous avons déjà parlé des difficultés qui se manifestent normalement au cours de l'étude du tarissement, surtout quand il s'agit de petites réserves fréquemment alimentées par les pluies et nous avons indiqué également la méthode pratiquée pour choisir des épisodes affectés le moins possible par les éléments qui perturbent la vidange assez longue et non influencée. Au cours de ce chapitre, nous avons brièvement rappelé quelques relations simples qui sont souvent utilisées pour l'étude du tarissement des nappes souterraines à partir des débits des cours d'eau qu'elles alimentent. Mais on sait que ce sont souvent des dispositifs expérimentaux qui sont à l'origine des calculs théoriques appliqués et généralisés, ainsi à l'hydrologie souterraine.

#### III. - 4 - 1      Rappel de quelques formules appliquées à la courbe de tarissement du drainage

M. Roche (1963) propose d'assimiler le tarissement de certaines nappes souterraines à la "vidange d'un réservoir à travers un bouchon poreux". Ici encore, d'après la loi de Darcy,

$$q = KP \frac{S}{L} h$$

K étant la perméabilité et P la porosité du bouchon.

D'autre part, le débit  $q$  pendant le temps  $dt$  fait baisser le niveau de l'eau et le volume déplacé sera  $Sdh$

$$Sdh = - q dt$$

étant donné que

$$dh = \frac{L}{KPS} dq$$

et

$$\alpha = \frac{KP}{L}$$

$$\frac{dq}{q} = -\alpha dt$$

$$\ln q = -\alpha t + Cte$$

et en partant d'un instant  $t_0$

$$\ln q - \ln q_0 = -\alpha(t - t_0)$$

ce qui donne

$$q = q_0 e^{-\alpha(t - t_0)}$$

Basé sur cette théorie, Mallet a proposé la formule suivante pour la courbe de tarissement

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

ou

$$Q_t = Q_0 e^{-t/T}$$

où  $Q_0$  : le débit à l'instant  $t_0$  choisi arbitrairement

$Q_t$  : le débit à l'instant  $t$  au cours du tarissement

$e$  : la base du logarithme népérien

$\alpha$  : le coefficient de tarissement égal à  $\frac{1}{T}$ ,  $T$  étant le temps nécessaire pour que le débit initial  $\frac{1}{T}$  varie de 1 à  $1/e$ , soit de 0,368 fois de sa valeur initiale.

Le tarissement d'une case lysimétrique ne peut être assimilé à la "vidange d'un réservoir à travers un bouchon poreux", étant entendu que le réservoir est distinct du bouchon, d'ailleurs, nos courbes de tarissement sont souvent très différentes d'exponentielles.

Nous venons de voir que dans le modèle de Roche, la loi de Darcy s'applique. Il peut aussi se présenter des circonstances où elle s'applique au drainage d'une case ; envisageons, par exemple, une pluie suffisamment intense et de durée suffisamment longue pour établir et maintenir pour un certain temps un plan d'eau libre à la surface du sol ; pendant ce temps, le drainage d'abord croissant, atteint un maximum, puis se maintient en palier ; à ce stade, l'écoulement suit approximativement la loi de Darcy, mais nous n'avons pas eu l'occasion d'observer de tels paliers. (Voir III - 3 - 6).

Nous présentons ci-après un certain nombre de courbes de tarissement obtenues, soit par les débits journaliers, soit par les valeurs recueillies à partir des enregistrements en coordonnées semi-logarithmiques avec en abscisse, le temps en échelle arithmétique, et en ordonnée, le débit  $q$  en échelle logarithmique. Lorsque la variation est approximativement exponentielle, les points expérimentaux portés sur un tel graphique se trouvent approximativement sur une droite, étant donné la forme linéaire de l'expression

$$\ln q = \ln q_0 - \alpha t$$

La pente de cette droite ( $\alpha$ ) ou coefficient de tarissement que nous avons déjà défini comme l'inverse de temps  $T$ , au cours duquel chaque valeur tombe à  $1/e$  de sa valeur initiale, dépend des facteurs physiques du sol et de l'eau tels que la perméabilité du terrain, la porosité, la teneur en eau et la viscosité de l'eau. Pour chaque épisode étudié, nous avons envisagé que l'ensemble de ces facteurs sont identiques pour les trois cases, ce qui permet de lier les changements à la seule variable, c'est-à-dire la profondeur.

### III. - 4 - 2 Ajustement des données

Parmi tous les cas sélectionnés d'après les débits journaliers, les courbes de tarissement de cinq épisodes ont été portées sur les diagrammes semi-logarithmiques. Les origines de temps pour les cinq cas, sont respectivement

le 14 décembre 1961

le 24 novembre 1962

le 8 août 1965

octobre 1965

le 20 juillet 1966

On aperçoit, d'après les graphiques I - 13 - 1 à I - 13 - 5, que, pour chaque case, les points expérimentaux s'arrangent de façon telle que l'on peut les ajuster à deux droites successives, distinguées par deux pentes plus ou moins différentes : une pente assez forte de la droite qui correspond à une vidange rapide des réservoirs et une pente faible qui se produit normalement entre 3 et 5 jours après la fin des pluies et qui se maintient plus ou moins longtemps et même jusqu'à tarissement complet des cases. Cette dernière correspond bien entendu à une vidange plus lente que celle d'avant. Pour la case de 50 cm de profondeur, il arrive que la cassure soit très peu marquée ou même absente, et on peut alors dire que le régime de vidange suit à peu près une loi exponentielle pour toute la période de tarissement. Mais il n'en est pas de même pour les cases plus profondes, la vidange de celles-ci n'est pas exponentielle, mais on peut la représenter par deux exponentielles successives : la pente de la deuxième droite est beaucoup plus faible que celle de la première, et d'autant plus faible que la profondeur est plus importante. Cela signifie qu'en dessous d'une certaine valeur de réserve d'eau drainable, la décroissance du débit prend une allure moins accélérée qu'avant, cette nouvelle allure s'ajustant moins bien à une forme exponentielle. Autrement dit, entre  $t_0$  où se produit le débit maximum et  $t_n$  l'instant où celui-ci tombe à des valeurs extrêmement faibles, il existe un point  $t_1$  qui se trouve au croisement de deux droites,  $t_1$  et  $t_1 t_n$  à partir duquel le régime de vidange devient sensiblement plus lent. C'est en examinant les courbes de tarissement à partir des observations enregistrées que nous voyons beaucoup plus clair, ces cassures sur la courbe de tarissement avec le temps en heures en abscisse et le débit exprimé en mm/h en ordonnée.

Nous avons appliqué cette méthode à presque tous les hydrogrammes que nous avons présenté au cours des chapitres précédents. Les figures I - 14 - 1 à I - 14 - 4 présentent l'ensemble de ces courbes.

### III. - 4 - 3 Description des courbes

Sur la figure I - 14 - 2, les points expérimentaux de deux cases de 50 et 150 cm sont portés sur le même graphique.

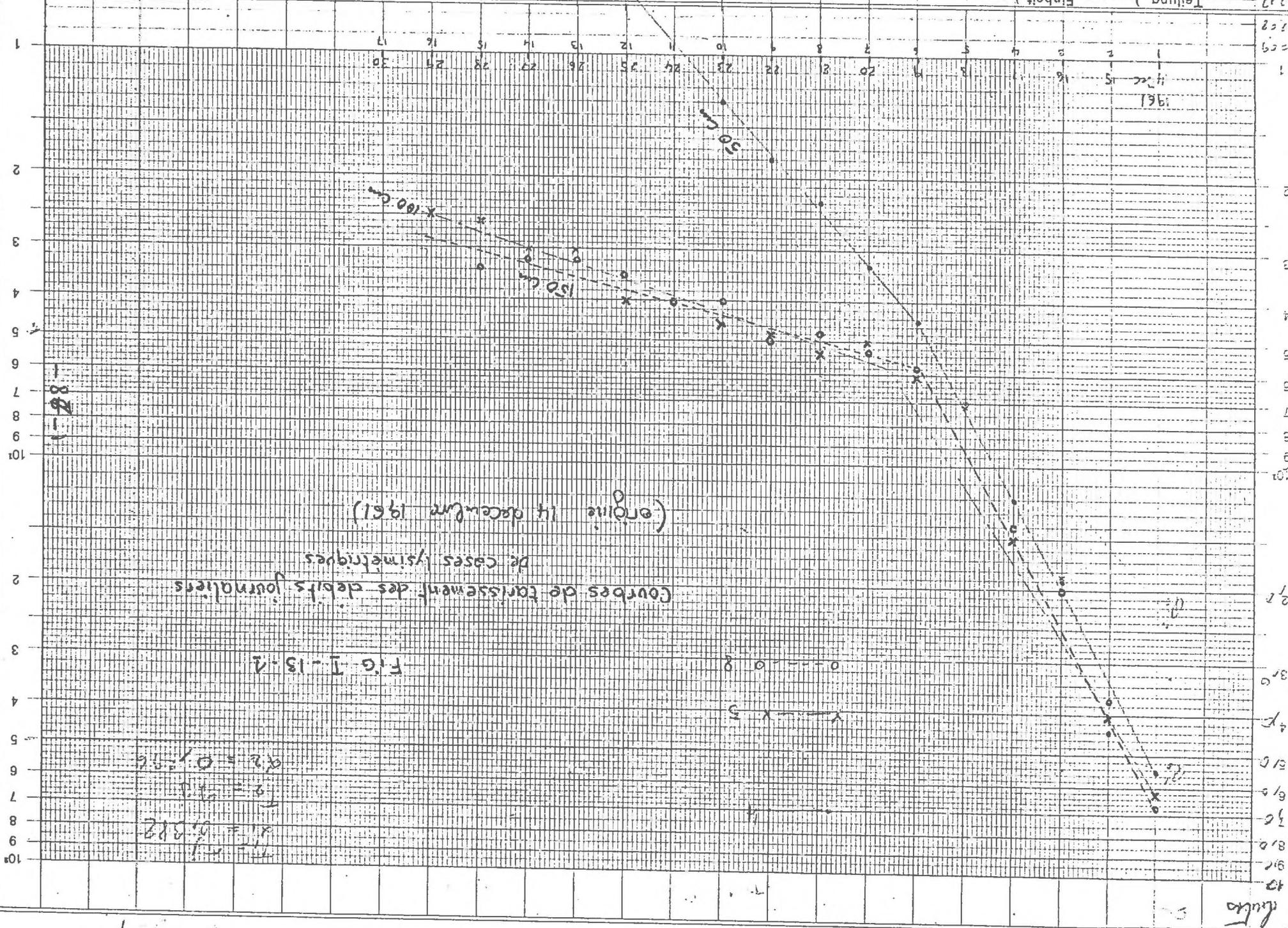
L'origine des temps correspond au 14 février, à 9 heures, et les courbes s'arrêtent le 20 février. Les points concernant la case de 50 cm suivent bien la droite (I) et ceux de la case de 150 cm, la courbe (II). L'hypothèse de vidange exponentielle pour la case 50 cm est donc valable lors de cet épisode (14 février - 20 février), sauf à partir de  $q < 0,005$  mm/h : alors, le débit tend à décroître plus lentement, mais nous négligeons cette partie de courbe qui correspond à un écoulement très faible. Le coefficient de tarissement, en considérant  $q_0 = 0,17$  mm/h est  $\alpha = 0,032$

La variation du débit pendant 7 jours de vidange peut être exprimée ainsi :

$$q_{50 \text{ cm}} = q_0 e^{-0,032 t}$$

avec  $t$  en heures et  $q$  et  $q_0$  en mm/h.

Pour la case de 150 cm, le problème n'est pas si simple parce que nous avons vu que les points expérimentaux ne présentent pas non plus une droite, mais une courbe qui pourrait être ajustée approximativement sur plusieurs segments de droite successifs. Nous avons essayé d'adapter cette courbe à trois droites, ayant trois coefficients de tarissement  $\alpha_1 = 0,124$ ,  $\alpha_2 = 0,012$  et  $\alpha_3 = 0,003$ . On pourrait interpréter ces trois coefficients en disant qu'ils expriment trois régimes de vidange qui se succèdent au cours du tarissement. En comparant les coefficients de tarissement des deux cases, on voit que  $\alpha_{150} > \alpha_{50}$ . Mais  $\alpha_{2150}$  et  $\alpha_{3150} < \alpha_{50}$ , ce qui exprime que la case la plus profonde a un régime de vidange plus rapide, juste au départ et pour quelques heures. Son débit varie ensuite beaucoup moins rapidement que celui de la case de 50, qui continue apparemment de drainer avec un  $\alpha$  constant (cf. l'importance des faibles débits dans l'écoulement des cases profondes déjà mise en évidence dans les chapitres précédents). Les résultats sont plus ou moins comparables pour les trois courbes de tarissement correspondant à la période du 23 février au 15 mars 1968. Celle de la case de 50 cm pourrait être ajustée à une, ou à la rigueur à deux droites avec les coefficients  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ , très peu différents l'un de l'autre. Par contre, les courbes des cases de 100 et de 150 cm, comme le cas précédent, présenteraient un régime mixte de vidange. La décomposition de ces différents régimes de tarissement se voit très clairement sur les figures I - 14 - 3a et I - 14 - 3b, où sont présentés deux hydrogrammes complets du drainage pour la période du 1er au 20 novembre 1968 de deux cases de 50 et de 100 cm ; car les points portés sur les graphiques présentent deux droites pour la case de 50 cm et trois pour celle de 100 cm.



Courbes de tarissement des débits journaliers  
 de cases lysimétriques  
 (origine 14 décembre 1961)

FIG. I-13-2

$T_1 = 0.382$   
 $T_2 = 0.156$

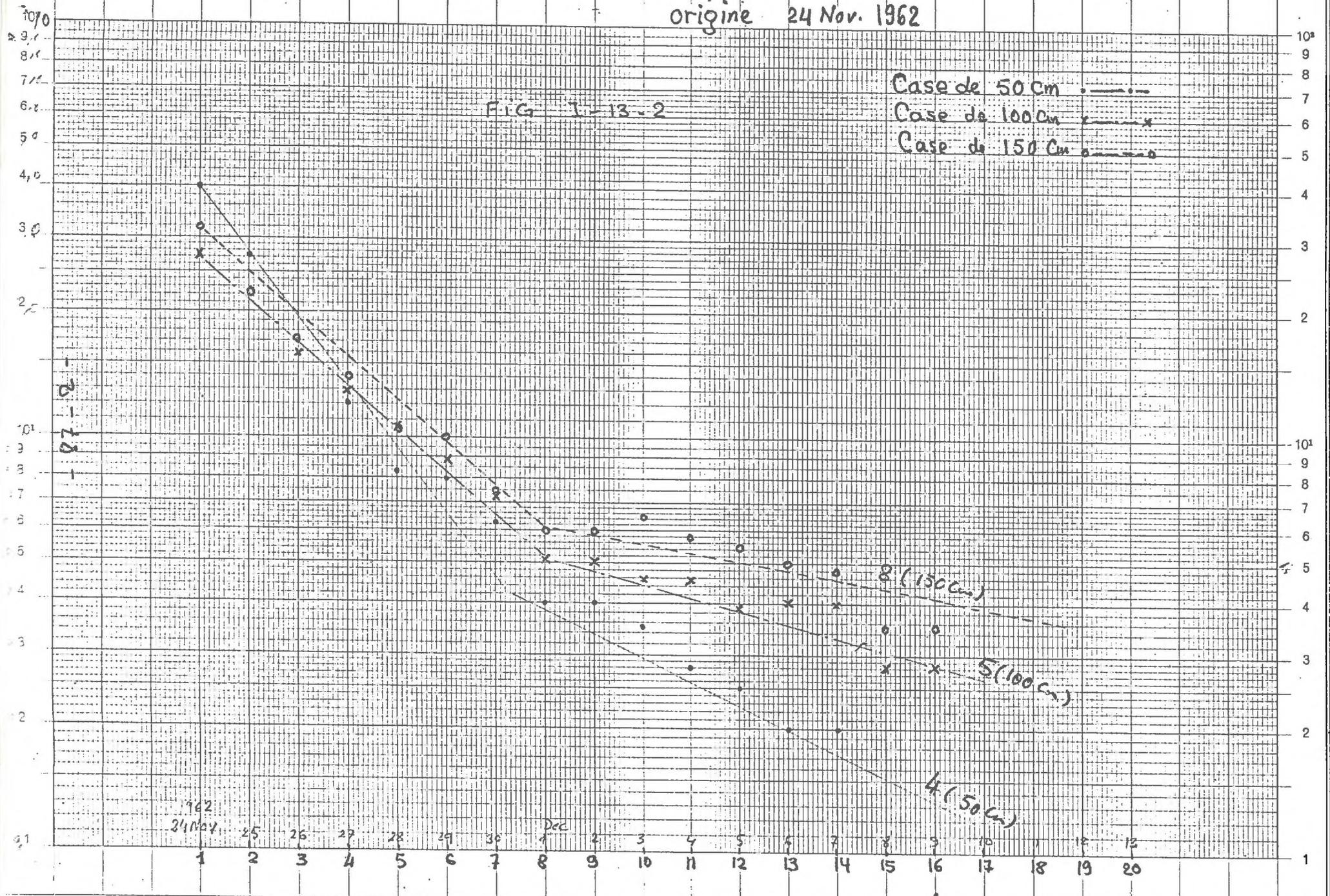
fin

debit en litres/j

origine 24 Nov. 1962

FIG 1-13-2

Case de 50 cm .....  
 Case de 100 cm .....  
 Case de 150 cm .....



