

TD
227
.24
R62
1984

ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU DE FONTE SUR LE
VERSANT NORD DU LAC LAFLAMME À PARTIR DES
DONNÉES JOURNALIÈRES DE 1981 ET 1982

RAPPORT No 2

Environnement Canada
Direction générale des eaux intérieures

par

Jean Roberge, M.Sc., géographe
André P. Plamondon, Ph.D., ing.for.
Jean Stein, M.Sc. ing.for.

Département des sciences forestières
Université Laval

Octobre 1984



RESUME.

Après avoir présenté un bilan hydrique des périodes de fonte 1981 et 1982 et d'en avoir précisé les dates, le rapport se concentre sur l'analyse des informations journalières obtenues par quatre dispositifs expérimentaux indépendants. Il s'agit de deux séries de blocs de résistance, d'un réseau de puits d'observation de la nappe phréatique, d'une tranchée d'interception des écoulements et d'un drain hypodermique.

Les blocs de résistance sont conçus pour étudier les teneurs en eau dans un sol non-saturé. Durant la fonte, ils permettent d'observer les remontées du niveau saturé. Ces particularités notées dans le comportement de certains blocs situés à faible profondeur laissent soupçonner la présence de gel dans le sol. Les puits d'observation permettent de surveiller la réponse du niveau saturé aux événements de fonte ainsi que d'en observer les variations spatiales. La tranchée d'interception sert à apprécier l'importance des écoulements matriciels du sol dans le sens de la pente. Avec l'aide d'un puits d'observation voisin, on cherche à vérifier si des écoulements matriciels non-saturés y prennent une part significative. Finalement, le drain hypodermique nous permet de vérifier l'existence d'un écoulement hypodermique non-matriciel tout en cherchant à déterminer les circonstances favorables à ce processus. Une revue de littérature sur l'écoulement hypodermique en conduits accompagne ce chapitre. La conclusion fait la synthèse des principaux résultats et en dégage les implications sur l'hydrologie du versant en période de fonte.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RESUME.	i
TABLE DES MATIÈRES.	ii
LISTE DES TABLEAUX.	iv
LISTE DES FIGURES	v
 1. INTRODUCTION.	 1
2. LES APPORTS EN EAU AU SOL DURANT LA FONTE	3
2.1 Bilan hydrique des fontes 1981 et 1982	3
2.1.1 Bilan hydrique du couvert neigeux durant la fonte printanière de 1981	 3
2.1.2 Bilan hydrique du couvert neigeux durant la fonte printanière de 1982	 4
2.2 Durée des fontes 1981 et 1982.	8
3. CHEMINEMENT DES APPORTS EN EAU PRINTANIER.	10
3.1 Informations obtenues à l'aide des blocs de résistance . . .	10
3.1.1 Résultats observés.	10
3.1.1.1 Site 2AR (saison 1981)	10
3.1.1.2 Site 2BR (saison 1981)	14
3.1.1.3 Site 2BR (saison 1982)	16
3.1.2 Interprétation des résultats.	19
3.1.2.1 Information fournie par les blocs de résis- tance versus les puits d'observation	 19
3.1.2.2 Changements de la teneur en eau du sol suite aux impulsions de fonte.	 20
3.1.2.3 Effet du gel sur l'infiltrabilité de la partie supérieure du sol	 21
3.2 Informations fournies par les puits d'observation.	23
3.2.1 La fonte de 1981.	24
3.2.1.1 Temps de réponse des puits suite aux impul- sions de fonte	 26

3.2.1.2	Amplitude des fluctuations du niveau d'eau dans les puits d'observation.	26
3.2.1.3	Comparaison entre le niveau de saturation déterminé par les blocs de résistance et celui déterminé par les puits d'observation	27
3.2.2	La fonte de 1982	29
3.3	Informations fournies par la tranchée d'interception.	34
3.3.1	Relation entre les débits à la tranchée et le niveau d'eau dans un puits voisin	35
3.3.2	Ecoulement du niveau supérieur	39
3.4	Informations fournies par le drain hypodermique	40
3.4.1	L'écoulement hypodermique en conduits, considérations théoriques	40
3.4.2	Ecoulement ou drain hypodermique: résultats et interprétation.	42
3.4.2.1	Dispositif de mesure.	42
3.4.2.2	Ecoulement capté.	43
3.4.2.3	Circonstances favorables à l'existence d'écoulement hypodermique en conduits	43
3.4.2.4	Provenance des écoulements mesurés.	47
4.	CONCLUSION	49

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau		
1	Écoulements au drain hypodermique (1982)	
	Partie A : Écoulements journalier avant le 28 avril	
	1982.	44
	Partie B : Débits instantanés mesurés à compter du 28	
	avril 1982.	46

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	Apports en eau durant la fonte (1981).	5
2	Apports en eau durant la fonte (1982).	7
3	Equivalent en eau et hauteur de la neige échantillonnés (ligne A) vs équivalent en eau reconstitué au lysimètre.	9
4	Blocs de résistance, série 2AR (1981).	11
5	Blocs de résistance, série 2BR (1981).	15
6	Blocs de résistance, série 2BR (1982).	17
7	Niveau d'eau dans les puits d'observation (1981)	25
8	Niveau d'eau dans les puits en bas de pente (1982)	28
9	Niveau d'eau dans les puits E, F, G et T (1982).	30
10	Niveau d'eau dans les puits H, J et K (1982)	31
11	Comparaison entre le niveau saturé indiqué par les blocs de résistance et ceux mesurés dans les puits voisins.	32
12	Ecoulement journalier à chacun des étages de la tranchée d'inter- ception et profondeur du niveau d'eau dans le puits T (1981) . . .	36
13	Ecoulement journalier à chacun des étages de la tranchée d'inter- ception et profondeur du niveau d'eau dans les puits G et T (1982)	37
14	Relation entre le niveau d'eau au puits T et l'écoulement à la tranchée d'interception.	38

1. INTRODUCTION.

La période de fonte printanière compte pour une part importante des écoulements annuels au Québec. Les mécanismes d'écoulement des eaux relâchées durant cette période, sont mal compris. Peu d'études ont été faites sur la production de l'écoulement en période de fonte dans des milieux comparables à ceux qu'on retrouve dans le massif laurentien. Les conditions printanières étant particulières, on ne peut transposer directement nos connaissances de l'hydrologie estivale de ces milieux. C'est pourquoi nous avons décidé d'étudier sur le terrain (en l'occurrence sur un versant du bassin expérimental du lac Laflamme) le cheminement des eaux en période de fonte printanière.

Le rapport de Roberge et Plamondon (1982) intitulé: "Fonte de la neige et écoulement dans le sol au printemps, lac Laflamme, Forêt Montmorency, Québec", présentait la méthodologie et l'instrumentation utilisées pour la campagne de mesures du printemps 1981 ainsi qu'une analyse préliminaire des résultats compilés sur une base journalière. Le présent rapport se penche plus spécifiquement sur le problème de l'écoulement de l'eau de fonte sur le versant en 1981 et 1982, à partir de données compilées également sur une base journalière. Ses conclusions sont préliminaires puisqu'elles précèdent celles qui proviendront d'une analyse plus raffinée à partir de données horaires. L'approche méthodologique n'est pas présentée ici car l'instrumentation de 1982 est sensiblement la même qu'en 1981. Le rapport fait toutefois état des ajouts dans l'instrumentation qui sont intervenus entre 1981 et 1982, notamment en ce qui concerne les puits d'observation

et le drain hypodermique. Une brève revue de littérature concernant l'écoulement hypodermique en conduit (pipe flow) est aussi présentée, ce sujet n'ayant pas été abordé par Roberge et Plamondon (1982).

Nos travaux hydrométriques ont permis de constater que les écoulements matriciels latéraux sont négligeables en milieu non-saturé. Il semble que l'essentiel de l'écoulement le long du versant se fait par deux voies principales: un écoulement matriciel saturé (dans la nappe) et un écoulement hypodermique en conduit. L'importance relative de chacun dépendrait à la fois, de l'intensité des apports en eau au sol, de l'infiltrabilité du sol et du niveau de la nappe.

Les relations entre ces deux types d'écoulement restent toutefois à préciser. Changent-elles au cours d'une même saison ou bien d'une saison à l'autre? De même il serait important de chercher un moyen pour pouvoir mieux mesurer le phénomène d'écoulement hypodermique. Une approche conjointe, intégrant l'étude qualitative des eaux, pourrait être une solution fructueuse.

2. LES APPORTS EN EAU AU SOL DURANT LA FONTE.

2.1 Bilan hydrique des fontes 1981 et 1982.

En 1981 et 1982, les quantités d'eau relâchées au niveau du sol, durant les périodes de fonte à la place échantillon du lac Laflamme, ont été mesurées selon deux méthodes: l'enregistrement des écoulements à la sortie d'un lysimètre à neige et le bilan hydrique à partir d'un échantillonnage répété du couvert nival et de la mesure des précipitations (Roberge et Plamondon, 1982).

2.1.1 Bilan hydrique du couvert neigeux durant la fonte printanière de 1981.

En 1981, c'est l'échantillonnage du couvert nival qui nous fournit un bilan saisonnier. En effet, en 1981, les captages de ruissellement allochtones au lysimètre ont faussé les mesures au lysimètre les 5 et 6 mai. De plus, certains jours, des pannes de quelques heures nous ont empêchés de connaître l'écoulement total de la journée. Le lysimètre ne nous permet donc pas de dresser un bilan saisonnier des quantités d'eau relâchées au sol.

La quantité d'eau relâchée au sol durant la période de fonte se calcule ainsi:

$$A_f = E_o + P_f - ET_f$$

où A_f : apport en eau au sol durant la période de fonte
 E_o : équivalent en eau initial du couvert
 P_f : précipitations durant la période de fonte
 ET_f : évapotranspiration durant la période de fonte.