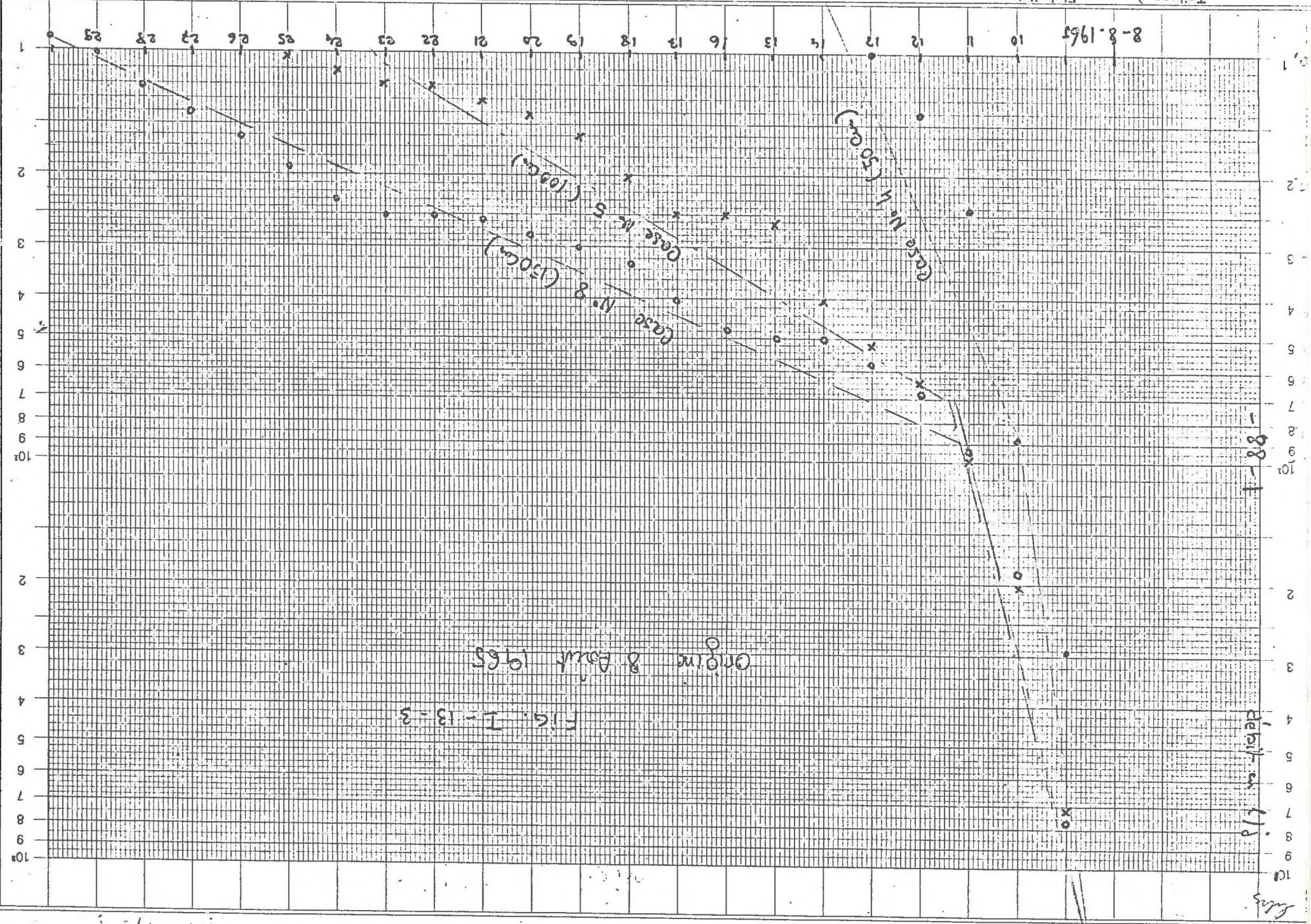
100  
80  
60  
40  
20  
10

1962  
24 Nov

Dec

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

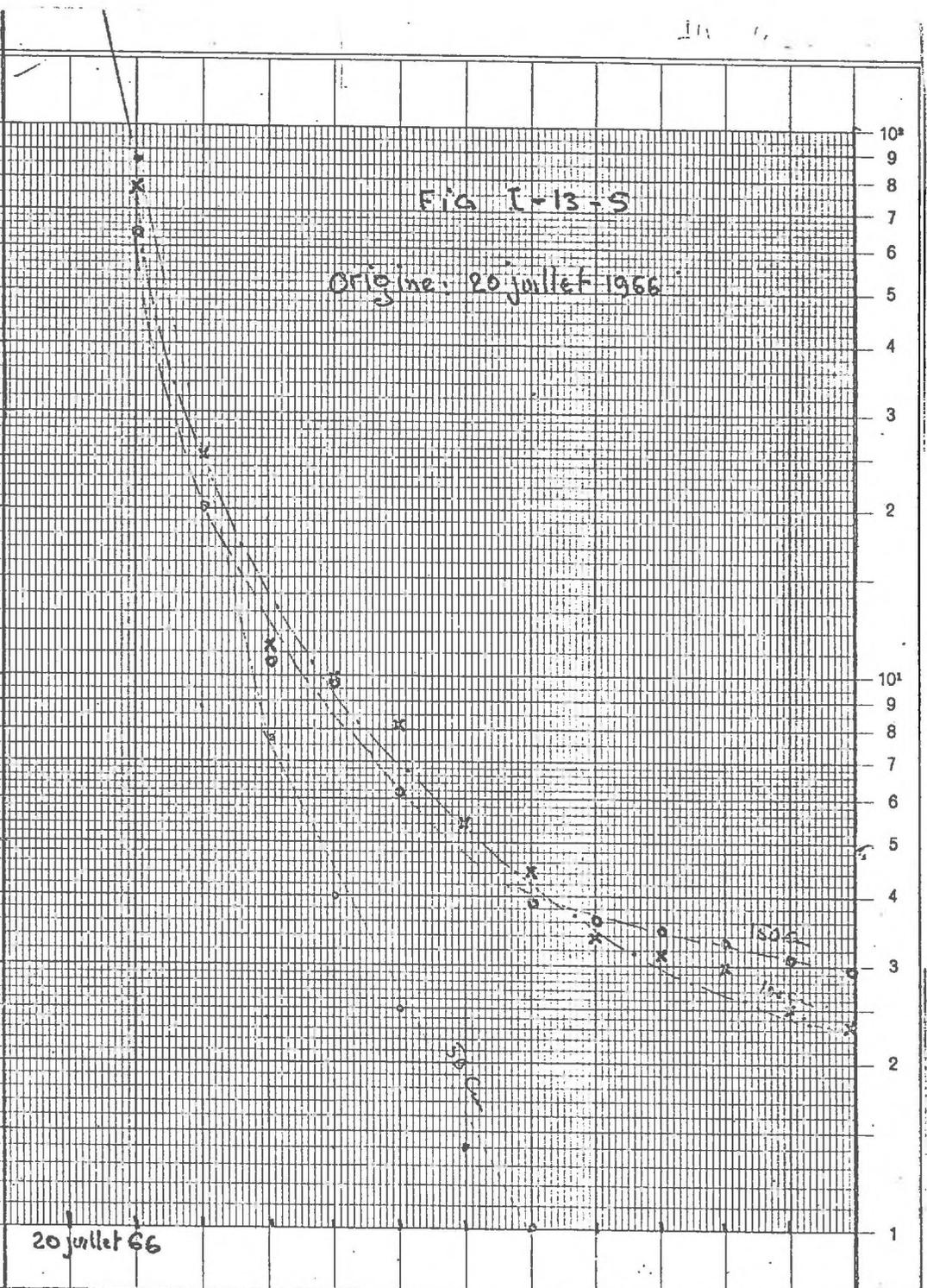
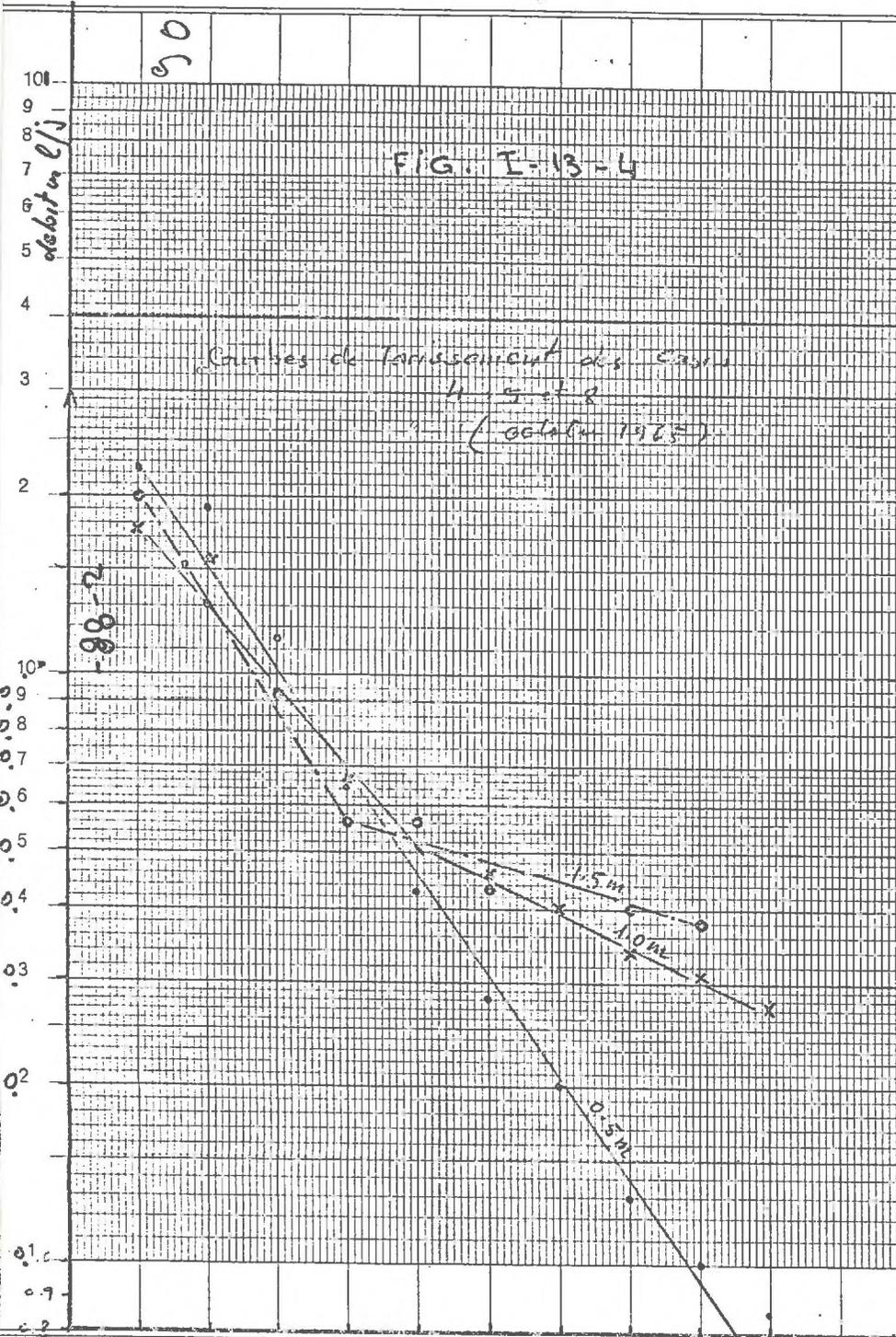
8-8-1965

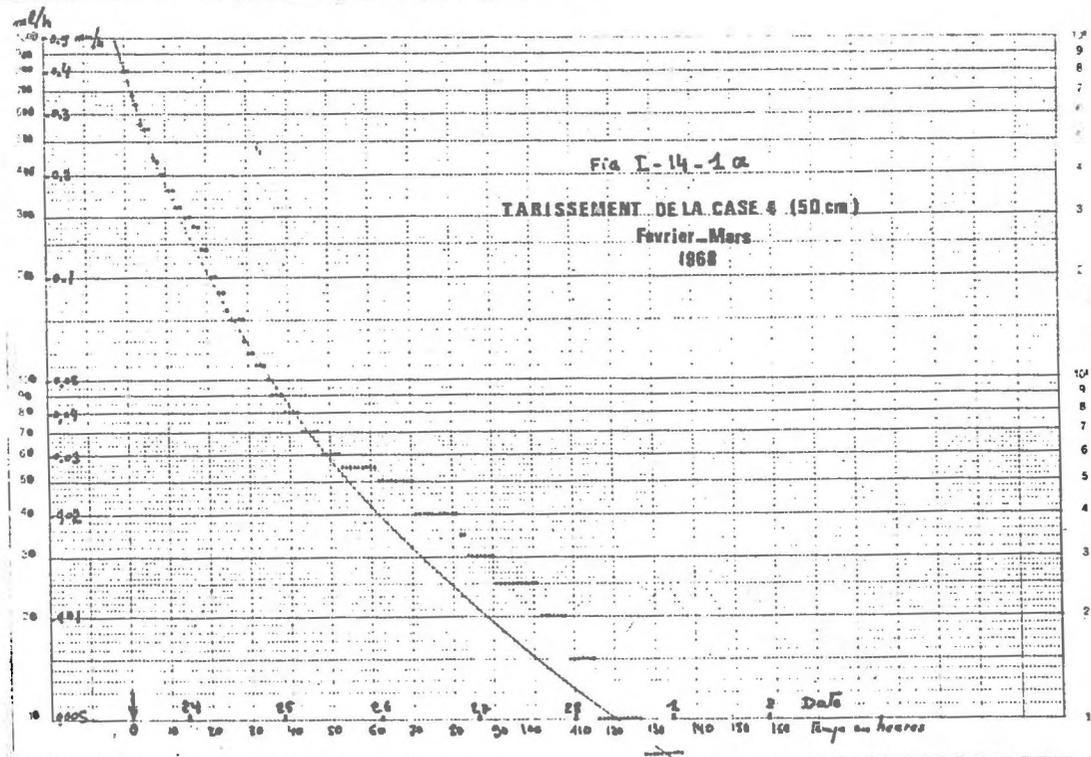


88-1

Depth in ft

ft

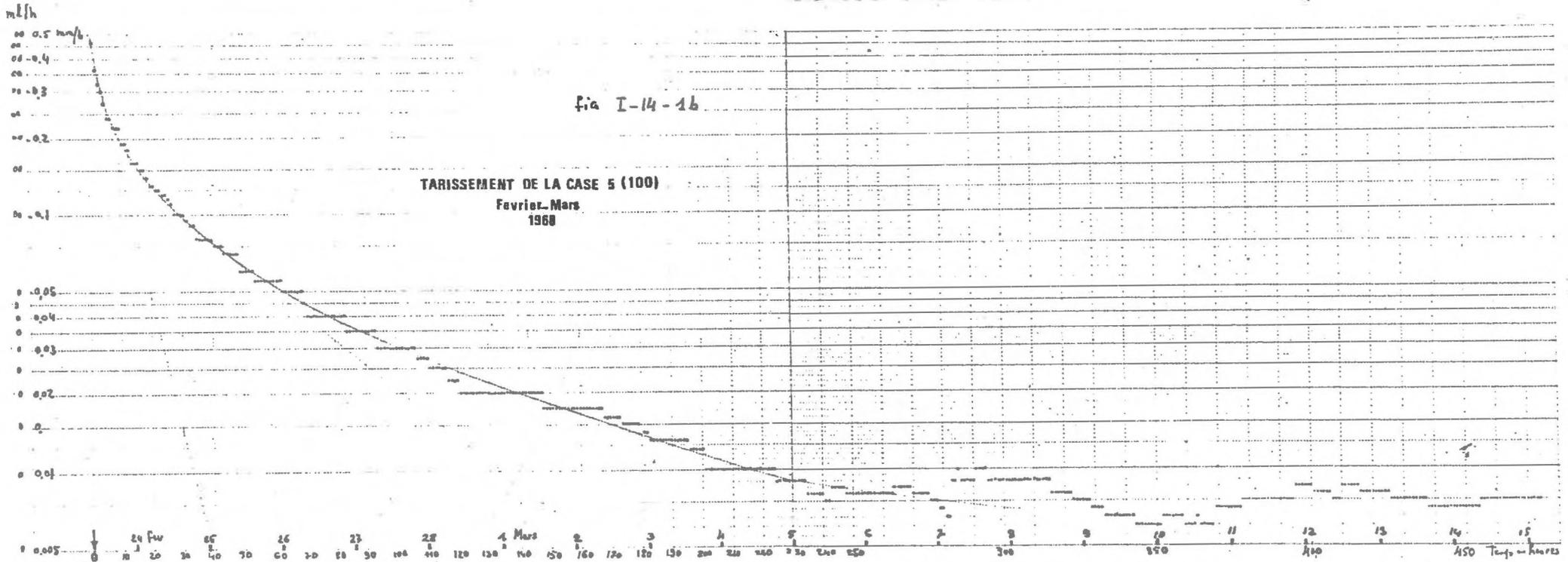




Teilung | 1-100 | Einheit | 83,33 mm  
 Logar. | Division | Units

Ed. Aerni-Leuch, Bern Nr. 527

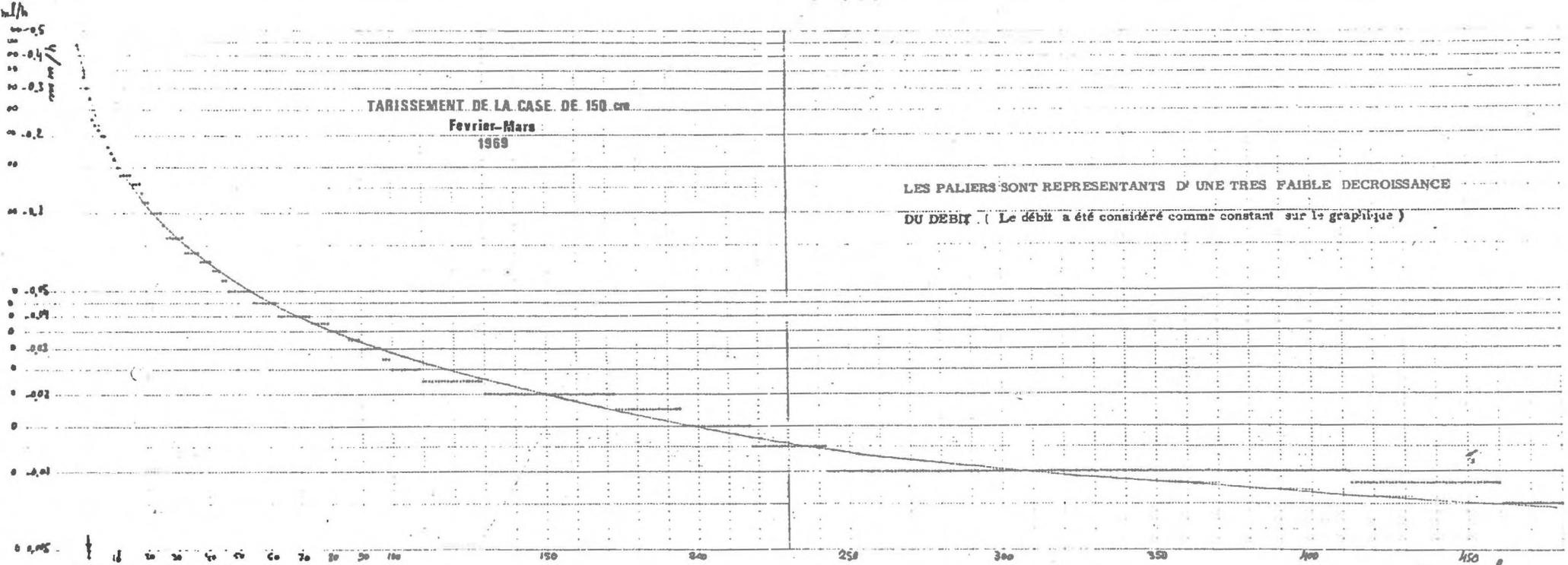
100 Mars



Logar. Teilung | 1-100, Einheit | 83,33 mm  
Division | 1-100, Unité | 83,33 mm

Ed. Aerni-Leuch, Bern Nr. 527 Logar. Teilung | 1-100, Einheit | 83,33 mm  
Division | 1-100, Unité | 83,33 mm

Ed. Aerni-Leuch, Bern Nr. 527



Logar Teilung | 1-100 Einheit | 83.33 mm  
 Division | Unité

Ed. Aerni-Leuch, Bern Nr 527 Logar Teilung | 1-100 Einheit | 83.33 mm  
 Division | Unité