Ici, nous avons assumé que ET_f était négligeable. E_o était de 212 mm et P_f de 182 mm, pour la période du 1er avril au 20 mai. A_f serait alors de 394 mm.

Une courbe des apports en eau au sol a été tracée à partir de douze valeurs. Cette courbe a été comparée avec celle des écoulements cumulés au lysimètre (figure 1). Jusqu'au 4 mai inclusivement, les deux courbes coïncident de façon surprenante; en effet, les valeurs d'apports en eau cumulés pour les 9, 16, 23 et 30 avril, ainsi que pour le 4 mai, ne s'éloignent pas de plus de 7% de la courbe des écoulements cumulés au lysimètre. De plus, les enregistrements des 5, 6, 9, 10, 17, 18, 21 et 22 mai au lysimètre sont incomplets et la courbe cumulative représente donc des valeurs sous-estimées. La similitude entre les deux courbes pourrait s'expliquer de la façon suivante:

- 1^o la fonte est plus rapide dans le lysimètre que sur le versant et le hasard a voulu que les données manquantes compensent constamment pour la fonte supplémentaire au lysimètre. Cela semble peu probable;
- 2^o la fonte sur le versant et dans le lysimètre est semblable et synchrone, et les écoulements non enregistrés ne sont pas suffisamment importants pour éloigner les deux courbes d'une façon significative.

Après le 4 mai, l'écartement des deux courbes était bien prévisible car les données au lysimètre sont surévaluées les 5 et 6 mai.

2.1.2 Bilan hydrique du couvert neigeux durant la fonte printanière de 1982.

En 1982, l'enregistrement des écoulements au lysimètre n'a pas été

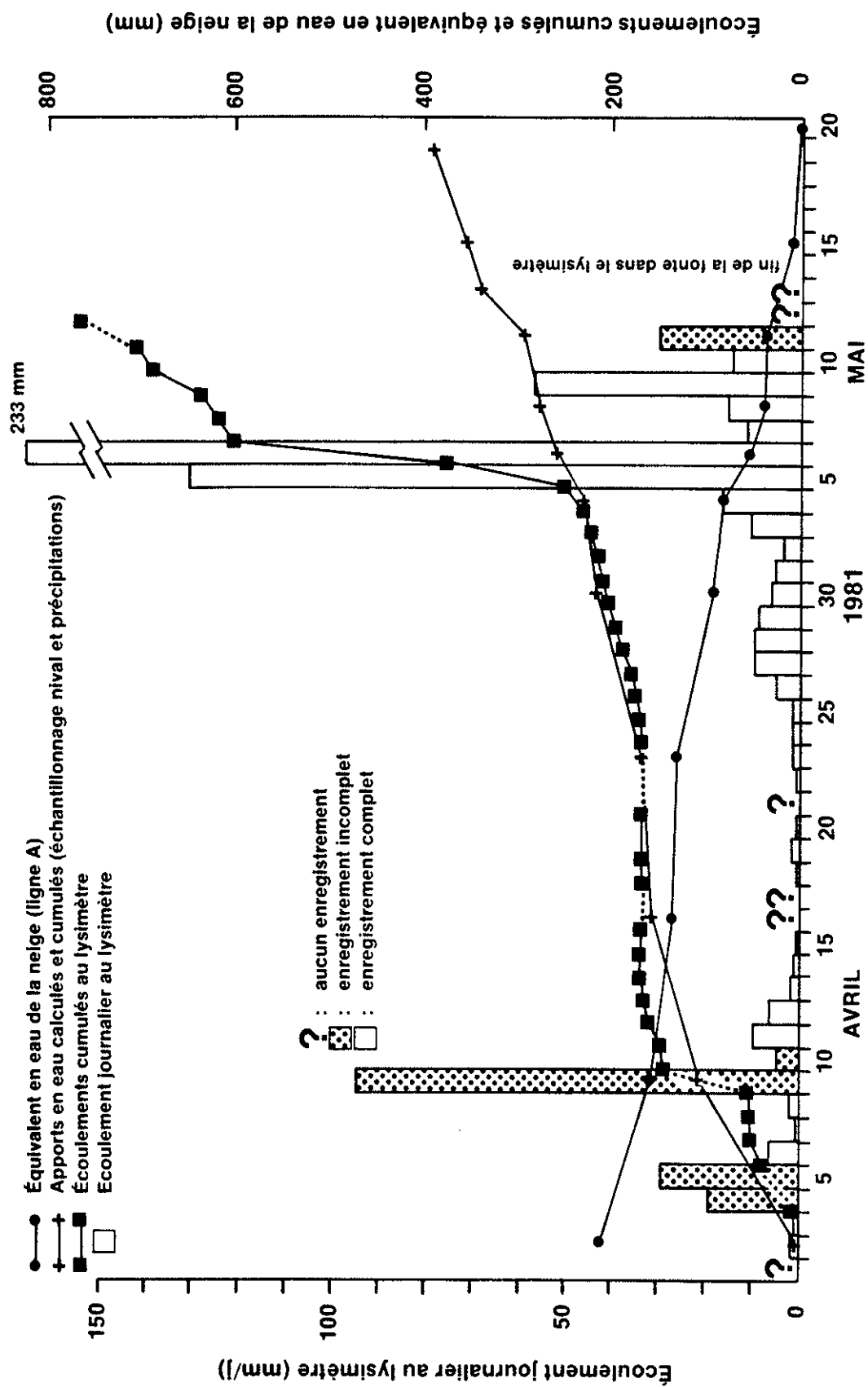


Figure 1 - Apports en eau durant la fonte (1981).

interrompu durant la période de fonte. En tout, 355,6 mm de fonte y ont été mesurés (figure 2). L'échantillonnage de la neige a été pratiqué en douze endroits différents à trente-deux reprises, entre le 2 avril et le 18 mai. Les échantillonnages, peu fréquents en période froide, ont été pratiqués quasi quotidiennement durant la période de fonte intensive. Les valeurs d'équivalent en eau moyen du couvert montrent de fortes oscillations entre des relevés consécutifs. Celles-ci sont trop brutales et irrégulières pour être le résultat de transformations réelles du couvert de neige. Nous les interprétons plutôt comme provenant en grande partie de l'imprécision des mesures causée par la forte hétérogénéité du couvert en sous-bois et possiblement de l'alternance de trois techniciens effectuant les relevés. En 1982, cette méthode n'est donc pas très précise pour estimer la fonte dans des intervalles de vingt-quatre à quarante-huit heures. L'apport en eau total pour la saison de fonte peut être estimé par la somme de l'équivalent en eau du couvert avant la fonte et des précipitations reçues entre le moment du relevé et la fin de la fonte. La fonte en 1982 commençant le 16 avril, on peut faire le calcul avec les relevés du 30 mars et des 2, 13, 15 et 16 avril. Les valeurs du bilan ainsi obtenues sont, respectivement de 388,3, 356,4, 316,4, 310,5, 360,6 et 330,6 mm. La valeur moyenne et celle retenue est la moyenne de ces six valeurs, soit 344 mm avec une déviation standard de 30 mm. Cette épaisseur du couvert neigeux inclut la valeur de la lame d'eau écoulée au lysimètre (355,6 mm). Nous pouvons déduire que les données du lysimètre sont représentatives des apports en eau à notre place-échantillon, en 1982.

L'équivalent en eau de la neige au-dessus du lysimètre a été

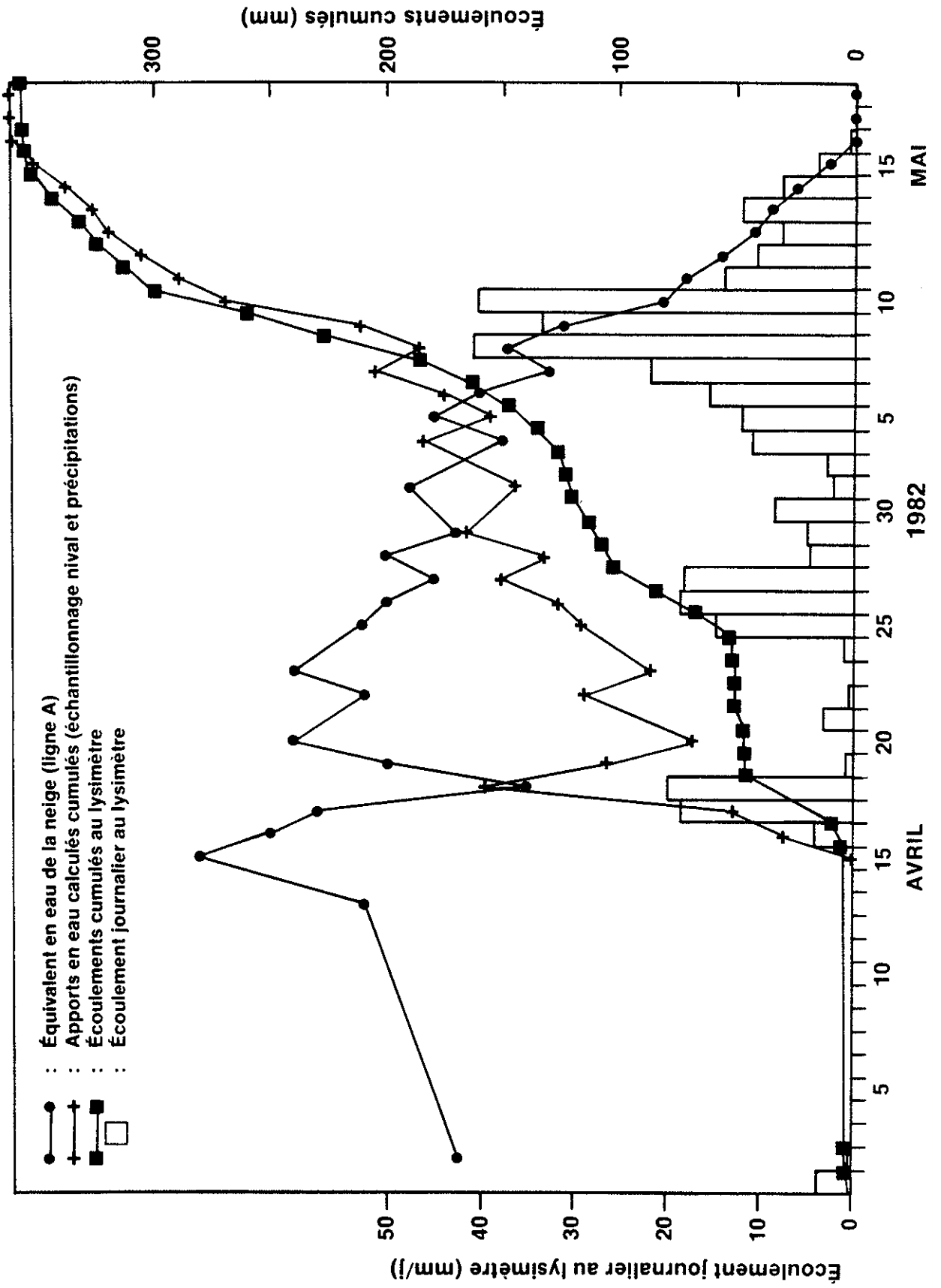


Figure 2 - Apports en eau durant la fonte (1982).