150  
*Temps en heures*  
 Ed. Aerni-Leuch, Bern Nr. 527

Fig. I-14-2

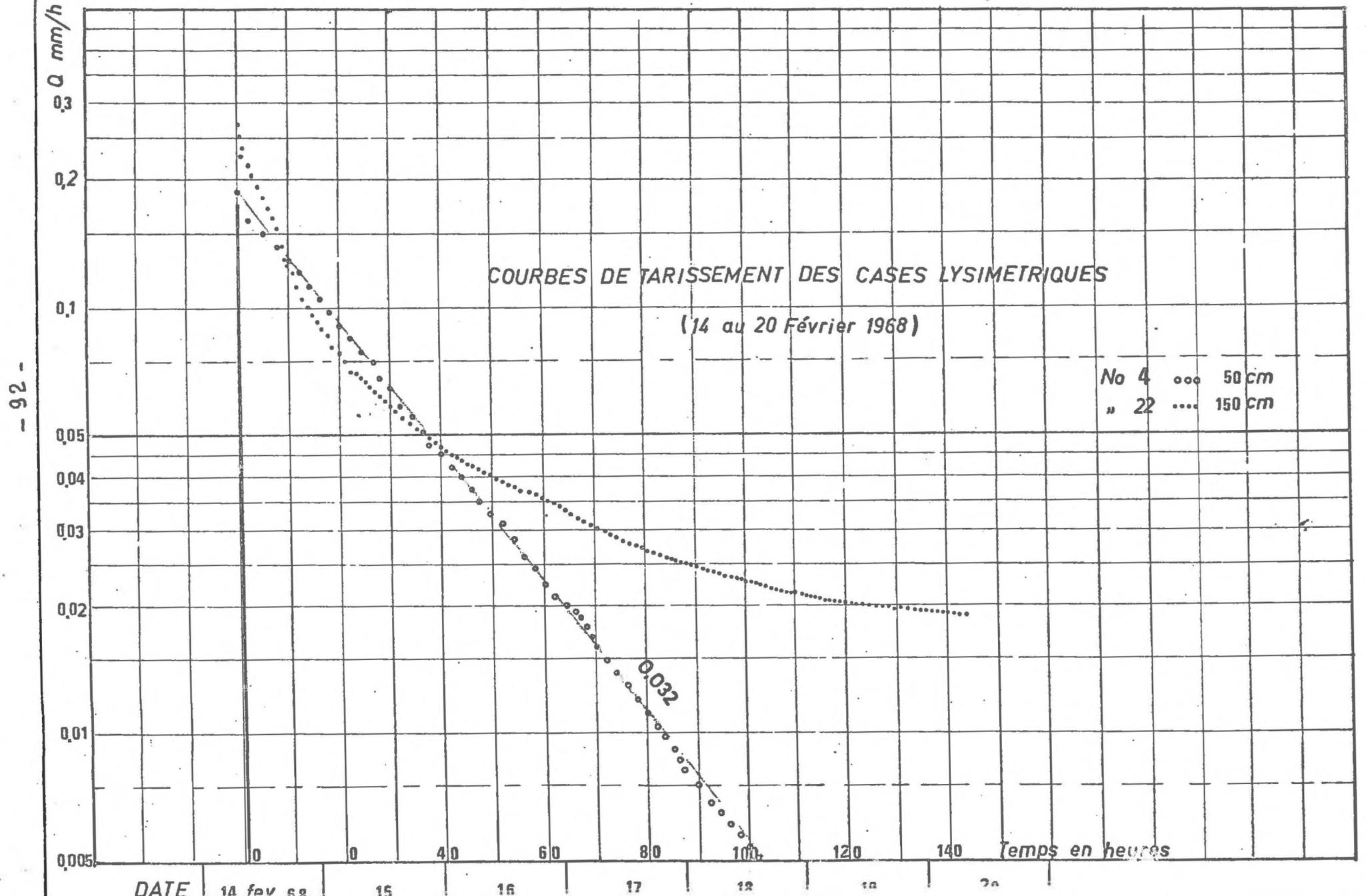
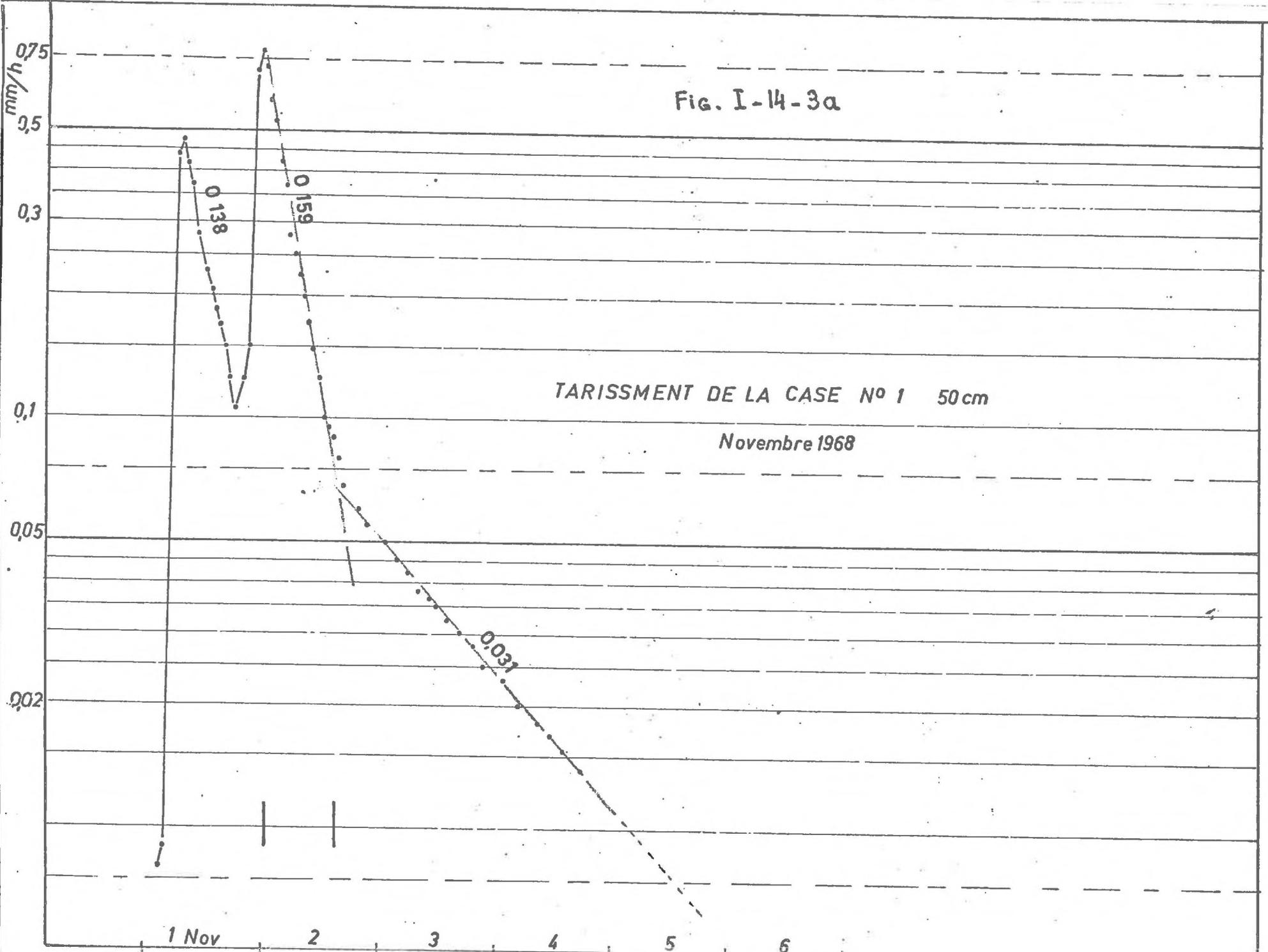


Fig. I-14-3a

TARISSMENT DE LA CASE N° 1 50 cm

Novembre 1968



- 94 -

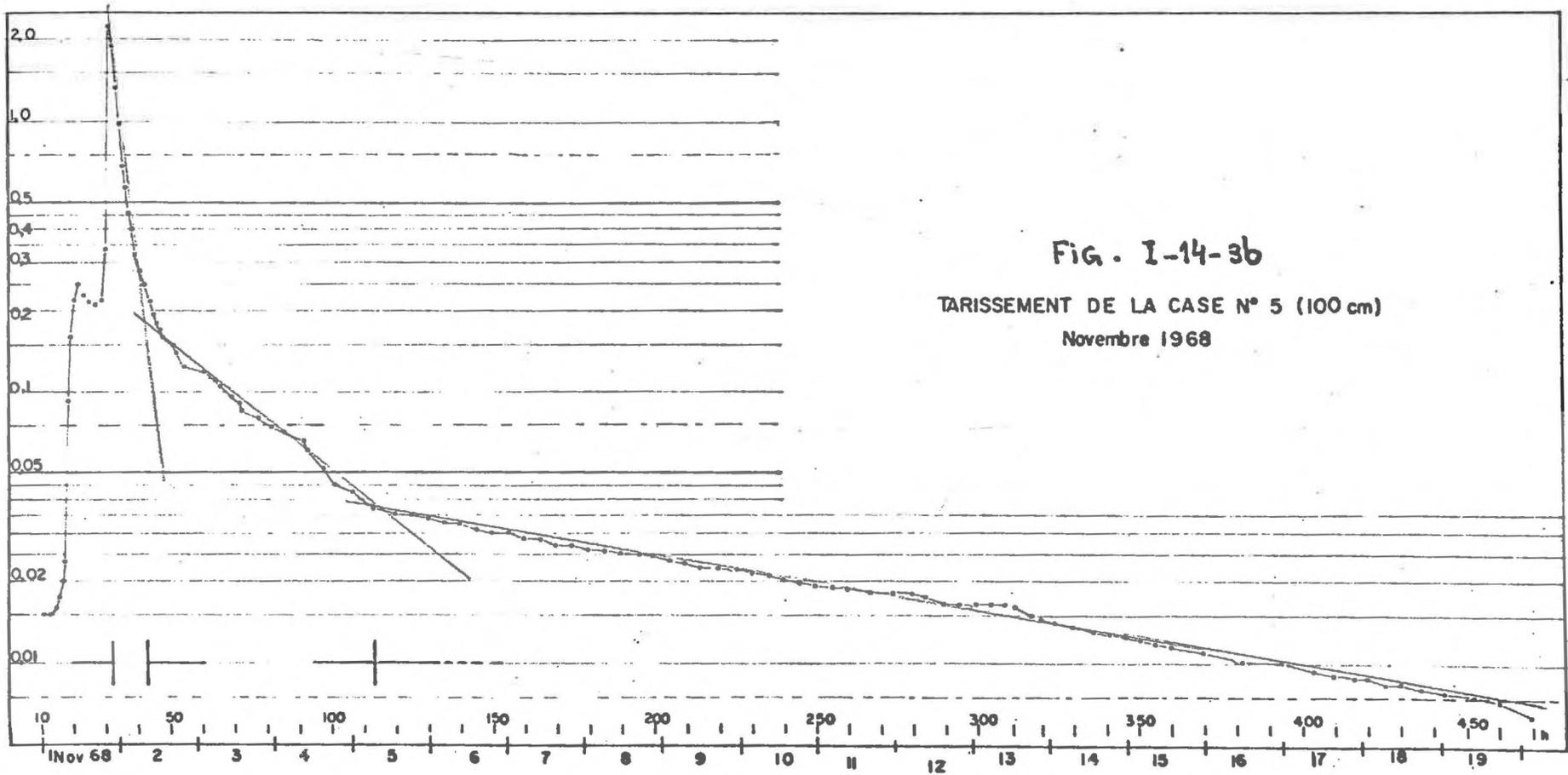


FIG. I-14-3b  
TARISSEMENT DE LA CASE N° 5 (100 cm)  
Novembre 1968

Les coefficients calculés d'après les débits maximums  $q_0$  sont les suivants :

Case de 50 cm

2 novembre	0 Heure	$q_0$	$\alpha_1$	=	0,8 mm/h	=	0,159
2 novembre	16 Heures	$q_0$	$\alpha_2$	=	0,065 mm/h	=	0,031

Case de 100 cm

1er novembre	22 Heures	$q_0$	$\alpha_1$	=	2,25 mm/h	=	0,224
2 novembre	9 Heures	$q_0$	$\alpha_2$	=	0,17 mm/h	=	0,020
5 novembre	7 Heures	$q_0$	$\alpha_3$	=	0,035 mm/h	=	0,0047

Les mêmes opérations sont effectuées pour la période du 12 au 25 avril 1969. On voit plusieurs courbes de décroissance sur chaque graphique qui montrent les charges successives des réserves pendant cette période. On observe des résultats assez analogues aux précédents. Pour chaque décroissance, un coefficient de tarissement est calculé qui est grosso modo proportionnel à  $q_0$ , le débit maximum correspondant.

III. - 4 - 4 Etude d'ensemble des résultats obtenus dans l'étude du tarissement

Le régime de vidange d'une nappe ou d'un réservoir quelconque est lié, sans doute, au comportement granulométrique et, plus exactement, à la perméabilité et à la porosité de celle-ci. Dans les réservoirs de petites dimensions, comme les cases lysimétriques, la pluviosité, la température et d'autres facteurs climatiques ont également un rôle important. Dans certains bassins de cours d'eau et en particulier lorsqu'ils sont soumis à un climat comportant une saison humide et une saison sèche bien tranchées, on peut observer une courbe de tarissement dont le coefficient est relativement constant (tarissement exponentiel). Ce coefficient est un indice de la perméabilité et de la capacité de rétention du bassin. Dans les

cases lysimétriques, après chaque pluie, il se produit un tarissement et l'intensité des pluies a son effet sur le coefficient de tarissement par l'intermédiaire du débit de pointe. D'autre part, ce coefficient de tarissement varie dans le temps, c'est-à-dire que les pentes de deux courbes de tarissement au droit d'une ordonnée correspondant à un même débit et pour une même case, sont différentes l'une de l'autre. L'exemple peut être donné par la case de 50 cm, le débit étant 0,065 mm/h le 2 novembre 1968 et le 15 avril 1969, le coefficient  $\alpha$  a des valeurs respectives de 0,031 et 0,023. Mais, dans certains cas et surtout pour les valeurs de débits très élevés,  $\alpha$  reste plus ou moins inchangé d'une période à l'autre. En tout cas, comme le débit  $q_0$  qui est un facteur représentatif de la perméabilité de la couche traversée, le coefficient de tarissement est un indice de la porosité de cette couche ; il y a bien entendu d'autres éléments tels que la température, agissant sur la viscosité de l'eau, sur sa tension superficielle ... dont le rôle est important.

Au cas où la vidange, ou plus exactement le tarissement d'une couche de terre, obéit à une loi exponentielle  $q = q_0 e^{-\alpha t}$  en considérant toutes choses égales, par ailleurs, plus les pores sont gros, pour constituer un réseau de canaux plus important pour le passage d'eau, plus  $\alpha$  sera élevé et le tarissement sera survenu plus tôt. Dans le cas de notre étude, nous avons vu que seulement la case avec la plus faible profondeur (50 cm) suit parfois une telle loi. Alors, comme il est indiqué, les valeurs de  $\alpha$  varient suivant le débit  $q_0$  et bien entendu, les conditions thermiques. En ce qui concerne le cas d'une exponentielle, d'après

$q = q_0 e^{-\alpha t}$ , il est facile d'évaluer à un moment donné la quantité d'eau emmagasinée dans la réserve qui est susceptible d'être drainée, c'est-à-dire l'eau contenue dans la macroporosité du terrain et influencée par les forces gravitaires. Si nous prenons  $V$  (1) le volume de cette quantité d'eau, on a :

$$V = \int_{t_0}^{\infty} q_1 t = q_0 \int_{t_0}^{\infty} e^{-\alpha t} = \frac{q_0}{\alpha} \left[ -\frac{1}{e^{\alpha t}} \right]_{t_0}^{\infty}$$

$$V = \frac{q_0}{\alpha}$$

Mais pour les cases plus profondes, et même souvent la case peu profonde, le cas n'est pas si simple et l'évolution du débit pendant une vidange de la réserve se présente comme nous l'avons indiqué, de façon telle qu'on peut

---

(1)  $V$  (volume) ou  $H$  (hauteur) suivant que  $q$  est exprimé en ml/h ou mm/h

la diviser en deux ou trois phases assez distinctes : par exemple, à partir d'une pluviométrie abondante provoquant une charge élevée, sur la courbe de tarissement, on trouve une double cassure divisant ainsi la droite en trois régimes de décroissance :

1. - Régime avec  $\alpha$  très élevé, correspondant sensiblement à une décrue qui ne dure que quelques heures
2. - Régime de décroissance moyen, avec  $\alpha$  relativement faible, avec une durée plus élevée que le cas précédent
3. - Régime de décroissance lente,  $\alpha$  très faible, avec une durée qui peut s'étendre à plusieurs jours.

Comparons ce qui précède (1, 2 et 3) avec une décroissance qui serait en totalité exponentielle : dans ce cas,  $\alpha$  resterait approximativement constante. Or, elle va en décroissant, autrement dit, la décroissance observée à partir d'un instant donné est plus lente que celle qui correspondrait à l'extrapolation exponentielle du segment de courbe qui précède cet instant.

Enfin, après le "3ème régime" indiqué ci-dessus, on constate souvent que le drainage, avant de s'annuler, reste pendant plusieurs jours et même quelques semaines extrêmement faible, cette phase n'est pas exponentielle.

On peut penser que la décroissance des valeurs de  $\alpha$  provient de ce que ce sont d'abord les plus gros pores qui se vident, leur épuisement rapide entraînant des valeurs élevées pour  $\alpha$ , puis l'eau qui draine provient de pores de plus en plus fins, avec des valeurs plus faibles pour  $\alpha$ .

Dans une comparaison entre cases de profondeurs différentes, remplies de façon homogène du même matériau, on pourrait envisager que :

- dans un premier temps, les classes de pores qui prennent successivement une part prépondérante dans le drainage soient les mêmes quelles que soient les cases,
- dans un second temps, le drainage cesserait à peu près dans les cases peu profondes et se poursuivrait dans les autres, alimenté par les systèmes capillaires ayant des "hauteurs d'ascension capillaire" supérieures à la profondeur des "cases peu profondes".

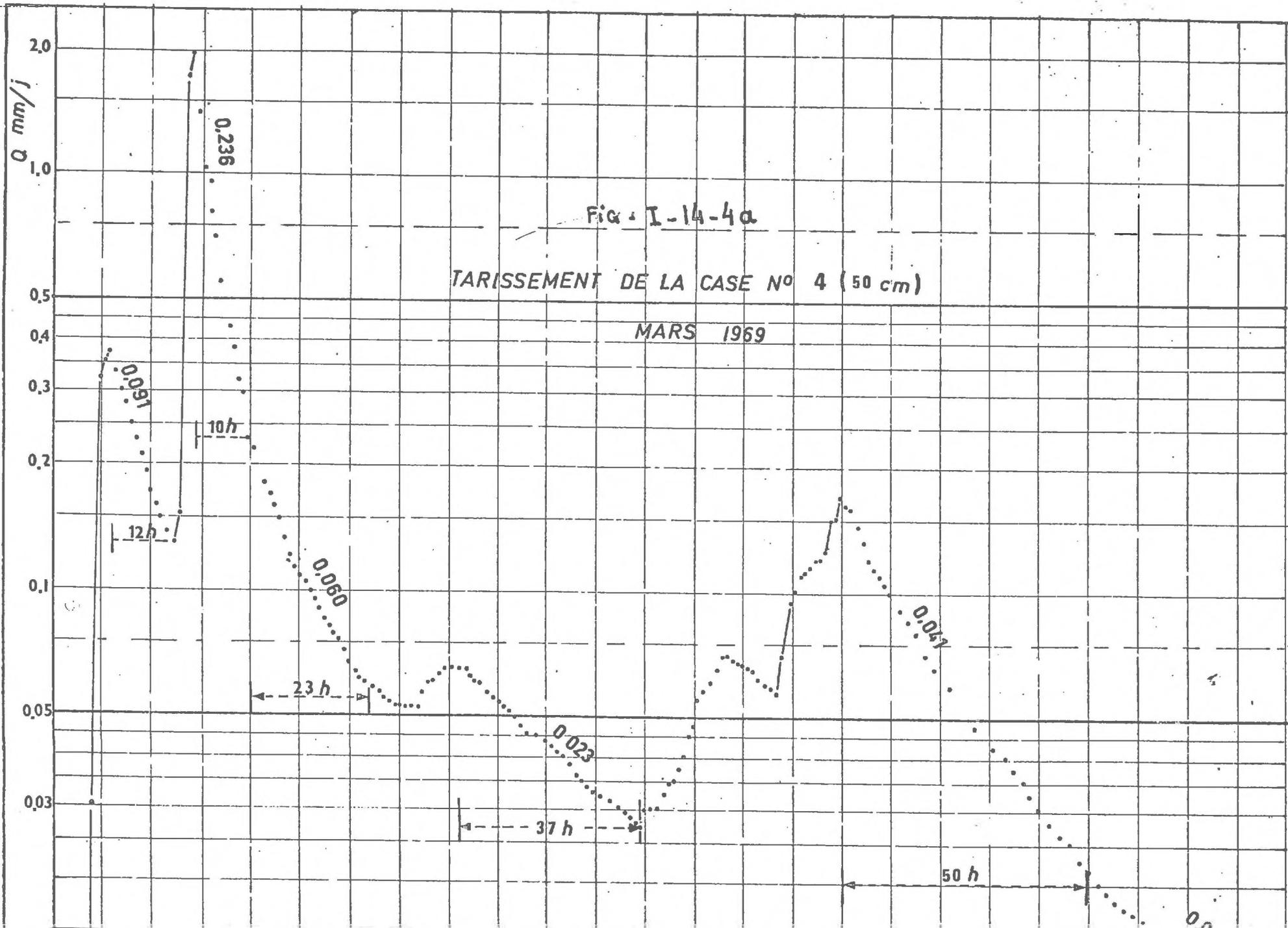
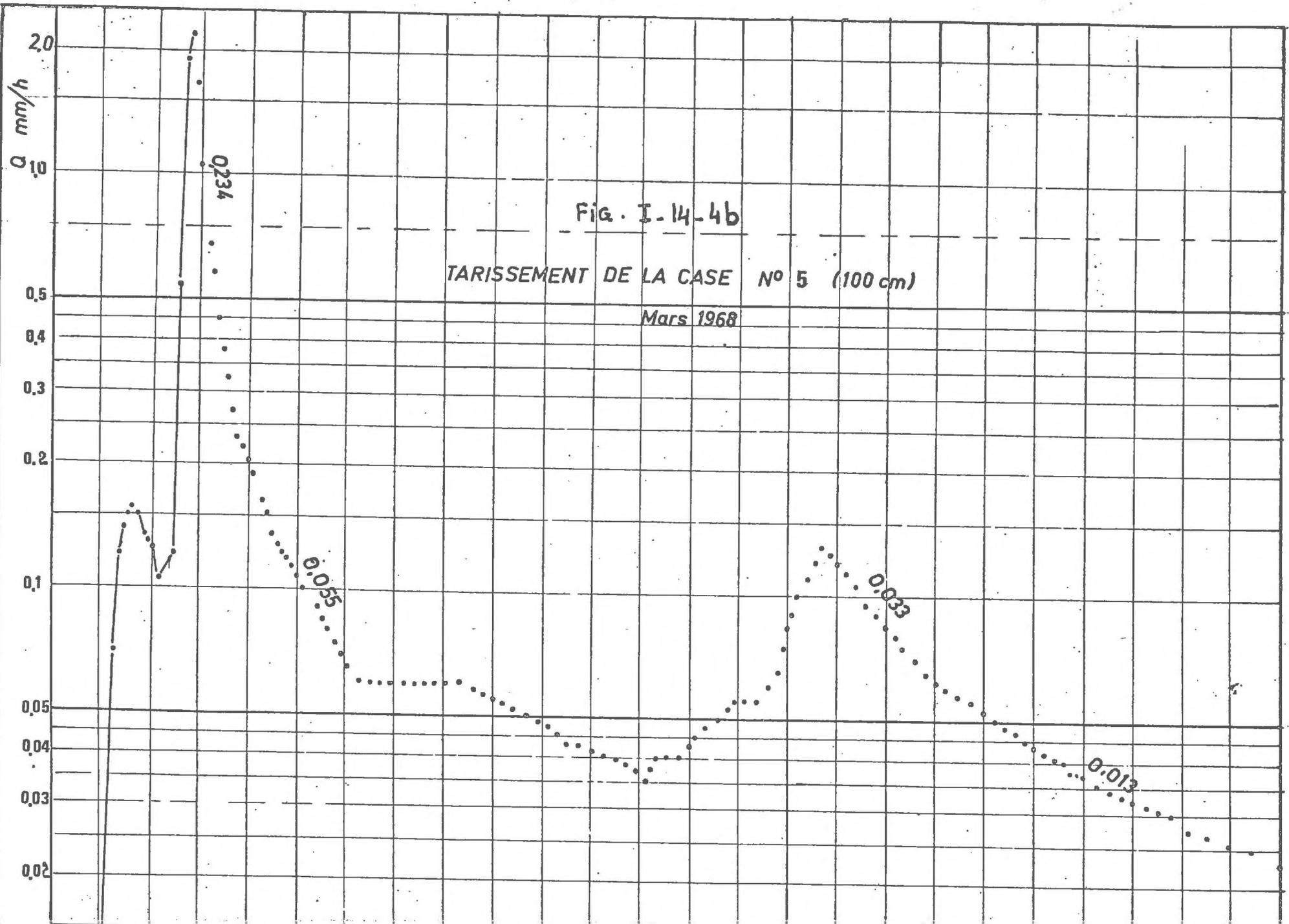


Fig. I-14-4a

TARISSEMENT DE LA CASE N° 4 (50 cm)

MARS 1969



DEUXIEME PARTIE  
=====

BACS EXPERIMENTAUX

---

(abrités)

GENERALITES

Au cours des chapitres précédents, nous avons examiné les variations du débit de drainage en fonction du temps pour des cases lysimétriques alimentées par les précipitations naturelles.

Nous avons vu que, dans la plupart des cas, et surtout pour l'étude de la fin de drainage on a été souvent gêné par de nouvelles pluies qui interrompent ainsi le processus de tarissement. Nous avons donc pensé à effectuer certains contrôles sur l'alimentation du sol en eau, cela posant des problèmes sur les cases lysimétriques qui ne recevraient pas que les précipitations et qui sont destinées, bien entendu, aux autres études. Nous avons donc été amenés à installer d'autres dispositifs avec des conditions aussi proches que possible de ce que nous avons déjà utilisé. Pour cela, nous avons construit cinq cuves cylindriques ; nous les avons remplies de terre et arrosées artificiellement. Quant au drainage, il a été enregistré au moyen des mêmes pluviographes qui nous ont servi pour les cases lysimétriques.

Ces dispositifs nous permettent donc :

- de suivre l'évolution du drainage jusqu'au tarissement complet, ce qui n'est pas toujours le cas pour les cases lysimétriques
- d'éliminer ou plus ou moins les facteurs d'évaporation,
- de faire intervenir les conditions d'arrosage qui ne sont pas réalisables spontanément par la pluie,

- de confirmer la validité des résultats de comparaison entre la case de 50 cm et celles de 150 cm, étant donné que parmi les cases peu profondes, une seule case est remplie du même matériau que les cases profondes. D'autre part, les trois cases peu profondes sont groupées à une extrémité des installations et leurs exutoires débouchent à une extrémité du tunnel dans lequel on recueille les eaux de drainage.

Ils présentent également un certains risques :

- ils ne sont pas enterrés, cela peut provoquer des effets thermiques sur les parois latérales. Nous avons protégé ces parois par des plaques isolantes, mais cette protection est imparfaite,

- ils sont installés à l'intérieur d'une serre froide et subissent le microclimat (température, variations de pression...), de plus signalons que ces bacs sont utilisés après leur remplissage et dans les mois qui suivent alors que les cases fonctionnent depuis plus de dix ans.

## I. - INSTALLATIONS

---

L'ensemble de ces installations est formé par cinq cylindres en matière plastique dont le diamètre intérieur est de 300 mm. La hauteur de ces cuves que nous appellerons désormais "bacs expérimentaux", varie suivant l'épaisseur envisagée du sol introduit. On a donc :

- deux bacs avec une hauteur totale de 180 cm, la profondeur du sol y est de 150 cm
- deux bacs avec une hauteur totale de 80 cm, l'épaisseur de la couche du sol étant de 50 cm
- un seul bac, avec 100 cm de hauteur totale et 90 cm d'épaisseur du sol.

Chacun de ces bacs est monté sur un support qui facilite son déplacement. Afin d'être à l'abri des précipitations, l'ensemble des appareils a été installé dans une serre aérée, n'ayant aucun dispositif thermique (chauffage, etc...).

Le fond de chaque bac est coupé obliquement avec une dénivellation de 6 cm afin de faciliter le drainage vers la sortie, qui se trouve au point le plus bas du fond. Un tube plastique conduit l'eau recueillie jusqu'à l'appareil enregistreur.

L'intérieur de chaque bac est constitué par deux parties distinctes :

Tableau 2-I-1

## Caractéristiques générales des " bacs expérimentaux "

No. du Bac	Hauteur totale cm	Poids vide kg	MATERIAUX DE REMPLISSAGE en Kg							Profondeur efficace du sol cm
			FOND DRAINANT				Terre séchée à l'air	EAU		
			Cailloux 1 - 3 cm	Gravier 1 cm	Sable	Eau l.		Remplis- sage	Humec- tation	
I	180	33	20	6	5	5 <sup>+</sup>	145,0	54,0	2	150
II	180	33,5	20	6	5	4	142,0	52,0	2	150
III	80	21,5	20	3	5	4	47,0	18	2	50
IV	80	23,0	20	3	5	4	48,2	18	1	50

+ : Cette quantité d'eau correspond à celle qui a été utilisée pour immerger le fond drainant avant le remplissage .

### 1. - Fond drainant

Cette partie qui remplit une hauteur de 20 cm environ dans les bacs profonds, comporte respectivement de bas en haut :

- une feuille de toile métallique,
- une couche de cailloux de diamètres compris entre 1 et 3 mm
- une couche de graviers avec  $\phi < 1$  cm
- une couche de sable de Fontainebleau.

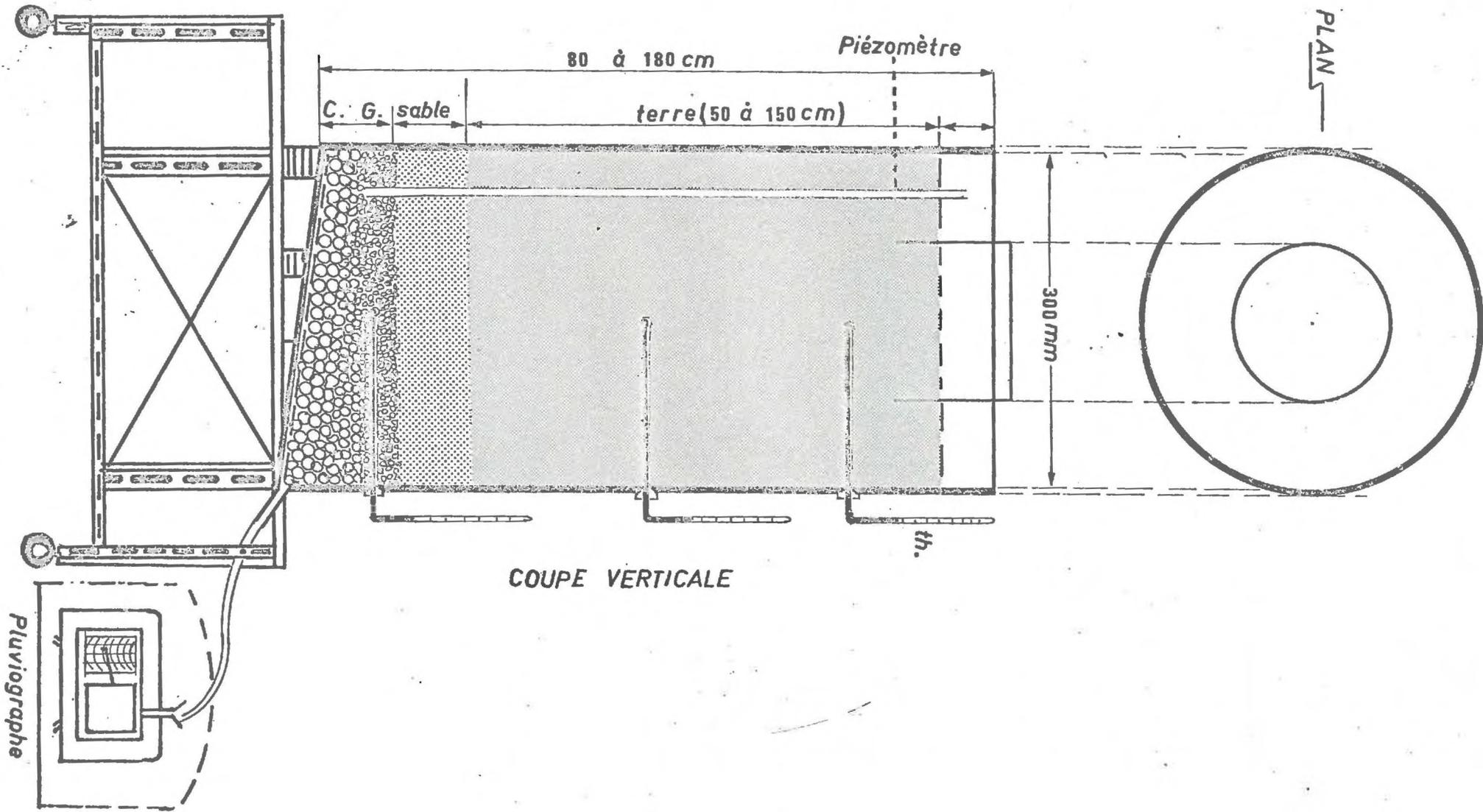
### 2. - La couche drainante

C'est la hauteur du bac occupée par le sol à étudier, qui constitue une hauteur de 150 cm, 100 et 50 cm suivant les bacs.

Les caractéristiques des bacs et les quantités des matériaux utilisés pour le remplissage sont présentés dans le tableau 2 - I - 1. (sauf pour le bac de 100).

Nous avons introduit en outre 3 à 4 thermomètres coudés dans chaque bac, à différents niveaux du sol, ainsi que dans le fond drainant. Pour diminuer autant que possible les échanges thermiques latéraux, chaque bac a été habillé de plaques isolantes. Il est vraisemblable que cette précaution ne supplée qu'imparfaitement au fait que, contrairement aux cases, les bacs ne sont pas enterrés.

La figure II - 1 présente une coupe verticale d'un bac expérimental.



COUPE VERTICALE

I. - 1 Remplissage

- Sol utilisé -

Le sol utilisé pour le remplissage de ces bacs a été prélevé dans une parcelle située au Centre National de Recherches Agronomiques de Versailles, à une profondeur de 40 à 60 cm. Cette terre a été séchée à l'air avant d'être introduite dans les bacs ; le prélèvement a été effectué en deux fois au même endroit ; le matériau a été soigneusement brassé pour améliorer l'homogénéité. Le tableau 2 - I - 2 ci-dessous présente les résultats des analyses granulométriques de deux prises d'essai :

Tableau 2 - I - 2  
Composition granulométrique du sol

Taille des particules		%	
		1ère Prise d'Essai	2ème Prise d'Essai
Argile	$\phi < 2 \mu$	23,69	22,08
Limon fin	$2 < \phi < 20 \mu$	21,25	22,47
Limon gros	$20 < \phi < 50 \mu$	41,44	41,37
Sable fin	$50 < \phi < 200 \mu$	9,94	10,25
Sable grossier	$200 < \phi < 2 \text{ mm}$	1,0	1,14
Matières Organiques		0,80	0,90

La méthode de remplissage est la même que celle utilisée pour les cases lysimétriques : immersion de la terre préalablement séchée ; signalons qu'ici la sécheresse initiale s'est trouvée trop poussée (1,8 d'eau pour 100 de terre), si bien qu'il a fallu réhumecter légèrement la terre avant de la soumettre à l'eau pour limiter la brutalité de l'éclatement, sinon on aurait obtenu une structure trop compacte.

I. - 2 Calcul de quelques paramètres du sol.

Densité, porosité et humidité dans les bacs après le remplissage

La vidange de chaque bac a été déclenchée 24 heures après son remplissage. L'eau gravifique s'est alors écoulée au cours d'une durée qui varie de 6 à 9 jours, suivant la profondeur du bac. La quantité d'eau ainsi drainée a été mesurée à l'aide des appareils enregistreurs.

L'humidité de la terre à la fin de la période de vidange c'est-à-dire la capacité de rétention de la terre dans l'appareil, est calculée, en négligeant l'évaporation (on a cherché à la limiter le plus possible) par la formule :

$$H \% = \frac{(P_R + P_I) - (P_d + P_r)}{P_S} 100$$

H : humidité pondérale en pourcentage

P<sub>S</sub> : poids de terre séchée

P<sub>R</sub> : poids total de l'eau utilisée pour le remplissage

P<sub>I</sub> : poids de l'eau équivalent à l'humidité initiale de la terre (mesurée par séchage à 105°C) reporté au poids de la terre utilisée

P<sub>d</sub> : poids total de l'eau drainée

P<sub>r</sub> : poids de l'eau retenue par les matériaux constituant le fond drainant

Densité apparente

Le volume occupé par la terre dans chaque bac est connu, ainsi que le poids de la terre séchée à 105°C utilisée, on a donc :

$$d = \frac{P_S}{V}$$

Porosité

En considérant que la masse volumique réelle de cette terre séchée D est égale à 2,6 (S. Hénin, Profil cultural), le volume occupé par la terre en p.100 sera :

$$V_s = \frac{d}{D} 100$$

le volume des vides, ou la porosité dans le bac est :

$$m = \left(1 - \frac{d}{D}\right) 100$$

L'humidité volumique finale sera :

$$H_v = H_r \times d$$

Le tableau ci-dessous montre les valeurs ainsi calculées pour les quatre bacs expérimentaux.

Tableau 2 - I - 3

Caractéristiques du sol utilisé

BAC N°	Densité Apparente d	Porosité en % de volume	Capacité de Rétention dans le bac	Volume occupé par l'air en %
I	1,35	48	44	4
II	1,32	49,2	42,2	7
III	1,31	49,0	48	1
IV	1,35	48,0	46	2

Nous avons vérifié la quantité d'eau retenue par les différents matériaux qui constituent le fond drainant. Les mesures effectuées en laboratoire ont montré que les cailloux retiennent environ 0,6 % d'eau, ce qui nous donne une quantité totale de 120 ml pour 20 kg de cailloux se trouvant à l'intérieur de chaque bac expérimental. De même, le gravier a une capacité de rétention de 1,8 %. Ce volume d'eau retenu par 6 kg de gravier atteint 108 ml qui est également négligeable. En ce qui concerne le sable, les mesures ont été effectuées sur deux échantillons de 2 et 4 cm d'épaisseur, l'eau gravitaire étant évacuée au bout de deux heures. Si on adopte 23 % d'eau retenue par le sable, 5 kg de sable sec dans des bacs retiendront un volume de 1,15 l d'eau. C'est une quantité faible par rapport à l'humidité totale du bac ; il est vraisemblable que cette humidité du sable varie peu au cours du temps (une couche de 4 cm de sable humide n'a pas donné d'écoulement détectable après deux heures de ressuyage). Néanmoins, on peut se demander si l'interposition de cette couche de sable (entre la terre et les matériaux très grossiers situés plus bas) ne modifie pas quelque peu la courbe de tarissement.

## II. - EXPERIENCES - ETUDE DU DRAINAGE

Ving-quatre heures après le remplissage de chaque bac, nous avons ouvert la sortie pour que l'eau accumulée dans le fond et l'eau excédentaire à la capacité de rétention de la couche drainante soient drainées.

C'est cette phase, dans laquelle la terre est initialement submergée complètement que nous nommerons maintenant "vidange".

Le débit de vidange a été enregistré et nous avons établi les courbes de ce débit. La durée nécessaire pour que toute l'eau gravitaire soit évacuée, s'élève de 5 à 12 jours suivant l'importance de la profondeur de la couche drainante (1). Au cours de ce temps, à la suite d'un tassement, le niveau de terre a baissé environ de 5 à 7 cm dans les bacs peu profonds et de 10 cm dans ceux profonds. Ce tassement a porté l'épaisseur de la couche drainante à 50 et à 150 cm environ. A partir du 23 juillet 1968, où les 4 bacs ont été mis en service, nous avons effectué toute une série d'arrosages successifs. Il faut rappeler que le but essentiel de ces opérations était l'étude du tassement de la couche du sol ; nous avons donc choisi la quantité d'eau pour l'arrosage de façon à ce qu'elle provoque un drainage assez important. Les arrosages ont été effectués avec des moyens très simples et sur une partie de surface limitée par un cylindre pour empêcher la circulation rapide de l'eau à travers les fissurations provoquées par le décollement de la terre des parois des bacs. Tout comme dans l'étude des cases lysimétriques, les arrosages fournissent une série d'hydrogrammes du drainage, dont les différents composants sont présentés dans les tableaux ci-après.

---

(1) Voici pour exemple les quantités d'eau drainées par jour au cours de vidange de deux bacs : N° I (150 cm) et N° IV (50 cm)

	BAC N° I		BAC N° IV	
Premier jour	11.800 ml	169 mm	6.080 ml	87 mm
Deuxième jour	2.400	34	80	1
Troisième jour	800	12	80	1
Les 3 jours suivants	760	11	140	2
Les 3 jours suivants	600	9	nul	0
Le jour suivant	nul	0	nul	0

## II. - 1 - Courbes de vidange des bacs après le remplissage

Au cours de la première heure de vidange, la quantité d'eau évacuée des bacs est de l'ordre de 4,3 à 4,9 litres. Cette quantité correspond en grande partie à celle qui avait rempli le fond drainant (3 à 4 litres, soit environ 50 mm) et qui est drainée au cours de quelques minutes seulement. Une fois drainée l'eau qui remplissait ainsi le milieu grossier, le débit tombe rapidement à des valeurs assez faibles.