reconstitué en faisant à rebours le bilan journalier des écoulements au lysimètre moins les précipitations à la station principale. Le résultat a été comparé à celui de la ligne de neige (figure 3): la neige est plus abondante dans le lysimètre avant le 7 mai, et sur le versant après le 7 mai. Le lysimètre se trouvant dans une petite clairière, l'accumulation hivernale y serait plus importante que sur le reste du versant, et la fonte un peu plus rapide.

2.2 Durée des fontes 1981 et 1982.

En 1981 et 1982, la durée et les dates de la période de fonte telle que déterminée par l'écoulement au lysimètre, sont fort différemment réparties dans le temps (figures 1 et 2). En 1981, on distingue deux périodes, soit du 2 au 14 avril avec des pointes de fonte les 5 et 9, puis du 26 avril au 15 mai (dans le lysimètre) ou du 26 avril au 18 mai (sur la place-échantillon) avec des pointes les 6 et 9 mai. La première période représente près de 40% du total des apports en eau contre environ 55% pour la seconde, soit respectivement 159 et 217 mm.

En 1982, si on exclut 4 mm d'eau mesurés le 1er avril, tous les apports en eau au sol en période de fonte se concentrent entre le 15 avril et le 16 mai, avec des pointes les 18 et 26 avril, ainsi que les 7 et 9 mai. La période de fonte la plus intense avec près de 65% des apports en eau, se situe entre le 3 et le 16 mai.

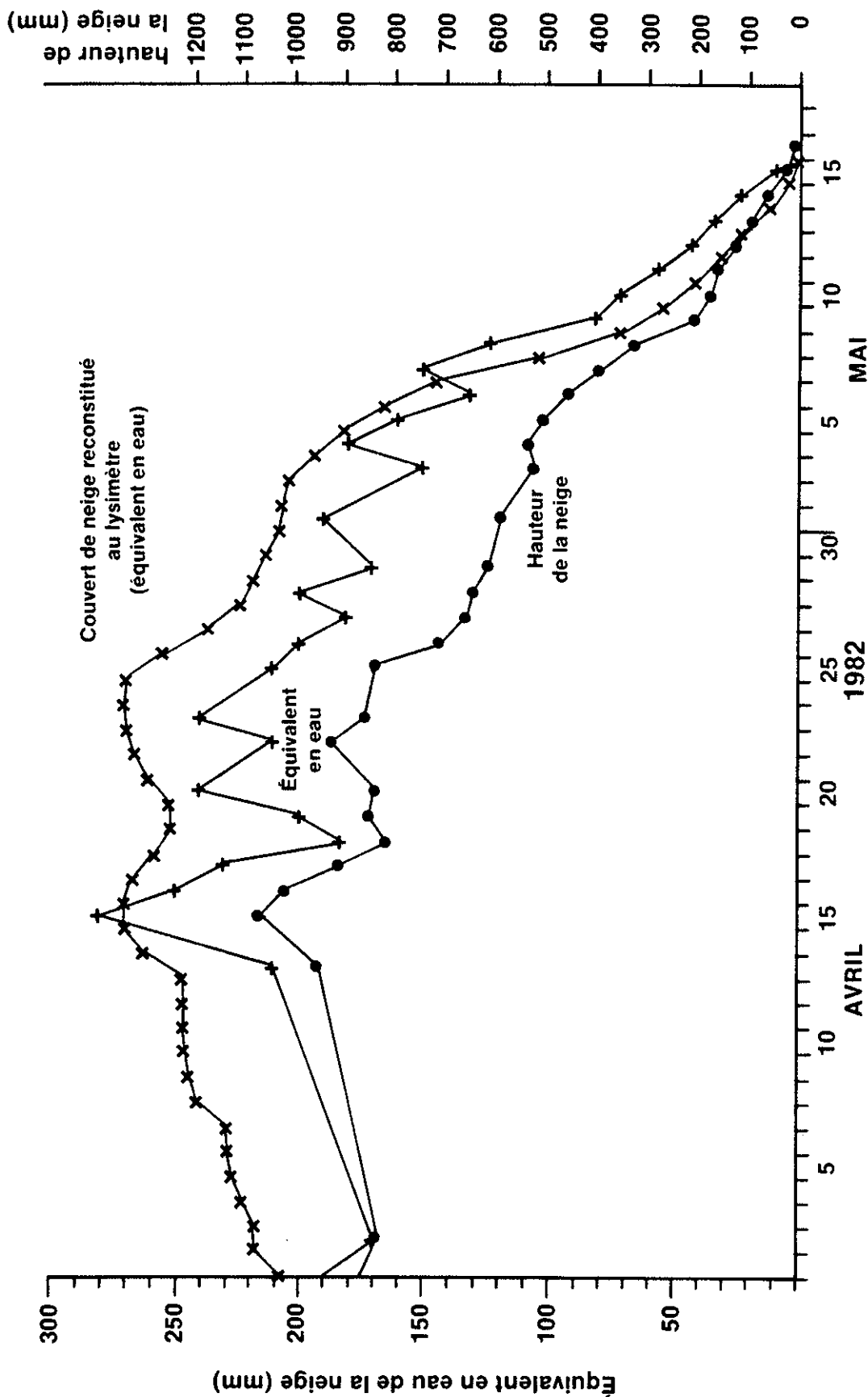


Figure 3 - Équivalent en eau et hauteur de la neige échantillonnés (ligne A) vs équivalent en eau reconstitué au lysimètre.

3. CHEMINEMENT DES APPORTS EN EAU PRINTANIER.

3.1 Informations obtenues à l'aide des blocs de résistance.

3.1.1 Résultats observés.

La réponse des blocs de résistance en situation saturée nous est fournie par l'observation des résistances mesurées alors que le niveau de la nappe atteignait ou approchait la surface dans les puits voisins. Ainsi, on constate qu'à saturation, la résistance des blocs se retrouve entre $10^{3.4}$ et $10^{3.7}$ ohm (le plus souvent entre $10^{3.5}$ et $10^{3.6}$ ohm). Cela nous permet alors, sans que les blocs n'aient été étalonnés, de repérer et de suivre la présence et l'étendue de la saturation aux sites 2AR et 2BR, en 1981 et 1982.

3.1.1.1 Site 2AR (saison 1981).

Les 1er, 2 et 3 avril 1981 (figure 4), on constate une augmentation graduelle de la teneur en eau au niveau -5 cm, alors que les résistances demeurent rigoureusement stables à -10, -20 et -40 cm. On peut supposer que la couche de litière et de matière organique s'imbibe lentement. Pendant ce temps, la nappe monte et franchit le niveau -120 cm le 2 avril, alors qu'à -100, -80 et -60 cm, on observe un creux des valeurs de résistance qui remontent ensuite jusqu'au 4 avril. L'importance de cette baisse et de cette remontée est maximum à -100 cm et minimum à -60 cm. Le minimum de résistance à -100, -80 et -60 cm proviendrait d'une remontée capillaire de l'eau depuis la surface saturée jusqu'à ces niveaux, ce qui explique l'absence de ces variations à -40, -20 et -10 cm. A la surface, l'eau, libérée au niveau du sol, humecte lentement la litière, s'infiltré pour aller hausser la nappe mais ne semble pas affecter la teneur en eau

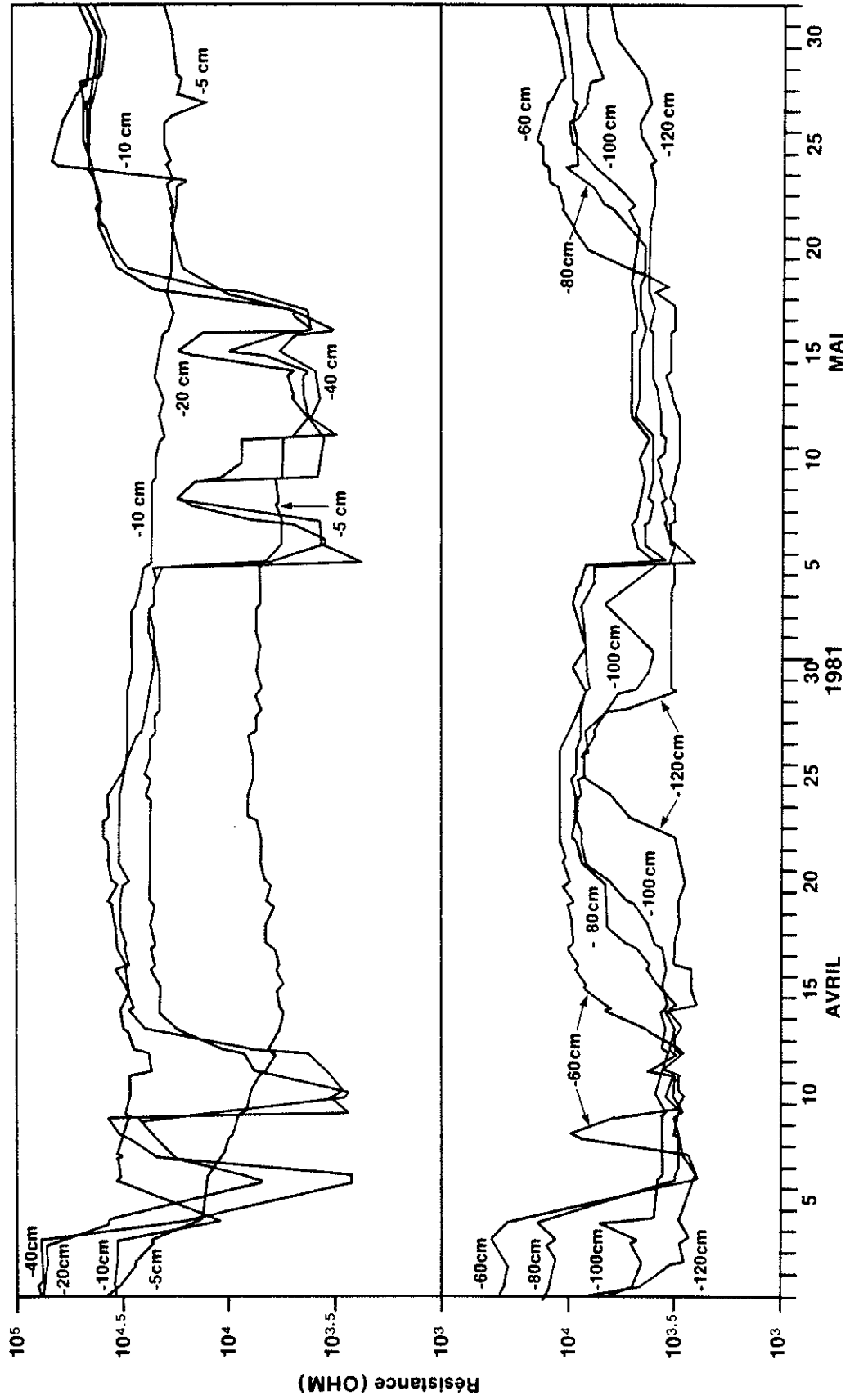


Figure 4 - Blocs de résistance, série 2AR (1981).

aux niveaux -10, -20 et -40 cm, du moins autour des blocs de résistance du site 2AR.

Les 4 et 5 avril, les apports en eau deviennent plus substantiels (≥ 20 mm/j) et dès le 4, à -10, -20 et -40 cm, les résistances diminuent sensiblement. A -60 cm, on note aussi un début de baisse. On peut supposer qu'en fin d'avant-midi, un front d'infiltration a atteint à peu près le niveau -60 cm. En même temps, on note que la nappe est remontée au-delà de -100 cm alors que le niveau -80 ne semble pas encore affecté ni par la montée de la nappe ni par un front mouillant. A -5 cm, la baisse de la résistance s'est accélérée. Le 5 avril, aucune donnée n'est disponible sur les blocs de résistance. Le 6, on constate que la nappe se situe quelque part entre -20 et -40 cm. A -20 cm, bien qu'elle n'ait pas atteint sa valeur de saturation, la résistance a diminué alors qu'à -10 cm, elle est revenue à ses valeurs d'avant le 4 avril et qu'à -5 cm, on a à peu près la même valeur que le 4 avril.

Après le 6 avril, la résistance du niveau -5 cm continue de décroître régulièrement jusqu'à près de $10^{3.7}$ Ω . Vers les 14 et 15 avril, elle se stabilise entre $10^{3.8}$ et $10^{3.9}$ Ω jusqu'au 5 mai. Pendant ce temps, à -10 cm elle se maintient entre $10^{4.4}$ et $10^{4.5}$ Ω . Le 5 mai à -10 cm, et les 5 et 6 mai à -5 cm, on observe une baisse plus rapide des résistances. A -10 cm, cela sera suivi d'une baisse lente et régulière jusqu'au 23 mai. La résistance passant de $10^{4.34}$ à $10^{4.28}$ Ω atteste d'une légère humectation du sol à ce niveau. A -5 cm, lors des apports en eau plus importants du 5 et 6 mai, la résistance passe de $10^{3.84}$ à $10^{3.74}$ Ω . Elle se stabilise à ce niveau jusqu'au 11 mai, puis descend vers des valeurs caractéristiques de la saturation avec $10^{3.56}$ Ω le 13 mai. Suivent une remontée de la résistance avec une pointe, le 15 mai à $10^{3.74}$ Ω , une baisse

avec un creux à $10^{3.5} \Omega$ le 16 mai, puis finalement une remontée rapide jusqu'à $10^{4.2} \Omega$ le 19 mai. Entre les 23 et 24 mai, la résistance au niveau -10 cm fait un bond brutal de $10^{4.2}$ à $10^{4.8} \Omega$, ce qui, à priori, nous semble difficile à expliquer. Elle redescend ensuite jusqu'à $10^{4.62} \Omega$ le 30 mai.

Les changements de résistance à -5 cm semblent tout à fait indépendants de ceux à -10 cm. Toutefois, on constate un certain synchronisme entre la résistance à -5 cm et le niveau saturé. La baisse de résistance des 5 et 6 mai est à peu près synchrone à une importante remontée de la nappe jusqu'à -20 cm. Lors de la baisse de la nappe jusque sous la cote -40 cm, la résistance à -5 cm ne change pas alors qu'elle recommence à baisser lorsque la nappe remonte au-dessus de -20 cm. Elle remonte quand la nappe redescend le 15 mai, baisse encore le 16 lors de la remontée, puis à partir du 17, remonte lorsque la nappe s'abaisse définitivement.

Le fait que le niveau -10 cm ne soit pas saturé et l'indépendance des valeurs de résistance à -5 et -10 cm indique que les augmentations de teneur en eau (baisse de la résistance) à -5 cm sont donc attribuables à des apports venus du haut uniquement: l'infiltration. Les résistances en zone non-saturée et le niveau de la nappe répondent tous deux au rythme des apports en eau. A -5 cm, la matière organique semble accroître son emmagasinement en eau durant les quinze premiers jours d'avril, n'en perdant que très peu par drainage lorsque les apports en eau ont cessé. Quand ceux-ci reprennent, elle continue lentement à accroître sa teneur en eau. Ce n'est que le 11 mai, lorsque la teneur en eau de la matière organique dépasse la valeur correspondant à une résistance de $10^{3.72} \Omega$ que les quantités d'eau supplémentaires sont rapidement perdues par drai-

nage, comme on peut l'observer à deux reprises. La rapide et importante remontée de la résistance au-dessus de $10^{3,72} \Omega$ après le 17 mai, se produit au moment où le couvert de neige vient de disparaître en sous-bois. A cette date, la surface du sol étant dégagée, il est possible que l'évapotranspiration et le réchauffement du sol y aient été pour quelque chose.

Du 5 avril au 20 mai 1981, les résistances mesurées aux niveaux -20 à -120 cm nous indiquent des réactions aux fluctuations du niveau de la nappe. Les réactions s'observent d'abord en profondeur lorsque le niveau monte, et du haut vers le bas quand il s'abaisse.

Durant la fonte de 1981, la nappe n'a pas atteint la cote -10 cm et la variation des résistances à -5 et -10 cm demeure donc indépendante du niveau de la nappe.

3.1.1.2 Site 2BR (saison 1981).

Au site 2BR (figure 5), les résistances des niveaux -20 à -120 cm se comportent sensiblement comme celles du site 2AR. Le niveau -10 cm réagit faiblement aux apports en eau de la première vague de fonte. Sa résistance passe de $10^{4.1} \Omega$ avant le 5 avril à $10^{3.8} \Omega$ le 17 avril, pour ensuite remonter lentement jusqu'à $10^{4.18} \Omega$ au matin du 5 mai. Elle s'abaisse avec la pointe de fonte débutant le 5 mai lorsque le niveau s'élève jusqu'au-dessus de la cote -5 cm. Par la suite, la variation des résistances à -5 et -10 cm, tout comme celle aux niveaux sous-jacents, reflète les fluctuations du niveau de la nappe.