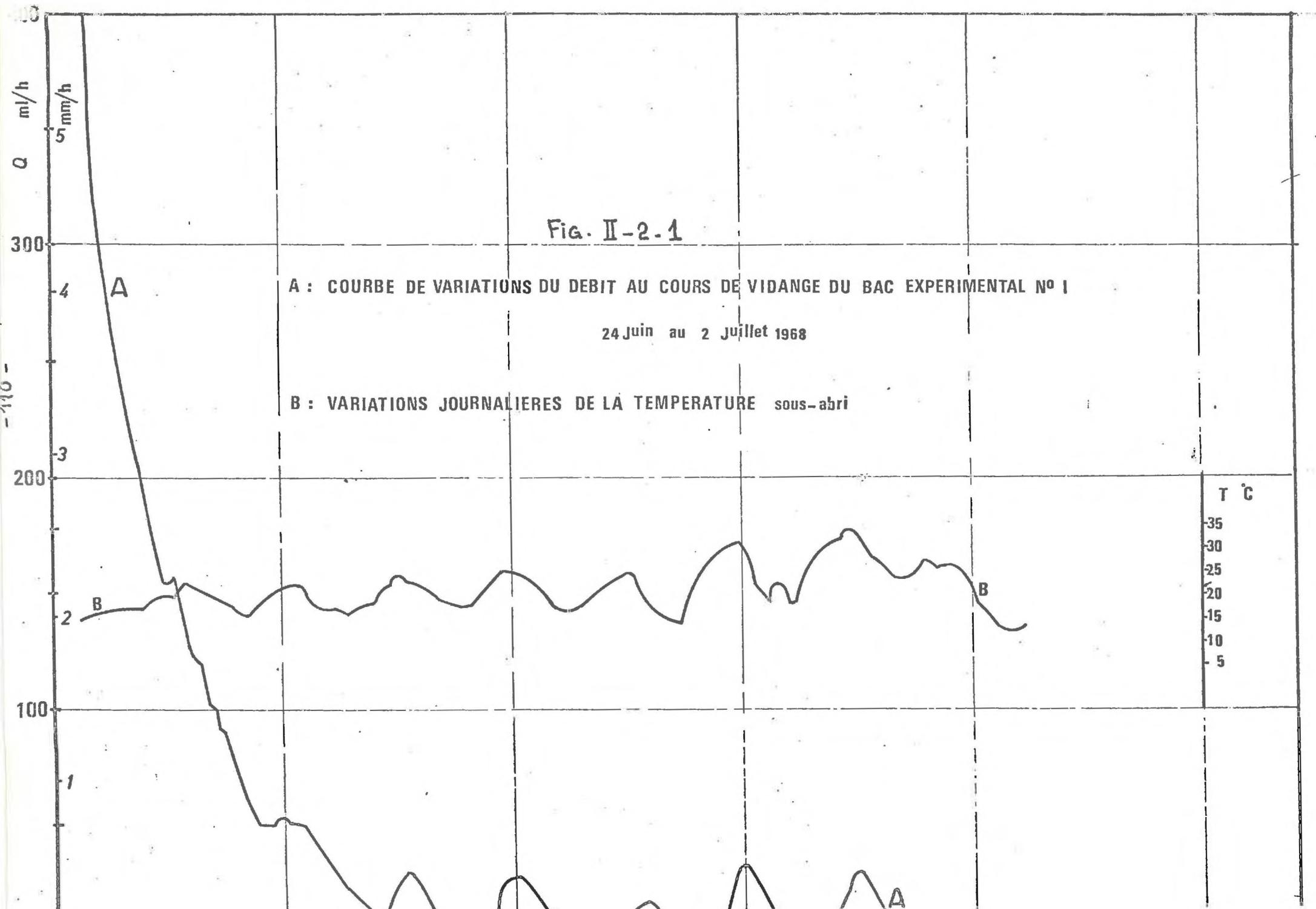
Au cours de la vidange des quatre bacs, nous avons observé un phénomène qui s'est produit presque toujours au cours du tarissement des bacs profonds, mais qui n'a pas été remarqué dans les cases lysimétriques. Il s'agit d'oscillations approximativement périodiques du débit du drainage dont la période est de 24 heures. Les graphiques II - 2 - 1 et II - 2 - 4 présentent les quatre courbes de vidange des bacs. On remarque que ces variations diurnes ne sont pas aussi importantes dans les bacs peu profonds que dans les profonds. D'autre part, il est assez difficile d'interpréter une telle variation. Etant donné que le débit du drainage des bacs peut être influencé par la température, nous avons présenté sur les graphiques la courbe de variations de la température journalière pour les mêmes périodes de vidange (température de l'air sous abri ; la température maximum dans la serre est certainement bien supérieure aux valeurs présentées sur le graphique). D'après les graphiques exposés (graphiques II- 2 - 1 à II - 2 - 4), il semble que la courbe de débit du drainage subit plus ou moins les variations de la courbe de température journalière, c'est-à-dire qu'à chaque T maximum correspond un débit maximum, on peut avoir un décalage d'une ou deux heures. D'après nos observations, la température à l'intérieur des bacs, dans la terre, varie peu au cours de la journée ; l'amplitude de ces variations pour la terre dépasse rarement 2 ou 3 °C ; elle est un peu plus élevée dans le gravier du fond drainant ; de telles variations de température n'entraînent que de faibles variations de viscosité de l'eau ; cet effet de viscosité semble donc très insuffisant pour expliquer les fortes variations de débit observées, peut-être les variations de tension superficielle joueraient-elles un rôle plus important (voir troisième partie).

Fig. II-2.1

A : COURBE DE VARIATIONS DU DEBIT AU COURS DE VIDANGE DU BAC EXPERIMENTAL N° I

24 Juin au 2 Juillet 1968

B : VARIATIONS JOURNALIERES DE LA TEMPERATURE sous-abri



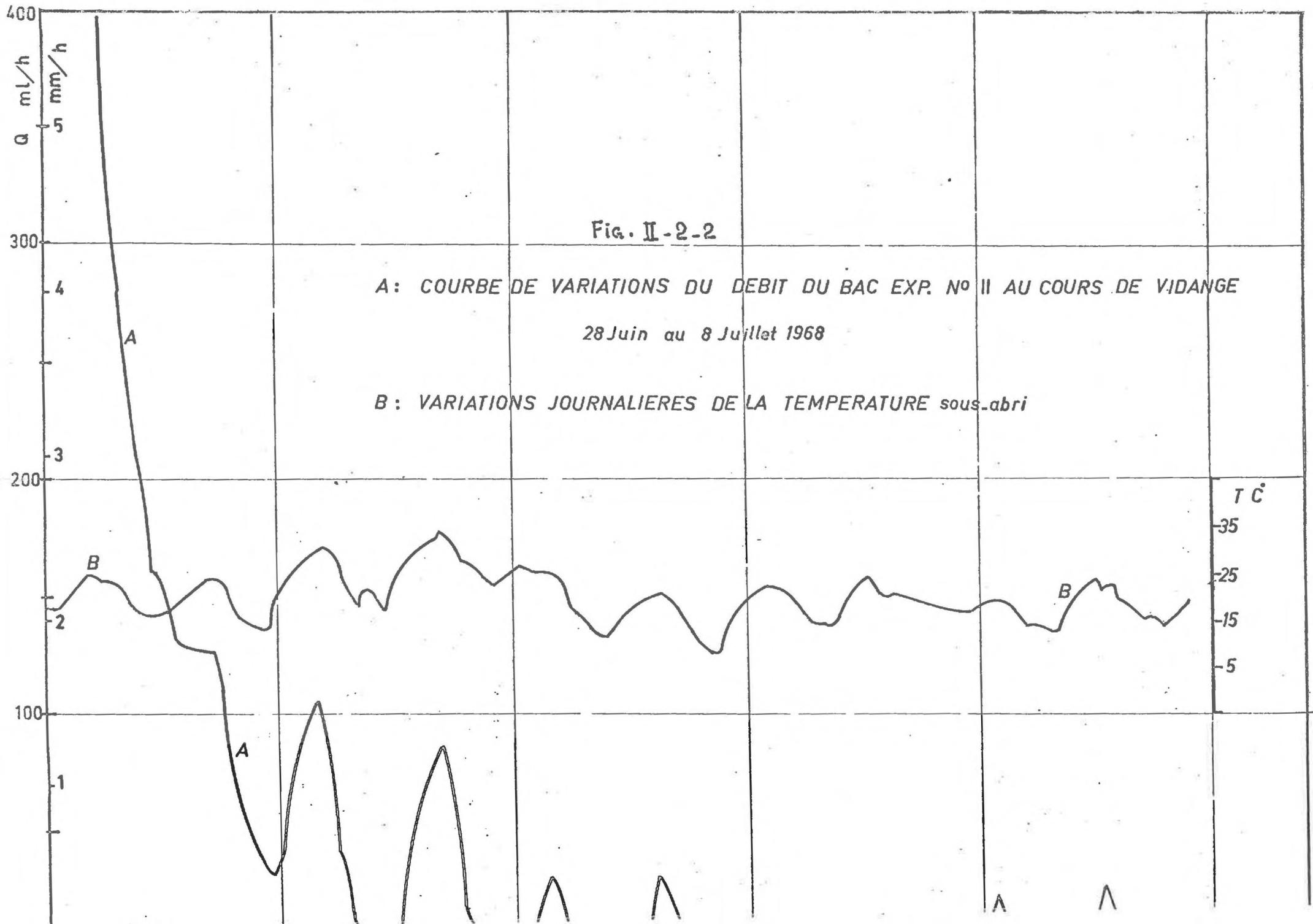


Fig. II-2-2

A: COURBE DE VARIATIONS DU DEBIT DU BAC EXP. N° II AU COURS DE VIDANGE

28 Juin au 8 Juillet 1968

B: VARIATIONS JOURNALIERES DE LA TEMPERATURE sous-abri

II. - 2 - Analyse des hydrogrammes du drainage de différents arrosages

Etant donné que les bacs étaient à l'abri des précipitations naturelles, ils ne recevaient aucune alimentation en cours de tarissement ; chaque arrosage (instantané ou étalé dans le temps) est effectué après l'épuisement du drainage relatif à l'expérience précédente, c'est-à-dire au moment où le drainage journalier est inférieur à 10 ml correspondant à 1/7 de mm (le tarissement est considéré comme survenu quand il y a moins d'un basculement du pluviographe au cours de 48 heures, correspondant à 10 ml/j). Notons que les pluviographes ont été couverts pour réduire le plus possible l'évaporation de l'eau emmagasinée dans les augets ; à ce sujet, nous avons vérifié à l'aide de récipients placés dans les mêmes conditions que cette évaporation est négligeable. Les variations du débit en fonction du temps prennent à peu près la forme habituelle des hydrogrammes ayant une courbe de montée, un débit de pointe et une courbe de décroissance. Analyse et comparaison de ces hydrogrammes concernant les bacs de profondeurs différentes montrent que :

1. - Le temps de réponse ou l'intervalle de temps entre le début de l'arrosage et les premières gouttes du drainage croît avec la profondeur. Il varie de 15 minutes à une heure, de 30 minutes à 2 heures et d'une heure à 11 heures respectivement pour les bacs de 50, 100 et 150 cm, les valeurs faibles correspondant à l'arrosage échelonné dans le temps et les valeurs plus élevées aux arrosages intenses (voir tableau 2 - II - 1 représentatif de différents arrosages).

2. - Le débit maximum est plus grand dans les bacs moins profonds, ses valeurs extrêmes sont de 560 ml/h (8 mm/h) pour le bac de 50, 300 ml/h (4,3 mm/h) pour celui de 100 et seulement 100 ml/h (1,4 mm/h) pour le bac de 150 cm ; contrairement aux cases lysimétriques dont les plus profondes présentent un débit de pointe plus élevé. Le débit maximum survenu environ 2 heures après la réponse dans les bacs peu profonds reste presque constant pendant plusieurs heures dans le cas où l'arrosage est effectué avec une quantité importante répartie sur quelques heures. Dans les bacs plus profonds, la montée est très peu accentuée et le débit maximum est également assez mal défini.

3. - La durée totale du drainage ou l'intervalle de temps entre l'apparition du drainage et son épuisement ( $q < 1/7$  mm/j) varie elle aussi, suivant la profondeur et, bien entendu, la quantité d'eau reportée, ainsi que la température. L'amplitude de ces variations est de

. 30 heures à 7 jours pour les bacs de 50 cm

(Tableau II-4)

Caractéristiques de différents arrosages dans les "bacs expérimentaux"

Bac N°	Vr ml	H mm	Durée h	Tr h	Vd ml	H mm	q <sub>M</sub> ml/h	Date de l'arrêt	D h	T <sub>25</sub> h	T <sub>50</sub> h	T <sub>75</sub> h	T <sub>87,5</sub> h
I	1400	20	2	5	1120	16	100	27-7-68	90	9,5	18,5	35	52
II	"	"	"	"	1120	16	42	26	60	8	18,5		
III	"	"	"	0,5	1200	17,1	340	25	44	1,5	2,5	3,5	4,5
IV	"	"	"	0,5	1280	18,2	215	25	45	2	3,5		
I	2000	28,5	2	1	2060	29,4	90	29-7-68	90	7,5	16,5	32	48
II	"	"	"	2,5	2060	29,4	65	29	85	7	23		
III	"	"	"	0,25	1820	26	340	28	65	1,75	3	5	6
IV	"	"	"	0,50	1960	28	220	28	65				
I	2000	28,5	2	3	1320	18,8	60	25-8-68	50	6,5	15,5	23	28
II				4,5	1400	20	55	26	90	14	21		
III				1,25	1700	24,25	260	25	65	2,5	4,25	6	10
IV				1	1800	25,75	160	24	65	3	5		
I	1400	20	6	5	1260	18	60	30-8-68	95	7,5	14	27	36
II				5	1080	15,2	35	30	97	10	20		
III				1	1280	18,3	320	28	52	2	4	5	6
IV				1,5	1260	18	170	28	55	2,5	4,5		
I	1400	20	8	6	1220	17,4	40	5-9-68	95	10	20,5	40	55
II				11	1260	18	30	5	100	13	24		
III				1	1270	18,2	300	3	65	1,5	2,5	4	5,5
IV				1	1200	17,2	140	3	70	3	5		
I	1400	20	7	4,5	1160	16,6	40	10-9-68	95	9	20	45	63
II				6	1200	17,25	40	10	95	15,5	25,5		
III				0,5	1320	18,8	400	8	75	1,5	2,5	4	5,5
IV				0,5	1260	18	150	8	65	2,5	4,5		
I	1400	20	7 <sup>3/4</sup>	6	1000	14,3	45	16-9-68	115	8	19	41	62
II				6,5	1160	16,6	30	16	120	15	26		
III				0,75	1290	18,4	220	14	50	2	3,5	5,25	6,5
IV				1,5	1460	20,8	150	14	50	3	5,5		
I	1000	14,3	3	8	760	10,85	20	20-9-68	95	11,5	21,5	45	59
II				11,5	760	10,85	30	20	98	16	24		
III				1,25	800	11,4	200	17	30	2	3	4,5	5,75
IV				1,5	860	12,3	115	18	50	2,5	5		

( Tableau 2-II - 1 ) suite

Bac NO	Vr ml	H mm	Durée h	Tr h	Vd ml	H mm	qm ml/h	Date de l'arrêt	D h	T <sub>25</sub> h	T <sub>50</sub> h	T <sub>75</sub> h	T <sub>87,5</sub> h	
I	9	1900	27,2	5,75	3	1620	23,5	56	25-9-68	125	10	20	41	62
II					3	1600	22,8	50	25	115	11	23		
III					1/4	1560	22,2	400	23	60	1,5	5,25		
IV					1/4	1540	22,0	260	23	55	1,75	5		
I	10	2000	28,6	7	4	1950	27,9	60	30-9-68	125	12	24	44	59
II					4	1840	26,8	60	30	115	14	26		
III					1/6	2000	28,6	480	27	40	1,75	7,25	6,5	8
IV					1/4	2000	28,6	400	27	60	2	7,25		
I	11	2000	28,6	arrosage à deux reprises à l'intervalle de 24 heures	5	1800	25,7	45	7-10	150	23	38	60	85
II					5	2000	28,6	50	7	155	23	36,5		
III					1/4	1940	27,7	420	4	75	1,5	24	9,5	
IV					1/2	2000	28,6	420	4	85	1,5	24,5		
I	12	1730	24,7	5	6	1760	25,2	55	14-10	165	12,5	22	42	62
II					6	1760	25,2	45	14	170	16,5	29		
III					1	1770	25,3	280	10	70	2	4	6,5	8
IV					1/2	1750	25	240	10	70	2,5	5		
I	13	1615	23,1	5,3+	7	1610	23	30	21-10	175	23	35		
II					9	1600	22,85	30	21	180	23	43		
III					1/2	1620	23,1	480	17	75	3	6		
IV					1/2	1520	21,7	160	16	75	4,5	7		
I	14	2590	37	2,7	4	2492	35,6	73	3-11	(13j)	11	23	51	88
II					4	2440	35	70	3	(13j)	11	25,5		
III					1/2	2510	35,9	560	28-10	(7j)	1,5	2,85		
IV					1/2	2584	35,8	52,0	28-10	(7j)	1,5	2,85		

Vr : volume d'eau reporté pour chaque arrosage

H ; hauteur d'eau en mm

Tr: temps de réponse

Vd: volume d'eau drainé par chaque "bac"

q<sub>M</sub>: débit maximum observé en mm en *une heure*

D : durée total du drainage

T<sub>25</sub> : temps nécessaire pour que 25% du drainage total soit écoulé.

correspondant à l'arrosage du 16 septembre, avec 14,3 mm et à celui du 21 octobre avec 37 mm (série de tableaux 2 - II - 1)

. 32 heures à 100 heures pour le bac de 100 cm (série de tableaux 2 - II - 1)

. 50 heures à 13 jours pour les bacs de 150 cm correspondant aux arrosages du 22 juillet avec 28 mm et du 21 octobre avec 37 mm (série de tableaux 2- II - 1)

D'autre part, on a observé qu'à partir d'un arrosage du 3 novembre 1968, le drainage continue pendant presque 1 mois dans les bacs profonds.

4. - La décroissance du débit est très rapide dans les bacs peu profonds après son passage au maximum le débit observé tombe au cours de 3 à 4 heures à des valeurs très faibles (1 ml/h), (1/70 de mm/h) puis il reste presque constant pour finalement s'annuler brutalement. Mais il n'en est pas de même pour les bacs plus profonds ; la courbe de décroissance a une forme très étendue dans le temps et une pente assez faible. Elle subit des fluctuations au cours de 24 heures. Comme nous l'avons déjà dit, ces fluctuations sont plus ou moins importantes suivant la teneur en eau du bac ; leur amplitude devient moins grande au fur et à mesure que l'on s'approche du tarissement ; par contre, le rapport du débit maximum de chaque oscillation au débit minimum qui le précède, garde longtemps des valeurs élevées (par exemple, ce rapport est de l'ordre de  $\frac{105}{30} = 3,5$  pour les variations du 30 juillet du bac N° II quand la teneur en eau de ce bac est encore très élevée et de  $\frac{25}{1} = 25$  au 7 août lorsque presque 99,5 % du drainage est écoulé. On voit que ce rapport a tendance même à augmenter à la fin de l'épisode (Voir graphiques II - 2 - 1 à II - 2 - 4).

Ces oscillations sont observées également pour le bac de 100 cm et même les bacs de 50 cm lorsque la quantité d'eau apportée est grande. Mais n'ayant pas été observées dans les cases lysimétriques, on peut se demander si elles sont provoquées par des variations de température à l'intérieur de la terre, variations qui seraient de plus faible amplitude dans les cases que dans les bacs, ou s'il intervient d'autres causes que l'amplitude thermique, relevant de microclimat existant dans les serres où sont situés les bacs, ou enfin s'il intervient d'autres causes liées à l'état du sol telles que son humidité ou bien des différences concernant la structure (la terre vient d'être placée dans les bacs alors qu'elle est dans les cases depuis à peu près 15 ans.

5. - La différence entre la hauteur d'eau utilisée pour l'arrosage au cours de tous les essais et celle recueillie par le drainage n'est pas très élevée. Ainsi, comme on voit dans le tableau ci-dessous :

Hauteur d'eau totale apportée (mm)	Drainage total (mm)			
	BAC I	BAC II	BAC III	BAC IV
390,5	341,0	350,0	360,7	367,8
Perte	49,5	40,5	29,8	22,7
Perte en % d'eau apportée	12,67	12,4	7,62	5,82

La perte est de l'ordre de 12,4 à 12,67 % pour les bacs profonds et de 5,82 à 7,62 % pour ceux moins profonds (50 cm). D'autre part, les trois bacs de 100 et 50 cm ont été pesés le 9 janvier 1969 et le 1er décembre de la même année ; pendant cette période, les bacs ont été bien protégés contre l'évaporation. La différence de poids pendant presque un an est de 1,65 et 1,40 et 5,40 kg respectivement pour les bacs III, IV (50 cm) et C (100 cm). Ces quantités d'eau correspondent respectivement à des hauteurs d'eau de 23,67-20 et 77 mm. Rappelons que l'humidité de la terre dans les bacs III et IV a été après la première vidange : 36,6 et 34,75 % de la terre sèche. Nous venons de voir que, pendant la durée des essais, le drainage a été inférieur à la quantité d'eau utilisée pour l'arrosage. La différence est équivalente à une humidité de 4,64 %, pour le bac III et 3,0 % pour le bac N° IV. La différence de poids au cours de ce temps montre une augmentation équivalente à 1,1 et 2,34 % pour les deux bacs ; la différence de ces deux valeurs pour chaque bac montre l'humidité perdue par l'évaporation tout au long des essais : elle correspond à  $4,60 - 1,1 = 3,50$  % pour le bac III et de  $3,45 - 2,34 = 1,10$  % pour le bac N° IV. L'humidité finale d'après les pesées au 1er décembre 1968 est de 33,8 % pour le bac III et 34,10 % pour le bac N° IV.