Le comportement hydrique du niveau -5 cm diffère de celui observé au site 2AR. La résistance du bloc semble réagir plus facilement aux

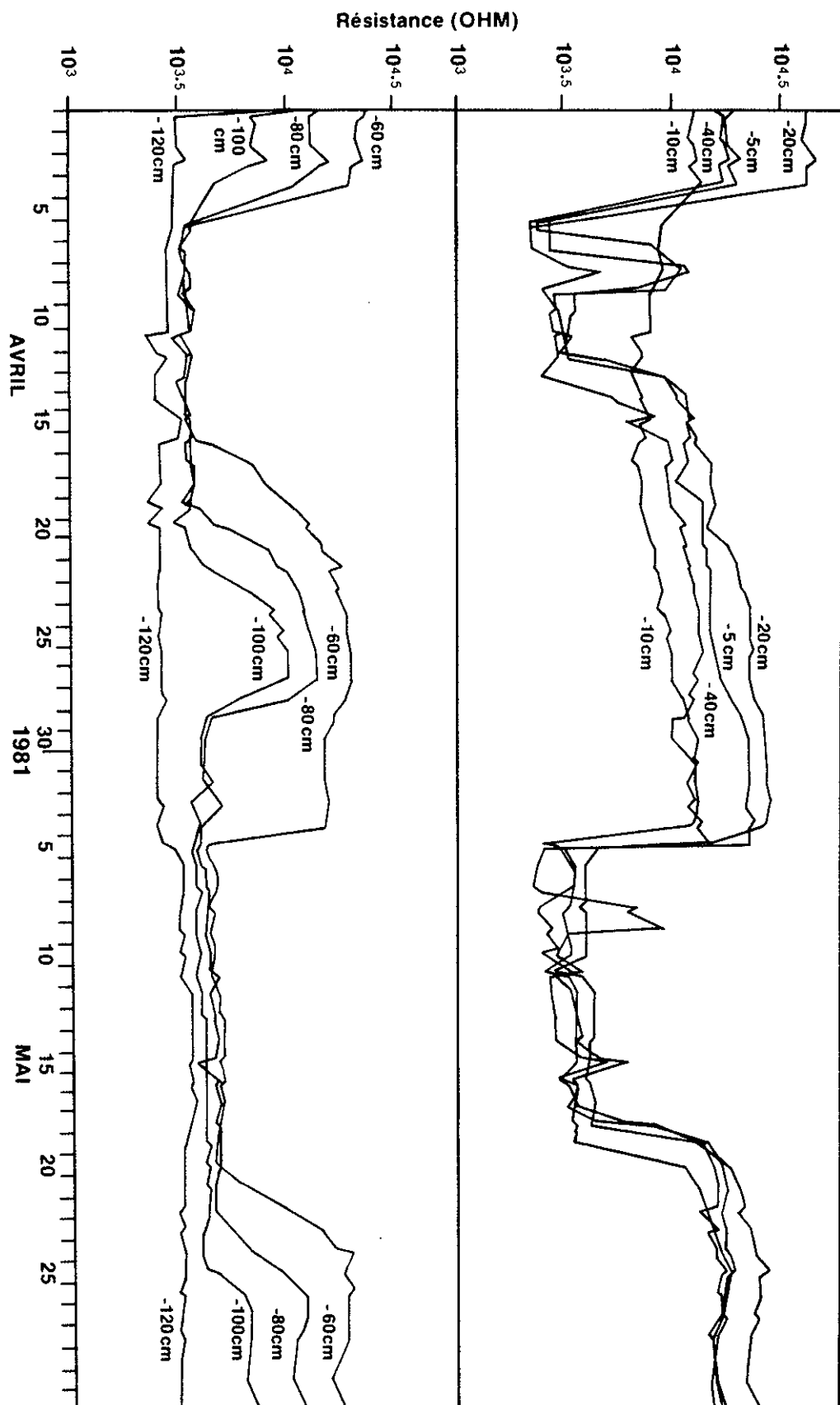


Figure 5 - Blocs de résistance, série 2BR (1981).

variations des apports en eau d'infiltration. Jusqu'au 4 avril, la résistance montre une tendance à l'augmentation. Les arrivées d'eau des 4 et 5 avril suffisent à saturer par le haut le sol à -5 cm. Après le 6, la résistance remonte rapidement jusque vers $10^4 \Omega$. Les apports en eau du 9 avril la ramènent au niveau de saturation où elle y demeure jusqu'au 12 avril. Le 12, alors que les apports en eau deviennent inférieurs à 10 mm/j, la résistance remonte. Du 14 avril au 5 mai, la résistance va s'accroître lentement, passant de $10^{4.06}$ à $10^{4.36} \Omega$. La résistance à -5 cm ne laisse voir aucune réaction aux apports en eau, du 12 avril au 4 mai inclusivement. Le 5 mai, une remontée majeure de la nappe vient saturer le sol par le dessous jusqu'à -5 cm. Dès lors, les variations des teneurs en eau à -5 cm sont directement dépendantes de celles de la nappe.

A 2BR, la matière organique à -5 cm se sature facilement par le haut lorsque les apports sont élevés (généralement > 15 mm/j). Dès que ceux-ci passent à 10 mm et moins par jour, elle se draine rapidement pour revenir à une résistance supérieure à $10^4 \Omega$. Une fois drainée, les apports en eau de moins de 15 mm/j ne parviennent pas à faire diminuer la résistance. A 2AR, la matière organique à -5 cm accumule de l'eau et sa résistance diminue continuellement et lentement sans toutefois se saturer ni, non plus, se drainer lorsque les apports sont interrompus. Une saturation par le haut est finalement atteinte, non pas lors des pointes de fonte mais seulement au terme d'une longue période d'ammagasinement à la fin de la fonte. A partir de l'état saturé, un faible drainage se manifeste entre les résistances de $10^{3.50}$, $10^{3.56}$, et de $10^{3.24} \Omega$.

3.1.1.3 Site 2BR (saison 1982).

En 1982, seules les résistances du site 2BR (figure 6) ont été

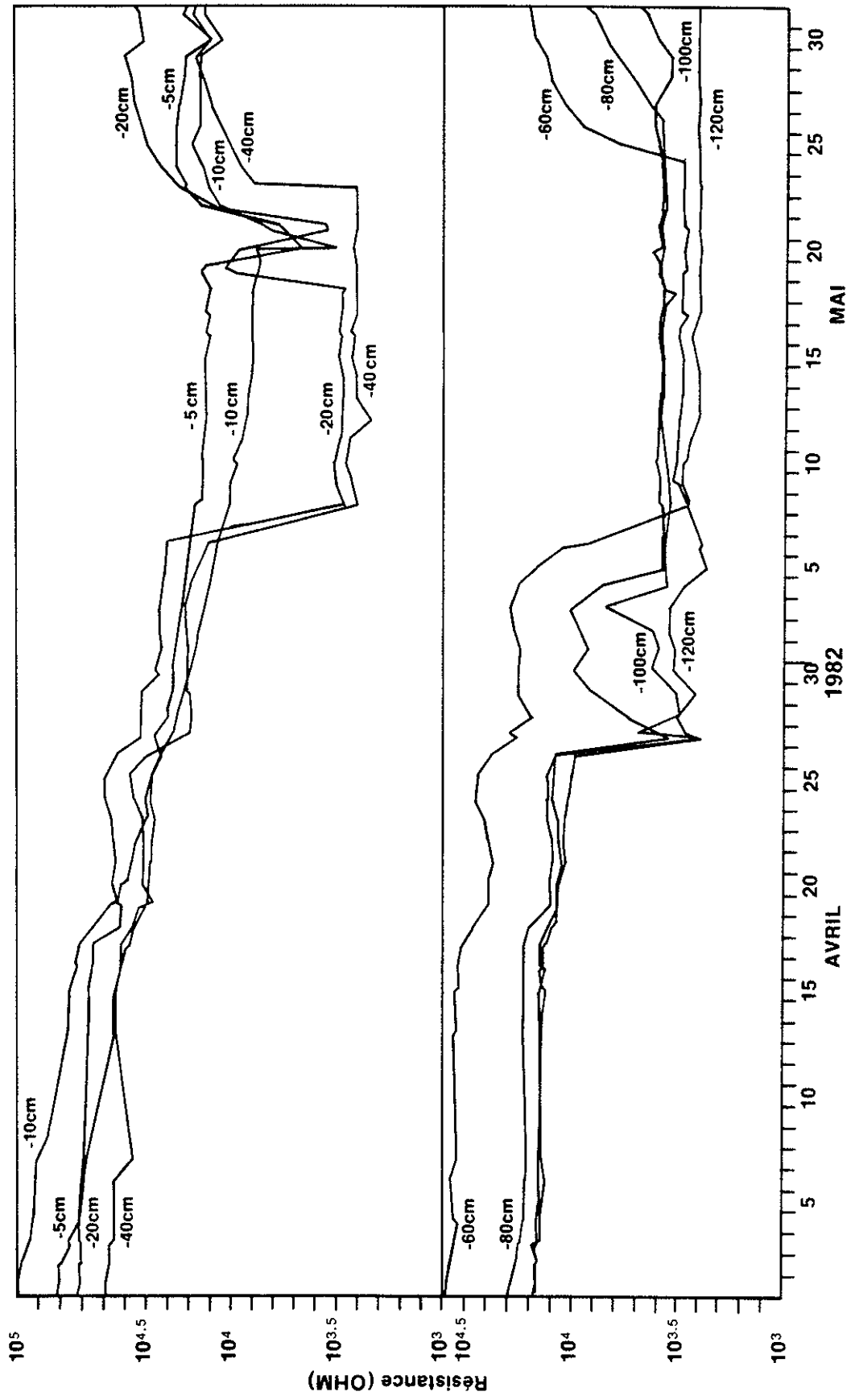


Figure 6 -- Blocs de résistance, série 2BR (1982).

compilées au moment de rédiger ce texte. Comme en 1981, les niveaux -5 et -10 cm se distinguent des autres. Du 1er au 16 avril, les apports en eau sont inexistants ou négligeables. De -20 à -120 cm, on ne note aucune variation significative des résistances alors qu'à -5 et -10 cm, elles passent respectivement de $10^{4.82}$ à $10^{4.5}$ Ω et de 10^5 à $10^{4.72}$ Ω . Alors qu'on mesure des arrivées d'eau de près de 50 mm du 16 au 19 avril inclusivement, on note une chute de résistance à tous les niveaux entre le 17 et le 19 avril. A -5 cm, elle n'est marquée d'aucune inflexion dans une baisse régulière qui a lieu du 1er avril au 19 mai, alors qu'à -10 cm elle se manifeste par une accélération temporaire de cette baisse.

Du 19 au 25 avril, de -100 à -20 cm, on observe une longue remontée interrompue avant d'avoir rejoint la valeur du 17 avril. Du 25 au 27 avril, les apports en eau totalisent encore près de 50 mm. A -5 et -10 cm, les effets sont peu notables. A -20, -40 et -60 cm, les résistances diminuent du 25 au 27 avril. A -80 cm, la résistance amorce une baisse du 25 au 26 avril. Entre le 26 et le 27 avril, une remontée de la nappe vient saturer les niveaux -120 et -100 cm et provoquer, présumément par remontée capillaire, une importante chute de la résistance à -80 cm. Après le 27 avril, les apports en eau ayant diminué à moins de 10 mm/j, la nappe baisse et les résistances remontent. Des apports en eau de plus de 8 mm/j, le 30, infléchissent et ralentissent temporairement les remontées à -120, -100 et -80 cm. A nouveau le 3 mai, les apports en eau journaliers dépassent les 10 mm et à tous les niveaux, sauf -5, -10 et -20 cm, la résistance amorce une nouvelle descente. C'est à -100 et -80 cm que la baisse est la plus marquée entre le 3 et le 4 mai, le niveau -100 cm retrouvant même la saturation. On note, ici encore, l'effet d'une montée capillaire associée à la proximité de la

nappe; la baisse des résistances s'accélère quand le niveau de la nappe se rapproche. Cela s'observe d'abord à -100 puis à -80 et -60 cm. Le 8, le niveau de la nappe a atteint et dépassé le niveau -20 cm.

Pendant la période du 1er au 15 mai, les apports en eau représentent plus de 225 mm avec des valeurs journalières atteignant jusqu'à 40 mm. La lente et régulière baisse de la résistance à -5 et -10 cm ne semble pas en être affectée. Ce n'est qu'une fois la fonte de la neige bien terminée, qu'aux niveaux -5 et -10 cm on observe une réponse marquée aux apports en eau. Les 19 et 20 mai, après dix jours sans précipitation, il tombe respectivement 6,4 et 10,8 mm de pluie. A -5 cm, la résistance passe de $10^{4.10} \Omega$ l'après-midi du 19 à $10^{3.74} \Omega$ l'avant-midi du 20, puis à $10^{3.66} \Omega$ en après-midi. A -10 cm, la réponse se manifeste entre la lecture du matin et celle de l'après-midi du 20 mai. En après-midi, la résistance atteint la valeur de saturation à $10^{3.53} \Omega$ mais le lendemain matin, l'eau est drainée et on revient à $10^{3.8} \Omega$. A -20 cm, la résistance commence à baisser avant même que le niveau -10 cm ne réagisse. Il atteindra la saturation le 21 mai seulement alors que le niveau -10 cm n'est plus saturé. Donc d'une part, on a une réaction du haut vers le bas: à -5 cm puis à -10 cm et une saturation par le haut à -10 cm. D'autre part, on a une remontée de la nappe de -40 cm à plus de -20 cm avec augmentation capillaire de la teneur en eau à -20 cm avant l'arrivée de la nappe, alors que le front d'infiltration ne semble pas encore avoir affecté le niveau -10 cm.

3.1.2 Interprétation des résultats.

3.1.2.1 Information fournie par les blocs de résistance versus les puits d'observation.

Les blocs de résistance nous fournissent de l'information à la fois sur le niveau saturé dans le sol et sur les changements de teneur en eau dans la zone non-saturée. Les variations du niveau de saturation sont

aussi fournies par le réseau de puits d'observation mais les blocs de résistance mettent en évidence les relations entre les résistances en zone non-saturée et la hauteur de saturation. C'est toutefois sur le plan du comportement hydrique de la zone non-saturée que l'information des blocs de résistance est la plus intéressante et utile. Ces informations, rappelons-le, ne sont toutefois que ponctuelles, rien ne certifiant que le site de chacun des blocs soit représentatif de l'ensemble du niveau où il se trouve.

3.1.2.2 Changements de la teneur en eau du sol suite aux impulsions de fonte.

La lecture des blocs de résistance ont généralement été faites vers 10h00 et 15h00 chaque jour, alors que la pointe journalière d'apport à la base de la neige se situe en après-midi. Il n'est donc pas toujours possible d'en observer les effets dans le sol le jour même. Il est aussi difficile de connaître précisément le temps de réponse à chacun des niveaux ou d'évaluer d'éventuels décalages des réponses entre les niveaux.

Les réponses aux apports en eau se manifestent par une baisse de la résistance aux niveaux non-saturés et une montée du niveau saturé. Les réponses sont généralement observables moins de vingt-quatre heures après l'impulsion de fonte. Généralement, seuls les apports en eau de 10 mm par jour et plus parviennent à provoquer des réponses mesurables par les blocs de résistance. Nous avons constaté qu'une baisse de résistance ponctuelle (augmentation de la teneur en eau) peut provenir d'apport d'eau du haut (infiltration) ou du bas (remontée de la nappe aussi associée à l'infiltration). Les deux cas peuvent causer la saturation. La saturation par remontée de la nappe a été observée à tous les niveaux, alors que la

saturation par le haut ne s'est manifestée qu'à -5 et -10 cm. Inversement, les hausses de résistance (baisse de la teneur en eau) correspondent au drainage du sol qui se produit lorsque les apports en eau deviennent inférieurs à une dizaine de mm/j. Elles pourraient aussi résulter en partie de mécanismes d'évaporation dans les niveaux supérieurs après la disparition locale du couvert de neige. Nous n'avons toutefois pas la certitude que ce dernier mécanisme ait joué un rôle significatif durant la période considérée.

3.1.2.3 Effet du gel sur l'infiltrabilité de la partie supérieure du sol.

Sur les deux sites, on constate que les niveaux -5 et -10 cm se distinguent du reste du profil par leur comportement hydrique. Les résistances à ces deux niveaux semblent beaucoup moins sensibles aux variations journalières des apports en eau qu'aux autres niveaux. Elles suivent des tendances à l'échelle de la saison de fonte, généralement vers une baisse de résistance lors des apports en eau. Le niveau -5 cm au site 2BR, en 1981, fait exception en répondant rapidement aux apports en eau, allant même jusqu'à la saturation, alors que le niveau -10 cm s'humecte lentement et faiblement. Ce dernier présente une réponse nette et forte uniquement lorsque la nappe atteint ce niveau. Autrement, les réponses les plus fortes à -5 et -10 cm se rencontrent lors des premiers apports en eau au début de la fonte, soit du 4 au 6 avril en 1981 et du 17 au 19 avril en 1982.

Ces deux niveaux sont aussi ceux où l'on mesure les plus basses températures dans le profil de sol au printemps, les deux années, soit entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ et $-1,0^{\circ}\text{C}$. On peut alors considérer l'hypothèse suivante: le comportement hydrique particulier de ces niveaux du sol serait en partie causé par la présence de gel. Celui-ci réduisant le diamètre et le nombre

des pores, altérerait les propriétés hydriques du sol dont son infiltrabilité, sa conductivité hydraulique et la relation tension-teneur en eau. Cependant, le froid ne serait pas suffisamment intense pour que les blocs de résistance soient gelés, le gel ne s'exprimant pas par les résistances anormalement élevées, généralement caractéristiques du gel.

Certains indices appuient cette hypothèse. Au site 2AR en 1981, l'importante remontée de la résistance du niveau -5 cm, du 17 au 19 mai, se manifeste peu de temps après un premier réchauffement du sol à -5 cm (16 mai). De même, la brusque remontée de la résistance de -10 cm, le 24 mai, coïncide parfaitement avec le premier réchauffement à ce niveau. Dans les deux cas, on peut croire que les sols étaient gelés avec une forte teneur en eau, ce qui expliquerait le drainage rapide au dégel. Celui-ci serait d'autant plus brutal à -10 cm qu'au moment du dégel, les niveaux sous-jacents étaient déjà bien drainés et nettement plus secs, l'eau redevenue disponible s'étant alors rapidement déplacée vers le bas selon les gradients de tension. En 1982, le 17 avril, les températures à -5 et à -10 cm remontent chacune de 0,3°C puis se stabilisent jusqu'à la fin de la fonte. Or le 17 avril, c'est aussi la date où arrivent au sol les premiers apports en eau importants. Une partie de l'eau s'infiltrerait dans la matrice du sol gelé et regèlerait en libérant sa chaleur latente, réchauffant ainsi légèrement le sol. En même temps, elle achèverait de l'imperméabiliser puisque par la suite, sur le site du thermistor, la température n'oscille plus de façon significative. Au site des thermistors et des blocs de résistance 2AR, le réchauffement a lieu le 18 mai à -5 cm et le 23 mai à -10 cm. Au site 2BR, alors que les résistances de -5 et de -10 cm n'ont pas répondu aux forts apports en eau du début mai, elles chutent le 20 mai

après les pluies de 3,5 et 9,1 mm des 19 et 20 mai. De plus, en 1982, des couches de sol gelé ont été observées à faible profondeur, à plusieurs endroits sur le versant, immédiatement après la disparition du couvert de neige.

Le gel superficiel ne parviendrait pas à imperméabiliser totalement un sol forestier fort hétérogène puisque les réponses relativement rapides du niveau saturé aux apports d'eau indiquent que l'infiltration parvient quand même facilement aux niveaux inférieurs du sol. On peut supposer l'existence de voies préférentielles d'infiltration à travers un sol hétérogène où l'infiltrabilité réduite des couches supérieures permettrait toutefois la saturation par le haut du sol pour des apports en eau de l'ordre de 15-20 mm/j et plus, comme on peut l'observer au début d'avril 1981 au site 2BR. A quelques reprises, on peut observer que les eaux d'infiltration provoquent une hausse de la nappe aux niveaux inférieurs des profils, alors qu'aucune réaction à ces infiltrations d'eau ne se manifeste aux niveaux supérieurs. Encore là, on voit un indice de l'existence d'une infiltration par des voies préférentielles mais semblablement favorisée par la présence de couches de gel de -5 à -15 cm.