Le bac C (100 cm) installé au voisinage immédiat d'une serre chaude semble avoir été influencé par celle-ci, ayant perdu 3 à 4 fois plus que les autres (77 mm). Ajoutons que le dernier arrosage étant effectué le 3 novembre 1969 et le drainage ayant pris fin un mois plus tard, nous avons observé le 16 décembre une quantité importante de drainage, ainsi que les petits morceaux de glaçons à la surface des quatre bacs. On peut donc penser que ce drainage a pour cause l'effet de gel et dégel qui se produit à la surface du bac, ainsi qu'à la limite du fond drainant et la terre du bac ; c'est l'effet des parois froides qui cause l'accumulation de l'humidité et la condensation pour former le gel.

6. - Comme pour les cases lysimétriques, nous avons calculé le nombre de jours de drainage pour chaque essai par rapport aux différentes intensités du débit. Nous avons maintenu comme seuil la valeur de 0,5 mm/j entre les débits faibles et les débits de fortes intensités. Le tableau 2 - II - 2 présente pour les quatre bacs et pendant tous les essais, le nombre de jours de drainage se trouvant dans les classes du débit suivant :

	$q > 1,5$ mm/j	équivalent à	105 ml/j
1,5	$> q > 0,5$ mm/j	équivalent à	35 ml/j
0,5	$> q > 0,15$ mm/j	équivalent à	10,5 ml/j
0,15	$> q > 0$ mm/j		-

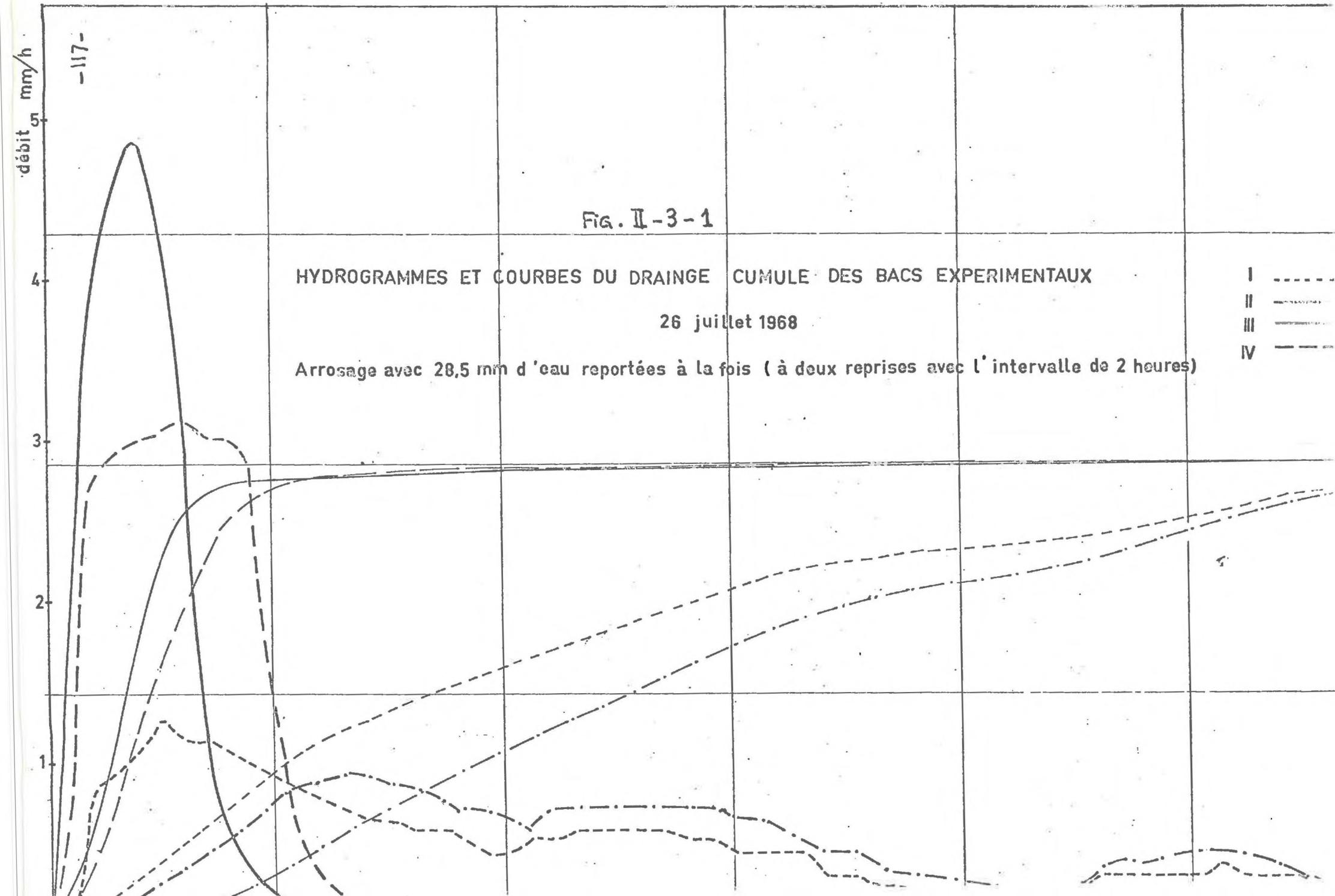
Fig. II-3-1

HYDROGRAMMES ET COURBES DU DRAINAGE CUMULE DES BACS EXPERIMENTAUX

26 juillet 1968

Arrosage avec 28,5 mm d'eau reportées à la fois (à deux reprises avec l'intervalle de 2 heures)

- I - - - - -
- II - . . . . .
- III - - - - -
- IV - - - - -



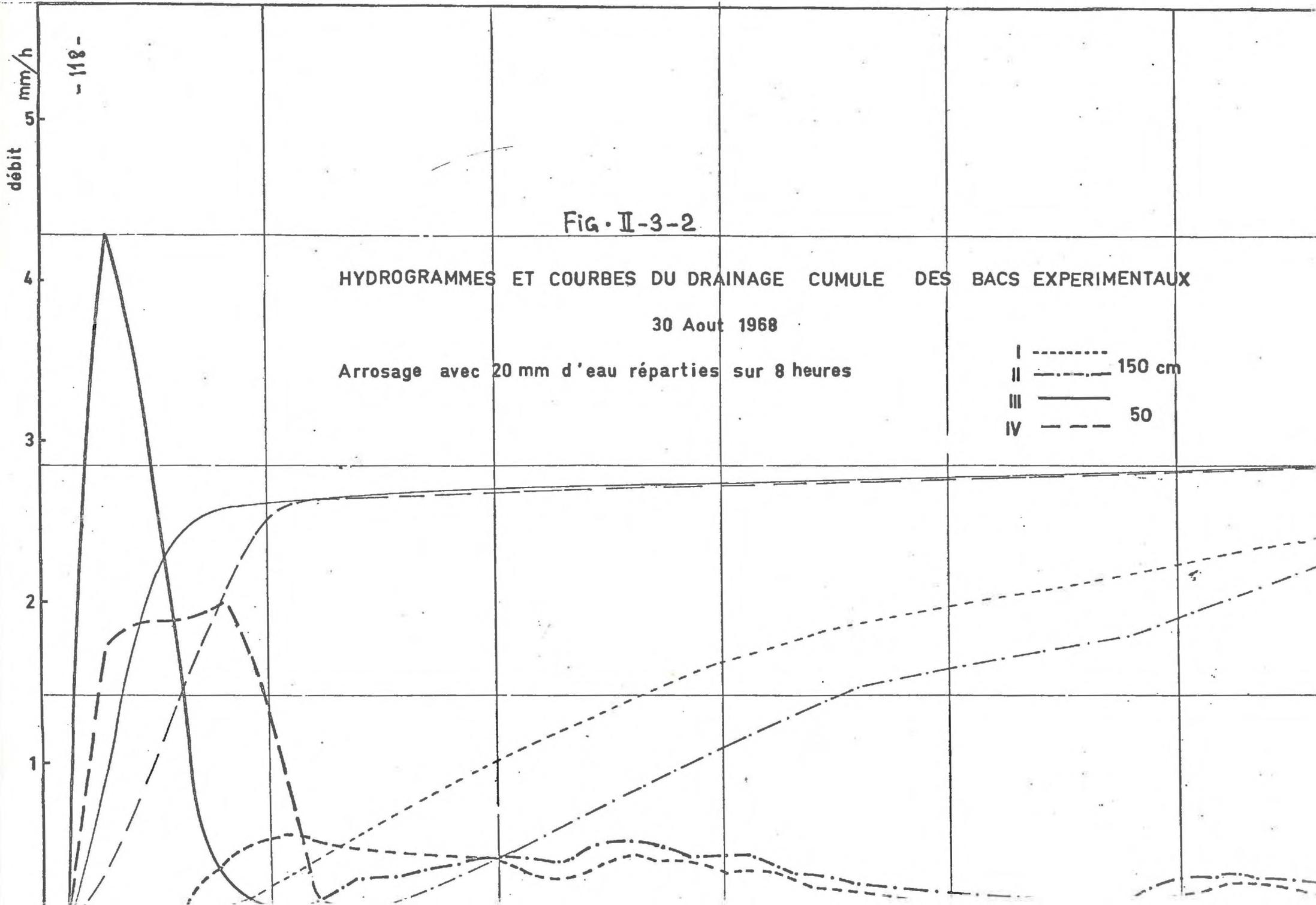


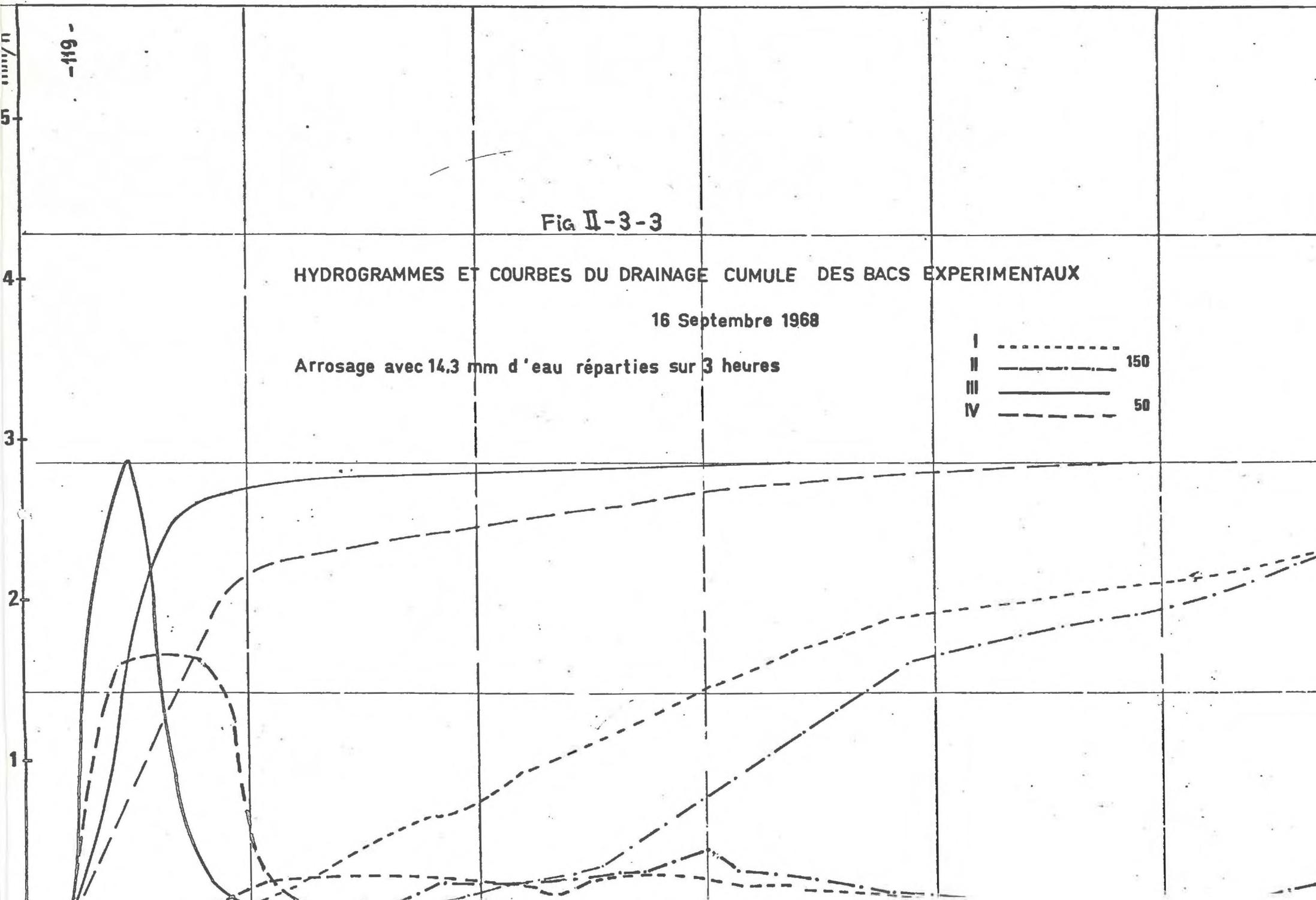
Fig II-3-3

HYDROGRAMMES ET COURBES DU DRAINAGE CUMULE DES BACS EXPERIMENTAUX

16 Septembre 1968

Arrosage avec 14,3 mm d'eau réparties sur 3 heures

- I - - - - - 150
- II - - - - - 150
- III - - - - - 50
- IV - - - - - 50



0,15 mm/j correspond à un volume de 10,5 ml/j pour les bacs, c'est-à-dire un basculement du pluviographe tous les deux jours que nous avons traité comme débit nul ; exceptionnellement, pendant les deux derniers essais, nous avons pu suivre le drainage pendant quelques jours : les mesures ont été effectuées alors par des moyens plus simples que le pluviographe, on recueillait les quelques gouttes du drainage et on les mesurait. Pour les essais précédents, une telle mesure aurait donné des valeurs rigoureusement nulles car à ce stade, il n'apparaît pas la moindre goutte d'eau à l'exutoire. De même, pour le débit inférieur à 0,5 mm/j (35 ml/j), le nombre de jours de drainage est limité. La majeure partie du drainage s'effectue donc avec un débit supérieur à 0,5 et même 1,5 mm/j, c'est-à-dire avec un débit intense. Le rapport du drainage total avec le débit supérieur à 0,5 mm/j au drainage total avec le débit inférieur à cette valeur est respectivement 7,25 ; 8,3 ; 23 ; et 31,5 pour les bacs I, II, III et IV (par exemple du 3 novembre) ; autrement dit, le pourcentage du drainage total écoulé avec des forts débits est de 87 %, 89 % 93 % et 94,5 % pour ces bacs ; pour les autres cas, ce rapport est toujours supérieur à 85 %. Sur la série de tableaux 2 - II - 1, nous avons donné le temps nécessaire pour écouler 25 et 50 % du drainage total de chaque bac ; on voit que la durée maximum de ce temps est de l'ordre de 40 heures pour un bac profond le 14 octobre 1969 et 7 heures 1/4 pour un bac moins profond le 25 septembre 1969.

7. - En ce qui concerne le tarissement, les courbes correspondant à plusieurs arrosages sont présentées pour chaque bac séparément sur les diagrammes semi-logarithmiques que les figures II - 4 - 1 à II - 4 - 4 présentent. L'origine de chaque courbe est l'heure où le débit maximum correspondant s'est produit. On aperçoit que, pour tous les bacs, pendant un intervalle de temps qui varie de

10 à 29 heures pour le bac N° I	(150 cm)	Fig. II - 8
10 à 30 heures pour le bac N° II	(150 cm)	Fig. II - 9
12 à 17 heures pour le bac N° III	(100 cm)	Fig. II - 10
4 à 6 heures pour le bac N° III	(50 cm)	Fig. II - 11
4 à 8 heures pour le bac N° IV	(50 cm)	Fig. II - 12

la courbe de décroissance du débit est à peu près un segment de droite, c'est-à-dire que la vidange au cours de cet intervalle suit avec une approximation que nous estimons bonne, la loi exponentielle  $q_t = q_0 e^{-\alpha t}$

La différence de pentes des droites des bacs de différentes profondeurs semble bien être en relation avec l'épaisseur de la couche drainante de chaque bac.

Ces comparaisons entre pentes selon la profondeur des bacs ne sont bien sûr possibles que dans la première partie des courbes de décroissance ; nous avons vu, en effet, pourquoi ultérieurement les courbes ne sont plus comparables :

- d'une part, les bacs peu profonds ayant vu leurs débits décroître très rapidement, ceux-ci ont des valeurs très faibles ou nulles et leur étude est interrompue

- d'autre part, les débits des bacs profonds présentent souvent des oscillations journalières.

Il faut finalement ajouter que l'intensité d'arrosage (arrosages instantanés ou étalés sur quelques heures) semble ne pas avoir d'influence sur la durée totale du drainage. Il serait intéressant de reprendre de tels essais avec les différences de l'intensité beaucoup plus importantes. Signalons que dans ce cas, de grandes précautions doivent être envisagées pour limiter l'évaporation.

Classe de débit mm/j	18 Juil	23 Juil	26 Juil	22 Août	26 Août	30 Août	5 Sept	11 Sept	16 Sept	20 Sept	25 Sept	30 Sept	7 Oct.	14 Oct.	21 Oct.	4 Nov.
$q > 1,5$	4	3	3	2	2	2,4	3	3	1	0,5	0,5	4	3,5	4	4	1
$1,5 > q > 0,5$	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	2	3	1	3	10
$0,5 > q > 0,15$	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	3	5	5
$0,15 > q > 0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	15
Volume drainé L	1,22	1,12	2,06	1,32	1,26	1,22	1,16	1,00	0,76	1,62	1,95	1,80	1,76	1,61	2,49	1,562
$q > 1,5$	4	3	4	2	2	2	3	2	1	3	2,5	5	3,5	5	5	2
$1,5 > q > 0,5$	1	1	0	2	2	2	0	1	1	0	1	1	3	2	2	9
$0,5 > q > 0,15$	0	0	0	0	0	1	1	2	0	1	0	1	1	0	5	8
$0,15 > q > 0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12
Volume drainé L	1,24	1,12	2,06	1,40	1,08	1,26	1,20	1,16	0,76	1,60	1,84	2,00	1,76	1,60	2,44	1,77
$q > 1,5$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1	1,5	1	1	1	1
$1,5 > q > 0,5$	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
$0,5 > q > 0,15$	1	1	1	0	1	0	2	0	0	1	0	0	2	1	2	2
$0,15 > q > 0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3
Volume drainé L	1,26	1,20	1,82	1,70	1,28	1,27	1,32	1,29	0,80	1,56	2,00	1,94	1,77	1,62	2,51	1,91
$q > 1,5$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$1,5 > q > 0,5$	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	2	0	1	0	1
$0,5 > q > 0,15$	1	1	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	1	2	2
$0,15 > q > 0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3
Volume drainé L	1,32	1,28	1,96	1,80	1,26	1,20	1,26	1,46	0,86	1,54	2,00	2,00	1,75	1,52	2,58	1,95
Volume d'eau apportée L	1,40	1,40	2,00	2,00	1,40	1,40	1,40	1,40	1,00	1,90	2,00	2,00	1,73	1,61	2,59	2,10

BAC I

BAC II

BAC III

BAC IV

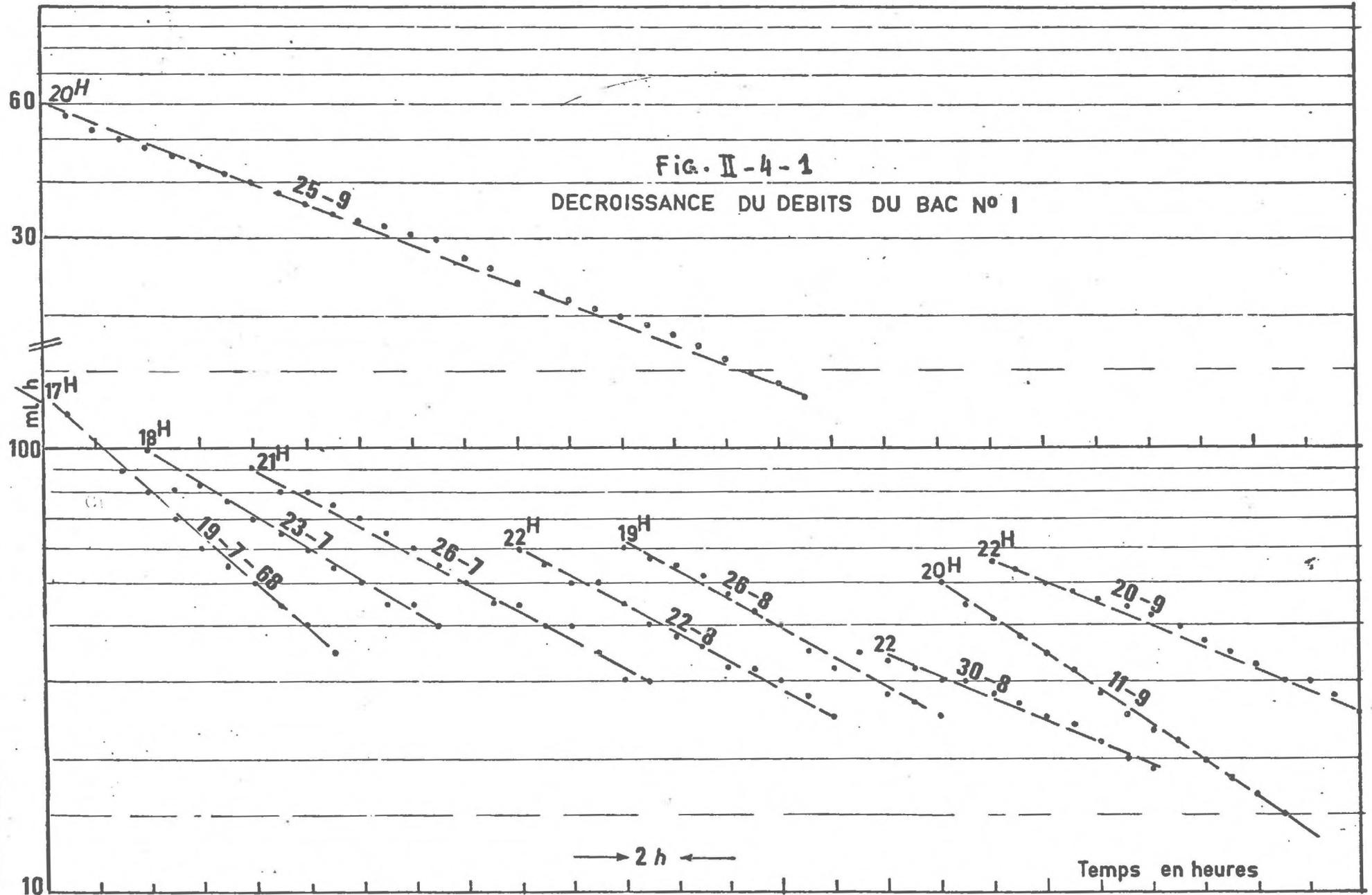
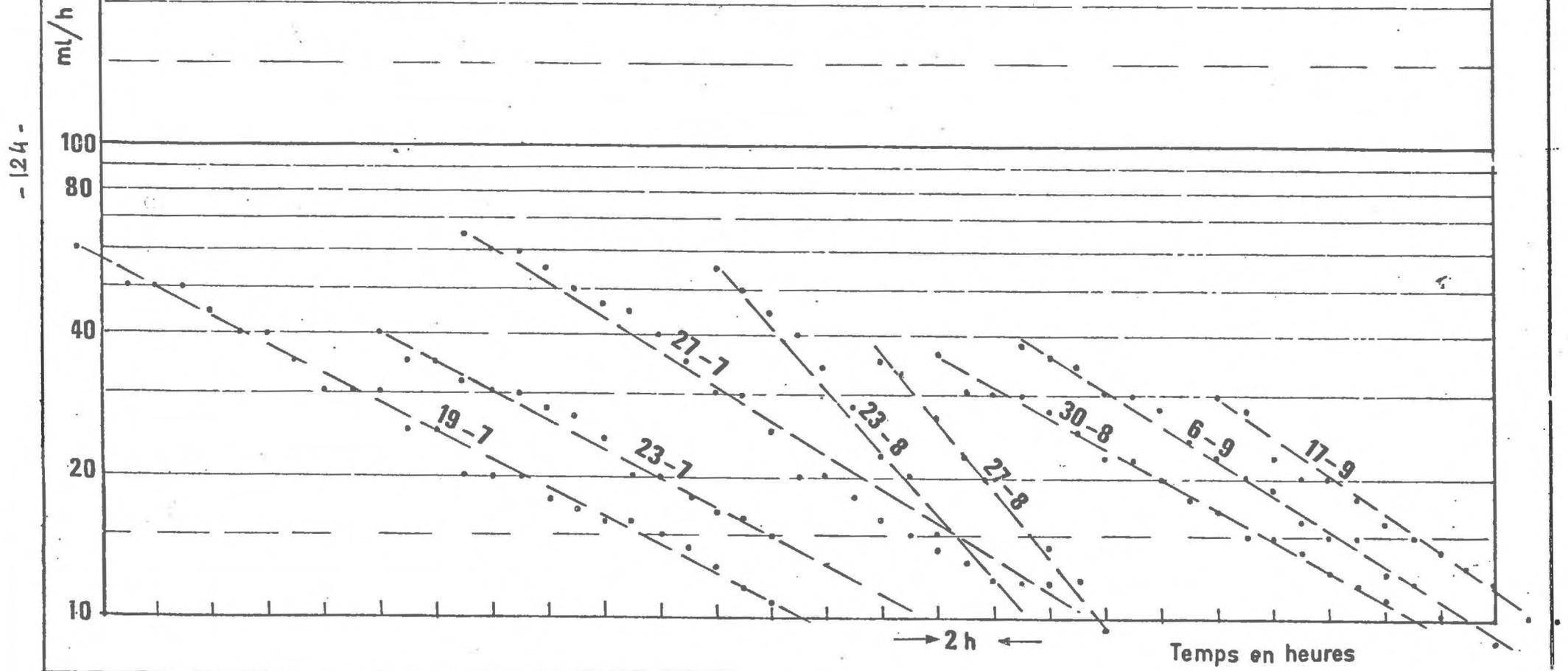


Fig. II-4-2

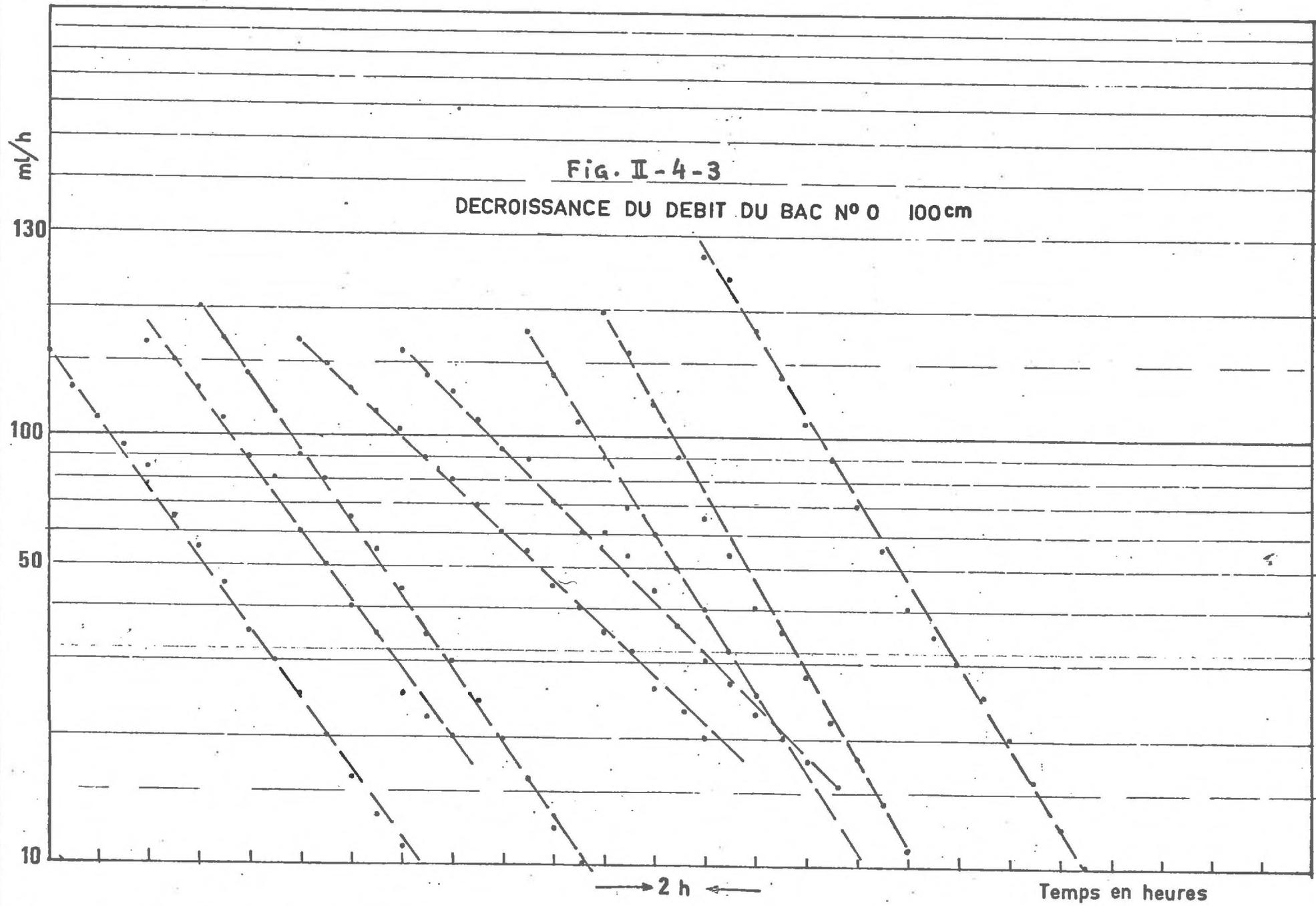
DECROISSANCE DU DEBIT DU BAC N° II (150 cm)



- 125 -

Fig. II-4-3

DECROISSANCE DU DEBIT DU BAC N° 0 100 cm

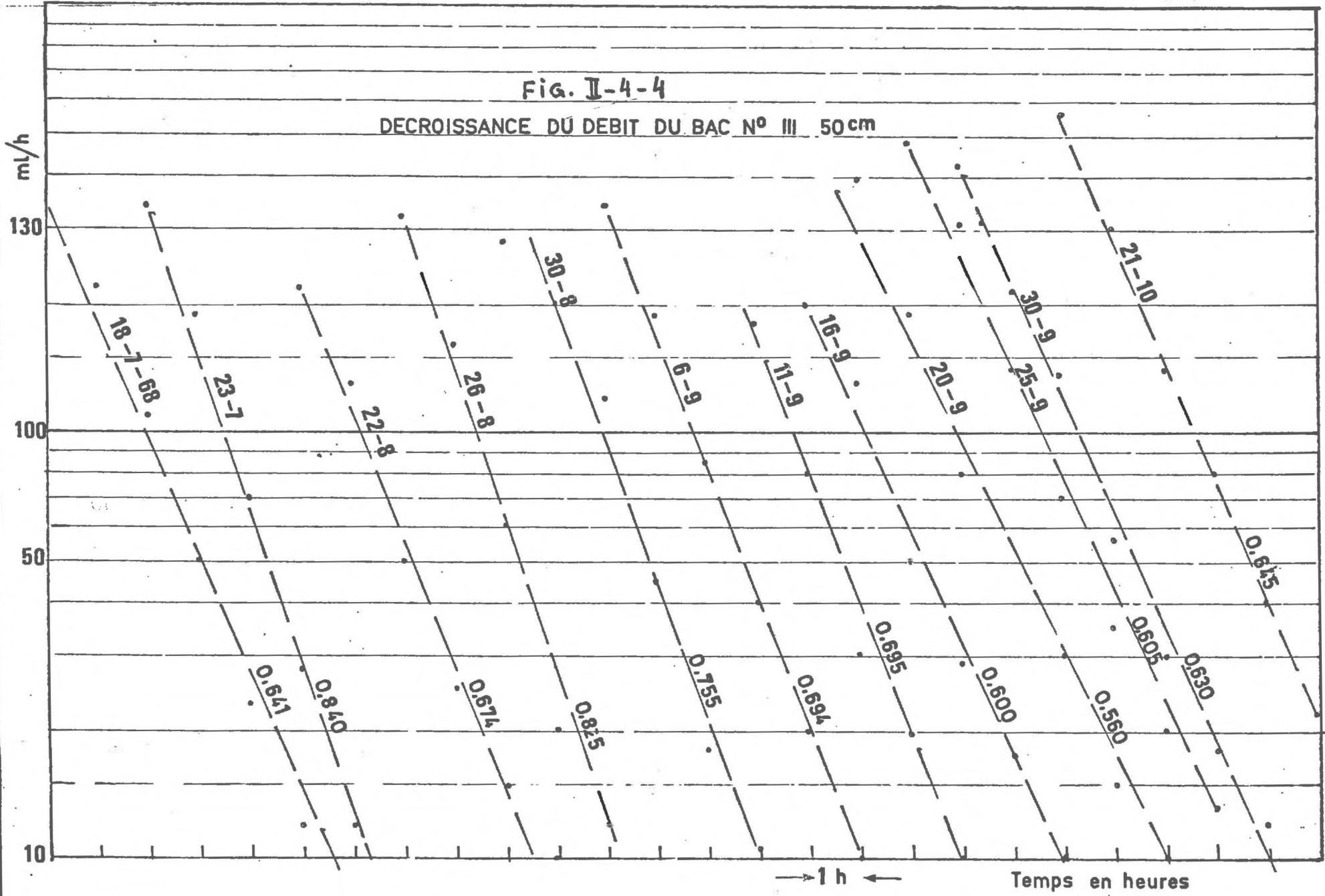


→ 2 h ←

Temps en heures

Fig. II-4-4

DECROISSANCE DU DEBIT DU BAC N° III 50 cm



→ 1 h ←

Temps en heures

### TROISIEME PARTIE

=====

### EXAMEN DE MODELES

---

#### INTRODUCTION

Nous avons fait quelques essais de confrontation entre des résultats expérimentaux exposés précédemment et des valeurs calculées pour des modèles capillaires très simples ; avant de présenter ces confrontations (Voir II), on va d'abord résumer (I) quelques calculs faits sur le modèle le plus simple.

#### I. - Ecoulement de l'eau dans un cylindre capillaire

##### I. - 1 - Calcul du débit à une température donnée

-----

Soit un cylindre capillaire se vidant dans un plan d'eau libre, (dans lequel il plonge sur une longueur négligeable) jusqu'à ce que le ménisque eau-air, situé initialement plus haut que sa position d'équilibre (qui est à une hauteur  $\frac{2A}{r\gamma}$  au-dessus du plan d'eau), atteigne cette position.

La mise en équation du mouvement résulte des lois de Jurin (1718) et de Poiseuille (1844) ; elle est indiquée par H. Bouasse (Capillarité, 1924). L'équation obtenue, à ~~des~~ variables séparées, s'intègre immédiatement en donnant le temps (et le débit) en fonction de la hauteur du ménisque ; le calcul permet alors de passer point par point à la hauteur (et donc au débit) en fonction du temps.

Le débit décroît progressivement ; le calcul montre que sa décroissance en fonction du temps prend une allure presque exponentielle à la fin, lorsque le débit est prêt de s'annuler ; antérieurement, au contraire, elle est bien différente d'une décroissance exponentielle. On a précisé ceci

en utilisant un "indice d'exponentialité" :

Cet indice est le quotient de 2 intervalles de temps successifs, au cours desquels le débit décroît de la même fraction ; si par exemple, on utilise pour cette fraction la valeur  $\frac{1}{10}$  le débit à l'instant  $t_1$  étant pris comme unité, il sera de 0,9 à l'instant  $t_2$  et de 0,81 à l'instant  $t_3$  ; si l'indice  $\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}$  vaut 1, les trois points considérés sont situés sur

une courbe exponentielle ; on est d'autant plus loin de l'exponentialité que l'indice est plus différent de 1, plus proche de zéro (quand le rapport  $\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}$

est  $> 1$ , nous utilisons son inverse comme indice) ; supposons par exemple que l'indice vaille 0,93, cela signifie que l'extrapolation exponentielle ajustée sur les points d'abscisses  $t_1$  et  $t_2$  évalue l'intervalle de temps  $t_3 - t_2$  avec une erreur de 7 p. 100 par excès ( $1 - 0,93 = 0,07$ ).

Dans le problème traité, le calcul montre que la valeur de l'indice est une fonction du rapport  $\frac{h}{h \text{ éq.}}$ ,  $h$  étant la hauteur du ménisque

au-dessus du plan d'eau et  $h \text{ éq.}$  la valeur  $\frac{2A}{r^2 g}$  que prendra  $h$  à l'équi-

libre.

Si on utilise pour facteur de réduction le nombre 0,9, l'indice prend la valeur 0,915 quand  $\frac{h}{h \text{ éq.}} = 1,5$ , et croît à mesure que  $\frac{h}{h \text{ éq.}}$

décroît, les deux termes tendant ensemble vers 1 ; par contre, lorsque  $\frac{h}{h \text{ éq.}}$  est très supérieur à 1,5 l'indice a des valeurs très faibles ; c'est

bien le résultat annoncé : l'exponentialité n'apparaît qu'en fin d'écoulement.

Si on considère le débit total donné par des capillaires de différents rayons, les possibilités sont plus variées qu'avec des rayons égaux entre eux.

## I. - 2 - Influence de la température

-----

On a vu, dans la deuxième partie, que lors de l'étude du tarissement des "bacs", il s'est produit des oscillations diurnes du débit, corrélatives des variations de la température de l'air. De leur côté, des auteurs, étudiant le drainage de cases lysimétriques, ont observé des corrélations entre débit et température, et ont pu attribuer ces corrélations aux variations de viscosité : celles-ci, dues aux variations de température, influent sur les débits (H.L. Penman et R. K. Schofield, 1941).

C'est pourquoi nous avons calculé les débits de l'eau dans des cylindres capillaires installés comme précédemment, mais à différentes températures (entre  $+5^\circ\text{C}$  et  $+25^\circ\text{C}$ ), l'étude a été conduite en deux temps.

1<sup>o</sup>) d'abord, on a évalué dans quelle mesure l'influence de la température pourrait se réduire à son influence sur la viscosité de l'eau.

2<sup>o</sup>) ensuite, en s'appuyant sur l'étude précédente, on a examiné

si les calculs auxquels se prête le modèle très simple considéré (influence de la température de l'eau sur sa viscosité et sur sa tension superficielle) semblaient entraîner ou non l'élimination d'hypothèses attribuant les oscillations diurnes de débit de nos "bacs" aux variations de viscosité et de tension superficielle (cette seconde partie sera exposée plus loin, en II - 2).

Considérons deux capillaires identiques, avec les ménisques à même hauteur, mais situés dans deux enceintes isothermes à températures différentes ; soit à cet instant  $v_1$  et  $v_2$  les vitesses des deux ménisques (proportionnelles aux débits), correspondant aux températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$ , avec les viscosités  $\eta_1$  et  $\eta_2$  ; dans le modèle considéré, seules interviennent la masse volumique de l'eau, la tension superficielle eau - air (on a fait les calculs pour le cas où la mouillabilité serait parfaite et le resterait indéfiniment), et la viscosité de l'eau ; l'effet sur le débit des différences de masses volumiques est négligeable pour des températures allant de  $5^\circ\text{C}$  à  $25^\circ\text{C}$  ; il reste l'influence des différences de viscosité et des différences de tension superficielle ; pour exprimer dans quelle mesure l'influence des différences de viscosité prédomine, nous avons calculé le rapport

$$R = \frac{v_1}{v_2} - 1 \quad / \quad \frac{\eta_1}{\eta_2} - 1$$

le calcul montre que R est une fonction de  $\frac{h}{h_{\text{éq.}}}$  ; tant que  $\frac{h}{h_{\text{éq.}}} > 1,5$

le rapport R reste compris entre 0,99 et 1,15 ; au contraire, lorsque on considère des ménisques situés de plus en plus bas (des valeurs  $h/h_{\text{éq.}}$  de plus en plus proches de 1), le rapport R prend des valeurs de plus en plus élevées ; ainsi pour  $\frac{h}{h_{\text{éq.}}} = 1,06$ , R est voisin de 2 : l'influence

de la différence de température est double de ce qu'elle serait si seules les viscosités étaient différentes, puis pour  $\frac{h}{h_{\text{éq.}}} < 1,06$  l'influence des différences de tensions superficielles est prépondérante.

## II. - Essais de confrontation avec des résultats expérimentaux concernant l'eau du sol

### II. - 1 - Tarissement et tubes capillaires

On sait que, de façon générale, les modèles constitués de tubes capillaires (chaque tube allant sans interruption de l'extrémité amont à l'extrémité aval) ne rendent dans l'étude des milieux poreux que des services très limités. Nous allons néanmoins exposer quelques essais qui ont été faits pour ajuster des modèles très simples de ce type d'après les observations faites sur le drainage des cases et des bacs, en particulier d'après les courbes de tarissement obtenues lors des "vidanges des bacs

expérimentaux" (car la situation est plus proche de celle de tubes initialement pleins d'eau).