3.2 Informations fournies par les puits d'observation.

Tout comme les blocs de résistance, les niveaux d'eau dans les puits d'observation sont lus normalement deux fois par jour, soit vers 10h00 et 15h00 (± 1 h.). En 1981, nous disposions de six puits d'observation répartis le long de la pente. Les puits numérotés de 1 à 5 font partie d'un même alignement alors que celui identifié "T" est voisin de la tranchée d'interception, soit à plusieurs mètres à l'est de l'alignement principal.

Le puits No 1 est situé au bord du lac et le No 2 à quelques mètres plus loin mais toujours en bas de pente. Les puits No 4 et No 5 sont

beaucoup plus haut sur le versant. Ils sont placés côte à côte avec les sites de blocs de résistance 2AR et 2BR. Le puits No 3 est à peu près à mi-chemin entre les puits No 2 et No 4.

En 1981, la profondeur des puits ne dépasse pas 1 m. En 1982, neuf nouveaux puits sont installés et leur profondeur dépasse toujours 2,5 m. Une nouvelle identification alpha-numérique est attribuée aux sites. Ce sont les sites A à K, formant un alignement remontant le versant et le site T (le même qu'en 1981) situé plus à l'est, à côté de la tranchée d'interception. La correspondance des sites avec ceux de l'année précédente est la suivante: 1:A, 2:C, 3:G, 4:I, 5:J.

3.2.1 La fonte de 1981.

En 1981, un réchauffement et de fortes pluies en février ont causé une fonte hâtive et probablement une première remontée des niveaux d'eau avant le début de nos mesures. Au début de notre période de mesure, le 1er avril les puits 3 et T sont secs, alors que les puits 1, 2, 4 et 5 sont respectivement à -46, -92, -98 et -65 cm (fig. 7). Les puits Nos 1 et 2 sont près du lac et les niveaux d'eau sont fortement dépendants de celui du lac. Même durant l'étiage de la mi-avril, les niveaux d'eau dans les puits Nos 1 et 2 ne retrouvent pas des valeurs aussi basses que celles du 1er avril. Il en est de même à la fin de mai même si la neige a fini de fondre sur le versant et que les niveaux d'eau dans les puits sont redescendus, mais que la fonte n'est pas encore complétée sur le versant opposé, maintenant un niveau d'eau élevé dans le lac. Au contraire, les puits 3, 4 5 et T s'assèchent durant l'étiage d'avril et la fin de mai (sauf 4 et 5 qui sont près de leur niveau d'assèchement le 31 mai).

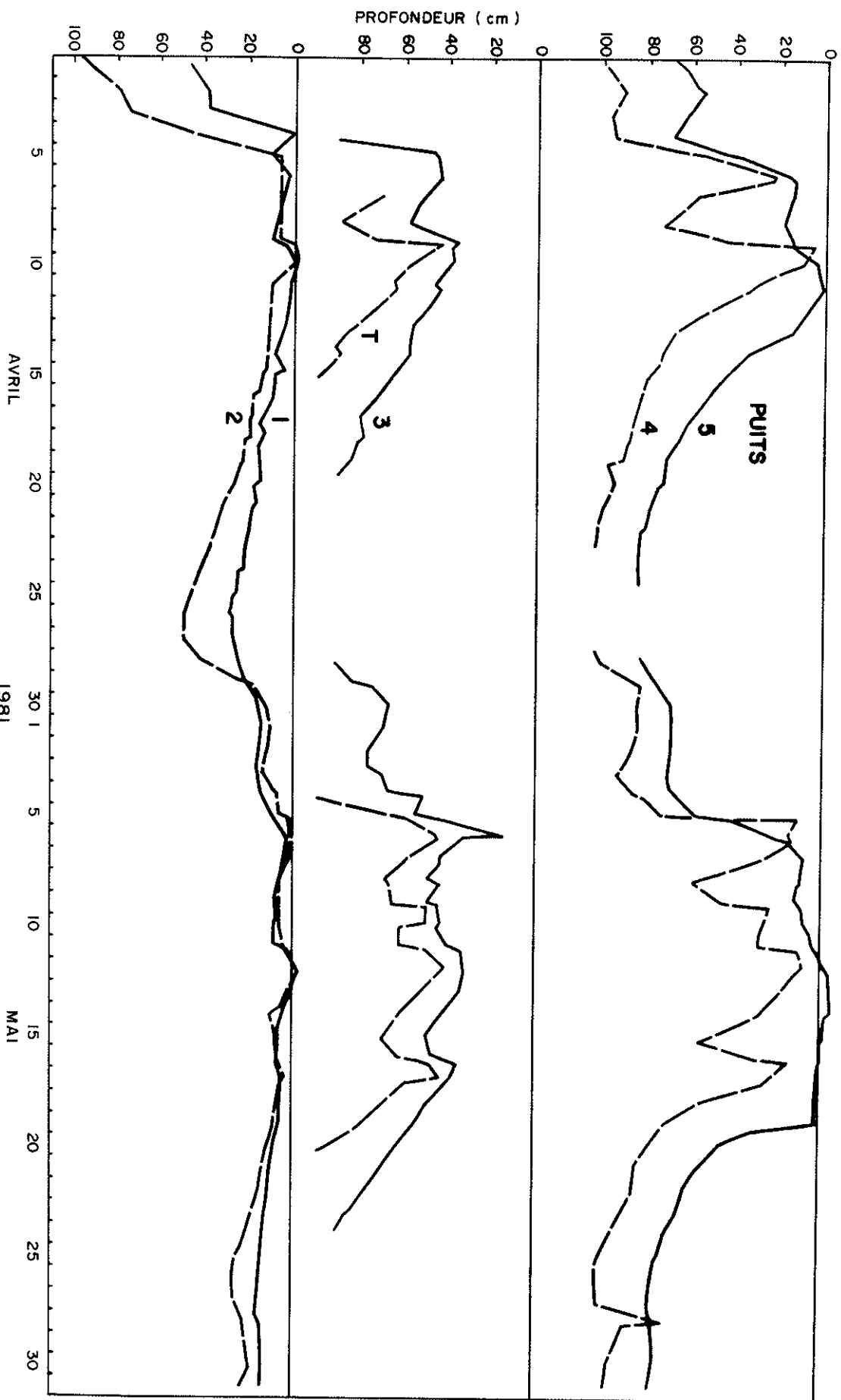


Figure 7 - Niveau d'eau dans les puits d'observation (1981)

3.2.1.1 Temps de réponse des puits suite aux impulsions de fonte.

Compte tenu de l'écart entre deux lectures (de 4 à 20 h.), on peut considérer que les puits répondent à peu près simultanément et rapidement aux apports en eau. Les points et les creux des apports se retrouvent le jour même ou à la lecture du lendemain dans les puits. Seul le puits No 5 présente des retards et décalages significatifs. Nous les attribuons surtout à la formation de glace à l'intérieur du puits No 5 qui a pu fausser l'évaluation du niveau saturé. D'ailleurs l'année suivante, aucun décalage semblable ne sera observé dans un puits non métallique (donc moins sujet au gel) installé sur le même site.

3.2.1.2 Amplitude des fluctuations du niveau d'eau dans les puits d'observation.

On peut distinguer deux groupes de puits d'après leur réponse aux variations des apports en eau: ceux au bas de pente (soit les puits 1 et 2) et ceux sur le versant (les autres). Aux puits 1 et 2, l'amplitude maximale des fluctuations entre le 5 avril et le 31 mai est respectivement de 30 et 50 cm, alors que sur le versant elle varie de plus de 50 cm à plus de 100 cm selon le puits.

Sur le versant, l'amplitude des réponses varie d'un puits à l'autre. Par exemple, le creux du 7 avril se manifeste par une baisse de 16 cm au puits No 3 et de 50 cm au puits No 4. Il est toutefois délicat de comparer l'amplitude exacte des pointes car il est possible que les pointes et les creux ne coïncident pas avec le moment d'un relevé et qu'ainsi, les valeurs maximales et minimales n'aient pas été mesurées. Les différences de réponse aux apports en eau entre les puits, en terme de hauteur remontée et de vitesse de descente du niveau saturé, s'expliqueraient surtout par des variations de

conductivité hydraulique des matériaux entourant les puits. Le till étant un matériel généralement hétérogène, de telles différences seraient normales. Cette hétérogénéité est d'ailleurs bien illustrée par les résultats d'essais visant à mesurer la conductivité hydraulique saturée autour des piézomètres situés en plusieurs sites en bordure du lac et menés par l'équipe d'hydrogéologie. Trois essais ont été effectués à chaque site. Sur la rive nord du lac, la moyenne des essais varie selon le site entre $2,21 \times 10^{-5}$ et $3,03 \times 10^{-4}$ cm/s, soit dans un rapport de 1 à 14 (F. Padilla, communication personnelle). On peut aussi s'attendre à des différences de conductivité sur un même site, compte tenu de la stratigraphie déjà décrite pour les premiers 100-120 cm du sol et présentant trois couches de sol minéral de granulométrie bien distinctes (Roberge et Plamondon, 1982).

3.2.1.3 Comparaison entre le niveau de saturation déterminé par les blocs de résistance et celui déterminé par les puits d'observation.