Les modèles envisagés ont tous la même hauteur que la colonne de terre contenue dans le "bac" à représenter. On a d'abord vérifié que l'évacuation de l'eau contenue dans des cylindres ayant tous même rayon ne peut aucunement représenter en temps réel le tarissement des cases lysimétriques, ceci est d'ailleurs bien connu ; nous avons donc tenté de compléter le modèle en introduisant les facteurs inégalité des rayons et tortuosité (par contre, nous n'avons pas essayé d'examiner de cas où la mouillabilité ne serait pas ; pas parfaite ; si, tout en n'étant pas parfaite, elle était constante, la prise en compte de cette propriété serait équivalente à l'abaissement de la valeur du terme  $A$ , remplacé alors par  $A \cos \alpha$ ).

Avec des tubes en hélice, de section circulaire (1) l'équation qui donne le mouvement de l'eau dans un tube capillaire cylindrique reste valable, les valeurs des termes constants utilisés précédemment sont simplement modifiés par introduction de la tortuosité.

Avec trois ou quatre espèces de tubes, ceux de chaque espèce étant identiques entre eux mais différents des autres par le rayon et par la porosité qu'on leur affecte (rapport du volume intérieur de ces tubes au volume total du modèle), nous avons constaté qu'on peut obtenir des écoulements calculés reproduisant suffisamment bien ceux de bacs de 150 cm de profondeur (depuis le maximum initial de débit, lors de la "vidange", abstraction faite de l'eau située au-dessous de la terre, jusqu'au lent tarissement final) pour suggérer la possibilité d'obtenir un bon accord en accroissant modérément le nombre de valeurs différentes de  $r$  ; les tortuosités utilisées dans le modèle ont des valeurs qui pourraient avoir quelque signification physique dans le cas du sol (par exemple, tortuosité de 3 pour des tubes ayant un rayon de  $30 \mu$ ) ; du même point de vue, les rayons des tubes et les porosités sont situés dans des ordres de grandeur admissibles. Par contre, si on veut faire l'ajustement non seulement sur l'écoulement de bacs de 150 cm, mais également sur celui de bacs de 50 cm, (emploi de modèles ne différant que par leurs hauteurs : respectivement 150 et 50 cm), l'insuffisance de tels modèles se manifeste : on est conduit à introduire des tortuosités beaucoup plus élevées, de 10 à 15 par exemple pour abaisser des débits calculés et les rapprocher des débits observés.

Néanmoins, une propriété de ces modèles mérite peut-être d'être signalée, car elle semble refléter, en l'exagérant, une propriété des cases et des bacs qui est bien apparue dans les deux parties expérimentales précédentes : le tarissement des modèles de 50 cm de hauteur est beaucoup plus brutal que celui des modèles de 150 cm (exemple : un capillaire dont le rayon mesure  $12 \mu$ , s'il est plein jusqu'à 150 cm au-dessus du plan d'eau se videra sur une hauteur de 25 cm, puisque son ascension capillaire est de 125 cm dans les conditions envisagées, et cet écoulement sera très lent si le tube a une tortuosité convenable ; par contre, un tube de même rayon, dans le modèle de 50 cm de hauteur, ne donne aucun écoulement s'il n'est pas alimenté par son ouverture supérieure)

---

(1) Il s'agit plus exactement de la surface canal engendrée par une sphère de rayon constant dont le centre se déplace sur une hélice circulaire.

## II. - 2 - Oscillations diurnes du drainage

Ces oscillations ont été observées dans les drainages des "bacs expérimentaux" situés en serres froides ; nous avons vu qu'elles sont en corrélation avec des oscillations thermiques. On peut se demander si elles sont dues, pour une part plus ou moins grande, à des effets microbiens, à des mouvements de gaz avec éventuellement des évaporations et des condensations, à des variations de volume de bulles de gaz, à des modifications du squelette solide du sol, etc... ; d'après ce qui suit, il ne semblerait pas exclu qu'interviennent notablement les variations de tension superficielle de l'eau.

Simplifions les choses à l'extrême ; soient par exemple des capillaires ayant  $50 \mu$  de rayon plongeant par les extrémités inférieures dans une nappe d'eau libre ; à  $15^\circ \text{C}$ , leur "ascension capillaire" est de 30 cm. Si en quelques heures, la température de l'eau passe à  $17,5^\circ \text{C}$  ce qui est admissible (cf. les mesures de température faites dans les bacs), l'ascension capillaire devient 29,85 cm, en raison de la diminution de  $A$  (eau pure, mouillabilité parfaite ; l'effet de la variation de masse volumique est faible) ; si l'eau, dans ces tubes, était initialement à sa position d'équilibre, il s'écoulera pendant cette période d'échauffement  $300 - 298,5 = 1,5$  mm d'eau ; pour calculer la hauteur d'eau écoulee en rapportant le volume à la section totale du modèle, il faut multiplier 1,5 mm par la porosité et par la tortuosité.

Ce résultat ne paraît pas incompatible avec les observations ; c'est ainsi que, au cours de ces oscillations thermiques, un bac peut écouler, en 24 heures, 1 mm dont la majeure partie s'écoule pendant quelques heures de pointe (4 heures par exemple) ; le caractère brusque du phénomène (cette concentration de l'écoulement sur quelques heures) peut être simulé avec des capillaires dont l'eau ne serait que pendant quelques heures par jour à une température suffisamment élevée pour que la hauteur d'ascension capillaire soit inférieure à la hauteur d'eau présente dans les tubes (cote du ménisque au-dessus de l'eau libre). On sait d'autre part qu'une élévation de température de l'eau de, par exemple,  $5^\circ \text{C}$  entraîne une baisse d'environ 20 p. 100 de sa viscosité, c'est donc une augmentation de cet ordre pour le débit que l'on pourrait attendre avec des tubes où la hauteur d'eau serait largement supérieure à l'ascension capillaire (cas où prédomine l'effet viscosité) ; les cas où prédomine l'effet tension superficielle donnent au contraire des variations relatives de débit beaucoup plus fortes et susceptibles d'être resserrées sur quelques heures, comme nous l'avons observé sur les bacs. Notons que, dans ces conditions où les tubes ont perdu la plus grande partie de leur eau en excès (et c'est bien la situation réalisée dans les bacs un jour ou deux après le début de la vidange), il semblerait que le modèle soit un peu moins éloigné de la réalité que précédemment ; en effet, on n'a plus à prendre en compte que des morceaux de tubes (leurs parties inférieures), néanmoins ; dans l'exemple traité (rayons de  $50 \mu$ ), ces morceaux sont encore fort longs puisqu'ils s'étendent sur au moins 30 cm selon la direction verticale.

Nous n'avons pas examiné les effets complexes exercés par les gradients de température sur les mouvements d'eau liquide et de vapeur à l'intérieur des bacs ; ils jouent vraisemblablement un rôle notable à ce stade ; en ce qui concerne les sorties d'eau par évaporation, nous avons seulement cherché à nous placer dans des conditions où elles sont faibles par rapport au drainage.

II. - 3 - A propos d'autres modèles (égouttage)

-----

Le modèle constitué de tubes (de section constante sur toute leur longueur) qui restent pendant plusieurs jours parfaitement mouillés par des films d'épaisseur invariable est purement idéal (non seulement il ne simule que de façon lointaine ce qui se passe dans le sol, mais si on expérimente sur de tels capillaires, l'écoulement ne s'y produit pas aussi simplement que d'après les calculs précédents) ; ainsi, pour revenir aux oscillations diurnes, si des tubes dans lesquels la hauteur d'eau est proche de l'ascension capillaire drainent aux heures où l'eau est plus chaude, on conçoit que l'effet puisse se répéter le jour suivant : entretemps les films d'eau restés dans les parties supérieures s'amenuisent lentement, et l'eau évacuée reconstitue dans les parties inférieures, les colonnes d'eau qui drainent périodiquement. De façon plus générale, on pourrait envisager des modèles composites (avec peut-être des faisceaux capillaires séparés par des cavités de plus faible courbure) faisant une large part, à côté de l'écoulement dans des tubes, aux effets d'égouttage (effets d'égouttage à rapprocher de ceux qu'on observe sur des objets mouillés, après une pluie par exemple) ; ces modèles concernant le ressuyage lorsque l'humidité est peu supérieure à la capacité de rétention, se rapprochent du schéma selon lequel, dans le sol, à la capacité de rétention, l'eau serait pour une bonne part présente "sous forme d'amas dissociés limités par des ménisques" comme l'écrit Féodoroff en citant des communications de Rode et de Smith (1966)

## RESUME ET CONCLUSIONS GENERALES

---

Au cours de cette étude, nous avons effectué des comparaisons entre les drainages de cases lysimétriques à sol nu et fond librement drainé qui ont des profondeurs différentes (150, 100 et 50 cm) ; la plupart sont remplies du même matériau (horizon B de Versailles) et ont une surface de 2 m<sup>2</sup>.

Nous avons étudié l'évolution du débit (hydrogrammes) après une pluie suffisante pour déclencher un drainage supérieur à 5 mm.

Dans les conditions climatiques de Versailles, une nouvelle pluie vient souvent perturber l'hydrogramme correspondant à la précédente, il a donc fallu limiter cette partie de l'étude à des "épisodes sélectionnés" (pas de perturbation de l'hydrogramme jusqu'à ce que le débit soit très faible, inférieur à 0,1 mm en un jour).

Nous avons distingué les épisodes situés en saison chaude (six mois à jours longs : d'avril à septembre) de ceux situés en saison froide (six mois à jours courts : d'octobre à mars). On a utilisé les valeurs du drainage journalier, mesurées tous les jours pendant 13 ans, mais de plus, nous avons enregistré pendant deux ans le drainage de certaines cases au moyen de pluviographes qui permettent de suivre la variation du drainage dans des intervalles de temps beaucoup plus courts que la journée ; les hydrogrammes ainsi obtenus se prêtent à des études plus précises que les précédents.

Alors que le drainage total annuel de la case de 50 cm remplie du même matériau que les cases de 150 cm, ne se distingue pas systématiquement du drainage de celles-ci, les hydrogrammes sont nettement différents : nous avons constaté que lorsqu'il se produit une montée du débit à la suite d'une pluie, si le débit des cases à cet instant est faible, c'est-à-dire que l'épisode de drainage précédent est terminé, le temps de réponse est, comme on l'attend, plus faible dans la case de 50 cm que dans celles de 100 et 150 cm ; le débit de pointe  $Q_M$  est plus grand dans la case peu profonde ; par contre, si au moment où cette nouvelle pluie survient, le débit du drainage est déjà intense

( $q_1 \geq 0,2$  mm par heure) c'est-à-dire avant la fin de l'épisode précédent, ce classement devient inverse : le temps de réponse est alors plus court dans la case de 150 cm que celle de 50 et le débit de pointe plus élevé se produit dans la case la plus profonde (Voir tableau III - 8 - 6).

La vitesse de transfert (le rapport de la profondeur de la couche drainante  $L$  au temps de réponse  $Tr$ ), étant plus ou moins égale pour le premier cas dans les cases de différentes profondeurs, devient plus grande pour les cases profondes dans le second cas ; quand  $q_1$  est grand.

Ces observations ont été essentiellement remarquées en saison froide, car en saison chaude, en raison de la faible humidité du sol, le calcul des différents paramètres de l'hydrogramme est difficile (insuffisance de précision sur le temps de réponse).

Après la pointe de l'hydrogramme qui se produit d'ailleurs à un instant donné, sans que le débit maximum se maintienne quelque temps, (pas de saturation donc au cours de nos observations), le débit des cases de 50 cm devient rapidement très faible ; au contraire, pour les cases de 150 cm, à une phase de décroissance rapide, succède une phase pendant laquelle un faible débit se maintient longtemps, c'est ainsi qu'on peut observer pendant deux semaines et plus, des valeurs de drainage situées entre 0,1 et 0,2 mm en un jour. Voici quelques précisions : deux à quatre jours après la fin de la pluie, le drainage tombe en-dessous de 0,5 mm/j, ce qui est un débit déjà faible (contribution au drainage annuel peu supérieur à 10 %) ; encore deux à quatre jours plus tard, le drainage de la case de 50 cm est inférieur à 0,15 mm/j, ce qui, à bien des égards, est un débit négligeable, alors que cette phase (entre 0,5 et 0,15 mm/j) dure souvent une dizaine de jours pour la case de 100 cm et plus pour celle de 150 cm.

Ayant donc constaté que la répartition du drainage dans différentes classes de débit n'était pas la même pour les cases de profondeurs différentes, nous avons confirmé et précisé ces résultats en établissant les courbes de débits journaliers classés. Cette méthode, si elle s'éloigne de l'étude du phénomène réel, tel qu'il apparaît sur les hydrogrammes, a l'avantage, entre autres, de permettre la prise en compte de tous les drainages mesurés ; nous avons ainsi classé pour chaque case tous les débits journaliers de deux années choisies pour leurs pluviométries très différentes.

Ainsi pour le débit  $\geq 0,5$  mm en un jour et pour l'année relativement sèche (1961 - 62) :  
la case profonde (150 cm) draine pendant

7 jours d'Avril à Septembre 1961 avec 14 mm de drainage total  
91 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962 avec 217 mm

la case peu profonde (50 cm) draine pendant

9 jours d'Avril à Septembre 1961	avec	20,5 mm
88 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962	avec	223,3 mm

Pour le débit  $0,05 < q < 0,5$  mm en un jour et pour la même année, la case de 150 cm draine

125 jours d'Avril à Septembre 1961	avec	16,40 mm
91 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962	avec	23,80 mm

la case de 50 cm dans les mêmes conditions draine

25 jours d'Avril à Septembre 1961	avec	5,0 mm
80 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962	avec	14,5 mm

La contribution des faibles débits ( $< 0,5$  mm en un jour) au drainage semestriel est de 19 % pour la case 50 et de 53 % pour la case 150, le premier semestre, 6 % et 10 % pour le deuxième semestre ; la contribution au drainage de la pluviométrie du semestre étant égale pour les deux cases à 9 et 10 % le premier semestre et 80 % le second.

Pour l'année humide (1965 - 66), pour un débit  $\geq 0,5$  mm en un jour la case de 50 cm draine

25 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	118 mm
85 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	296,5 mm

la case de 150 cm draine

26 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	118 mm
92 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	313 mm

Pour le débit  $0,05 < q < 0,5$  mm/j et pour la même année,

la case de 50 cm draine

31 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	5 mm
19 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	4 mm

la case de 150 cm draine

144 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	25,5 mm
88 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	14,3 mm

Contribution semestrielle de drainage avec débit  $< 0,5$  mm/j

Case 50	3,9 %	et	1,3 %
Case 150	17,7 %	et	4,3 %

Nous avons construit cinq bacs expérimentaux installés à l'abri des précipitations naturelles et arrosés artificiellement. Ces bacs dont la section ne fait que  $0,07 \text{ m}^2$  sont remplis du même matériau que les cases (horizon B de Versailles) avec les mêmes profondeurs de couche drainante (2 bacs à 50 cm, 2 à 150 et 1 à 100 cm). Ils ne sont pas

enterrés mais situés dans une serre froide, nous avons pris des précautions d'isolement afin de réduire le plus possible l'évaporation. Les résultats obtenus au cours des différentes expériences vont dans le même sens que ceux obtenus au cours d'étude des cases lysimétriques :

La différence entre les bacs de 50 et de 150 cm de profondeur est aussi évidente que celle observée entre les cases ; étant donné que les arrosages ont été effectués à un moment où pratiquement le drainage était épuisé (débit initial presque nul), le temps de réponse est plus élevé dans les bacs plus profonds et le débit de pointe maximum se produit dans les bacs de 50 cm, la durée de décroissance étant beaucoup plus étendue dans les bacs profonds que dans les moins profonds.

D'autre part, au cours du drainage des bacs, nous avons observé un phénomène qui ne s'est pas manifesté avec les cases lysimétriques : dans le courant de l'après-midi, il apparaît une reprise du drainage qui est souvent très accusée si bien que le maximum secondaire du débit est plusieurs fois supérieur au minimum qui le précède ; cet effet semble dû aux variations de la température, peut-être par l'intermédiaire de la variation de la tension superficielle de l'eau.

Nos observations ont soulevé certaines questions dont l'étude devrait être poursuivie par les mêmes méthodes en cases lysimétriques ou en "bacs" ; en particulier, il y aurait lieu de varier les conditions d'alimentation en eau des bacs.

Les résultats que nous obtenons sont destinés à être étendus au domaine de l'écoulement de l'eau dans le sol en place ; mais cette généralisation ne pourra être faite qu'à la suite d'études au champ, études que le travail exécuté avec des lysimètres doit permettre d'orienter.

## BIBLIOGRAPHIE

=====

- BASTISSE E. M. 1951 - Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées  
à l'agronomie (premier mémoire) Ann. Agr. (722 - 781)
- BOUASSE A. 1924 - Capillarité, phénomènes superficiels - Delagrave - Paris
- CASTANY G. - 1964 - Courbe de tarissement et calcul des réserves  
régulatrices - A. I. H. S. N° 65
- CASTANY G. - 1967 - Traité pratique des eaux souterraines - Dunod - Paris
- CHAUVETEAU G. THIRRIOT Cl. 1967 - Régimes d'écoulement en milieu  
poreux et limite de la loi de Darcy - La Houille Blanche  
N° 2
- COURAU M. - 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau saturante  
dans les milieux poreux artificiels. Ann. Agr.  
20 (3) 245 - 261
- DILEK R. - 1969 - Etude du problème du drainage d'une monocouche et d'une  
bicouche par gammamétrie, Thèse de Doctorat de  
l'Université de Bordeaux
- FEODOROFF A. - 1962 - Ressuyage du sol et capacité de rétention pour  
l'eau Ann. Agr. 13 (6) 523 - 547
- FEODOROFF A. - 1965:- Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non  
saturante - Thèse de Docteur-Ingénieur de la Faculté  
des Sciences de Paris
- FEODOROFF A. et BALLIF J. L. - 1969 - Etude de l'infiltration de la pluie  
in situ à l'aide de tensiomètres - Ann. Agr.
- FEODOROFF A. - 1969 - Infiltration et problèmes agronomiques, quelques  
approches expérimentales - La Houille Blanche N° 8
- FEODOROFF A. - 1970 - Une méthode pour l'étude de l'infiltration au  
champ - Comm. au Symposium International sur  
l'Erosion

- FORKASIEWCIZ J. & POLAC H. - 1967 - Régime de tarissement de la Faux de la Vis (Gard) - La Houille Blanche N° 1
- HABIB P. & SOEIRO F. - 1957 - Les mouvements de l'eau dans les sols sous l'influence de la température C. G. B. T. P.
- HENENSAL P. - 1965 - Le lysimètre L. C. P. C. Fonction de la couche drainante de la chaussée - Labo. Central des Ponts et Chaussées
- HENENSAL P. - 1969 - Etudes expérimentales de l'effet de lisid dans une chaussée - Labo. Central des Ponts et Chaussées
- HENIN S. - et Collaborateurs - 1969 - Profil cultural - L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques - Masson & Cie - 2ème Edition - Paris
- PENMAN H. L. & SCHOFIELD R. K. - Drainage and evaporation from fallow soil at Rothamsted - The Journal of Agr. Sc. 31 - 1941 - P. 78
- PUECH J. - 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau non saturante de différents sols vers une zone d'absorption Ann. Agron. 20 (3) - 245 - 261
- PUECH J. - 1969 - Capacité de cession de l'eau des sols et essai d'interprétation des débits - Ann. Agron. 1969 20 (5) 505 - 6516
- REMANETAS G. - 1965 - L'hydrologie de l'ingénieur Eyrolles
- ROCHE M. - 1963 - Hydrologie de surface O. R. S. T. O. M. - Gauthier-Villars Paris
- RODE A. A. - 1966 - The nature of the minimal water retentive capacity Coll. UNESCO Wageningen
- SMITH W. O. - 1966 - Infiltration in sands and its relation to groundwater recharge, Coll. UNESCO - Wageningen
- SCHNEEBELI .G. - 1966 - Hydraulique souterraine Eyrolles - Paris
- SOEIRO F. - 1964 - Contribution à l'étude du mouvement de l'humidité dans les milieux poreux isothermes - Cahier de la Recherche I. T. B. T. P. N° 18 1964

TURC L. 1953 - Le bilan d'eau des sols : relation entre les précipitations  
l'évaporation et l'écoulement - Thèse Paris

VACHAUD G. - 1968 - Etude de régime transitaire de l'écoulement de  
l'eau pendant le drainage des nappes · à surface  
libre - La Houille Blanche N° 5