Les variations du niveau saturé déterminé avec les blocs de résistance aux sites 2AR et 2BR ont été comparées avec celles des puits 4 et 5 (figure 8). Le puits 4 et le site 2AR montrent généralement un bon synchronisme et une bonne correspondance des niveaux d'eau entre 0 et 80 cm de profondeur. Au-dessous de la cote -80 cm, le niveau d'eau s'abaisse plus rapidement à 2AR que dans le puits. Le synchronisme et la correspondance des niveaux saturés sont moins bons entre le puits 5 et le site 2BR mais cela est en bonne partie attribuable au décalage déjà mentionné entre le puits 5 et les autres. Ainsi, on retrouve le retard dans la remontée et la pointe du 5 mai et le retard de deux jours de la baisse débutant le 17 mai. En même temps, on remarque que le retard de deux jours dans la baisse du 10-11 avril

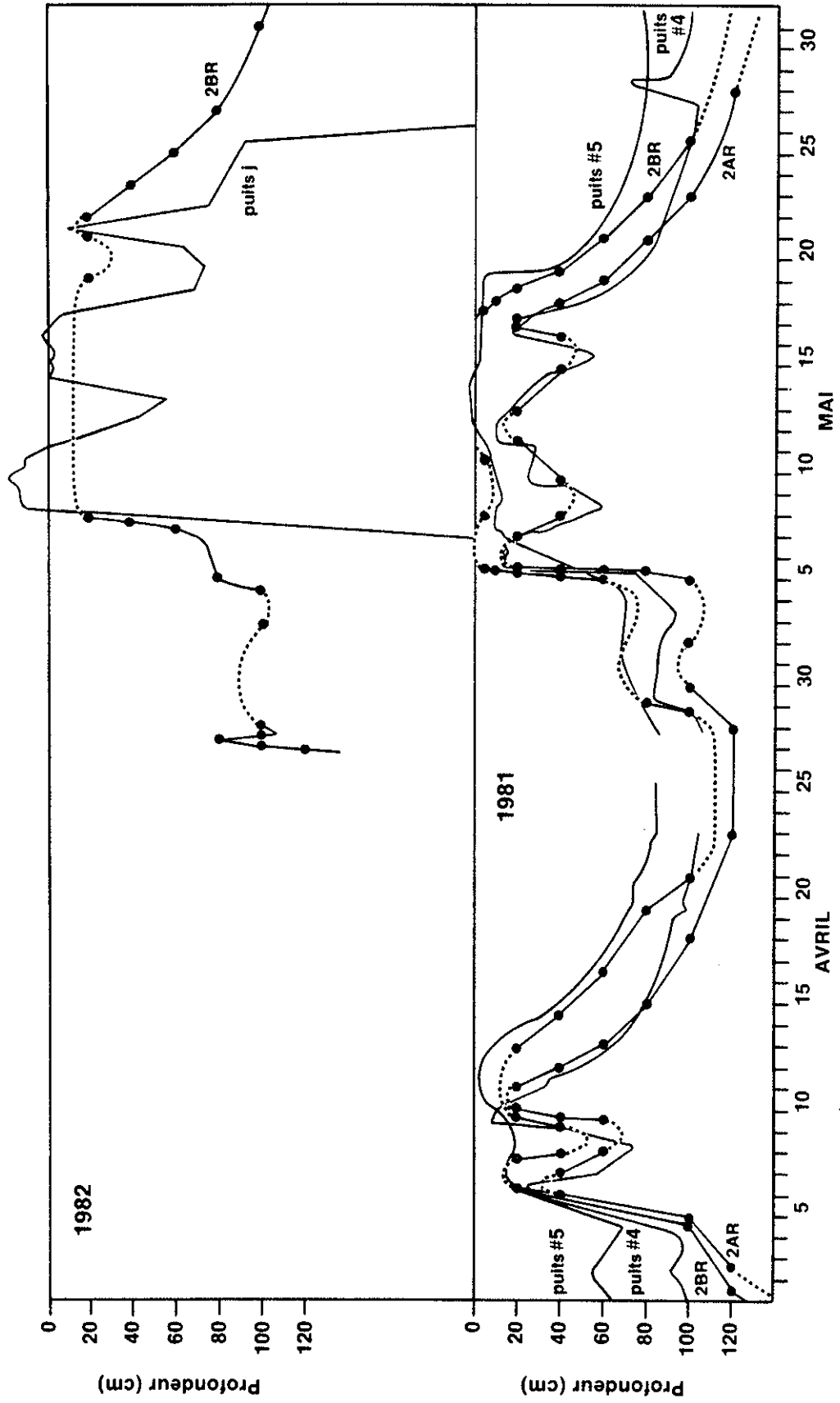


Figure 8 - Niveau d'eau dans les puits en bas de pente (1982).

au puits No 4 et au site 2AR est bien réel puisqu'il se retrouve également à 2BR. Il en est de même de l'absence d'un creux les 13, 14 et 15 mai. Cela semble indiquer que sur ces sites, des apports plus faibles suffisent à maintenir les niveaux d'eau élevés alors qu'ils sont insuffisants à 2AR et au puits No 4. A l'exclusion de quelques exceptions, le niveau d'eau à 2BR correspond bien à celui du puits No 5 entre les profondeurs 0 à 60 cm. Sous le niveau -60 cm, la nappe descend beaucoup plus vite et plus bas à 2BR qu'au puits No 5. Ces différences marquées, à partir d'un niveau précis, pourraient résulter de changements verticaux de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement des matériaux aux sites 2AR et 2BR.

3.2.2 La fonte de 1982.

En 1982, les puits sont beaucoup plus profonds, soit entre -250 cm et moins de -350 cm. La fonte de 1982 contraste avec celle de l'année précédente (figures 9, 10 et 11). En avril 1982, les niveaux d'eau sont très bas et ne réagissent que tardivement après le début de la fonte. Ce n'est qu'après des apports en eau de 150 mm que les niveaux dans les puits atteignent des valeurs comparables à celles prévalant durant la fonte de 1981.

Le 1er avril, les niveaux dans les puits A, C et V sont respectivement à -82 cm et inférieurs à -250 cm et à -275 en 1982, alors qu'ils étaient à -46, -92 et -65 cm en 1981. Cela laisse supposer que le terrain était plus humide le 1er avril en 1981 qu'en 1982. On peut aussi comparer les lectures de résistance à 2BR vers le 31 mars et le 1er avril en 1981 et en 1982. C'est à -40 et -60 cm que les différences sont les plus marquées (environ $10^{4.6} \Omega$ en 1982 contre $10^{4.35}$ et $10^{4.4} \Omega$ en 1981. A -20 et -80 cm, les résistances sont aussi plus élevées en 1982 qu'en 1981, alors qu'à -100

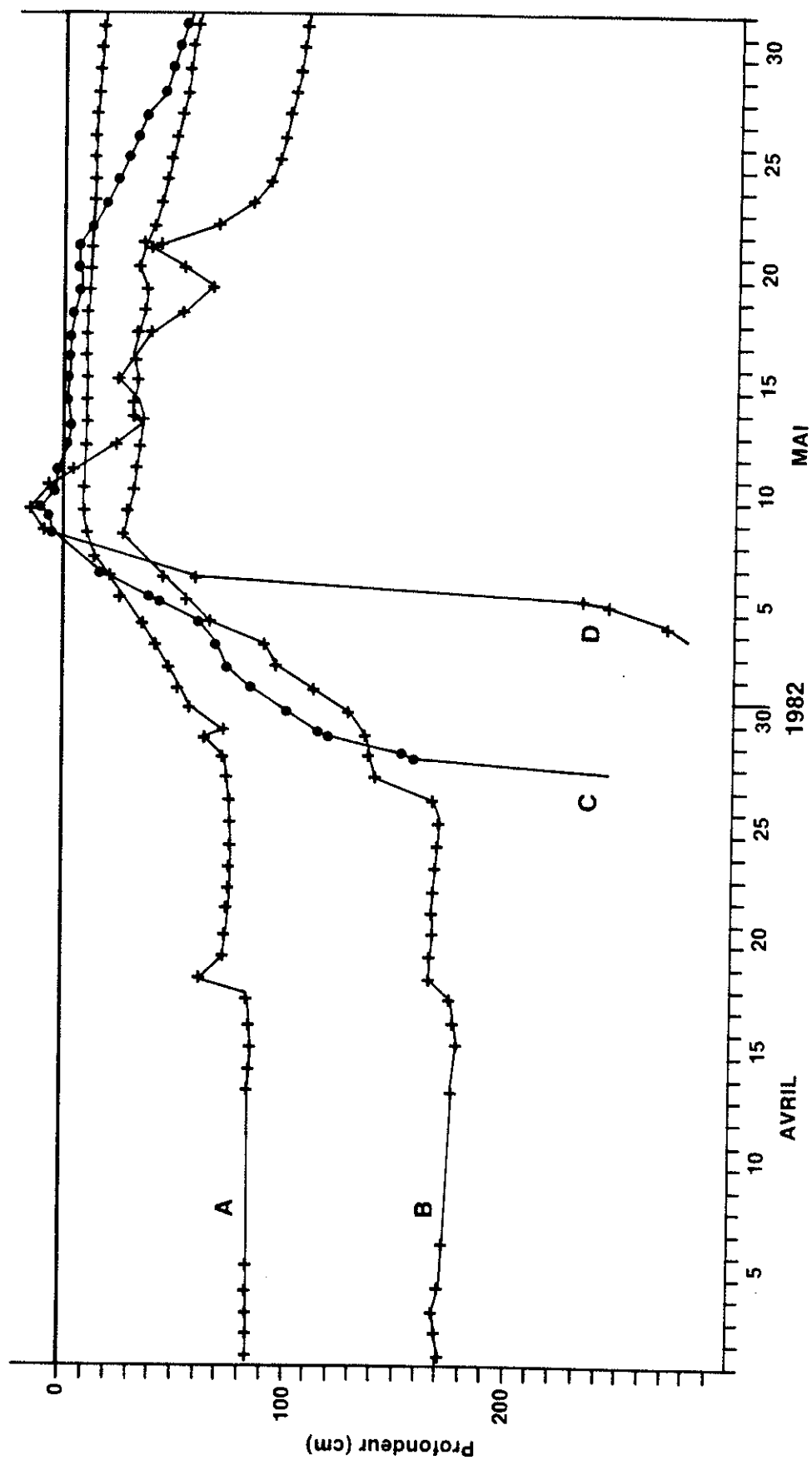


Figure 9 - Niveau d'eau dans les puits E, F, G et T (1982).

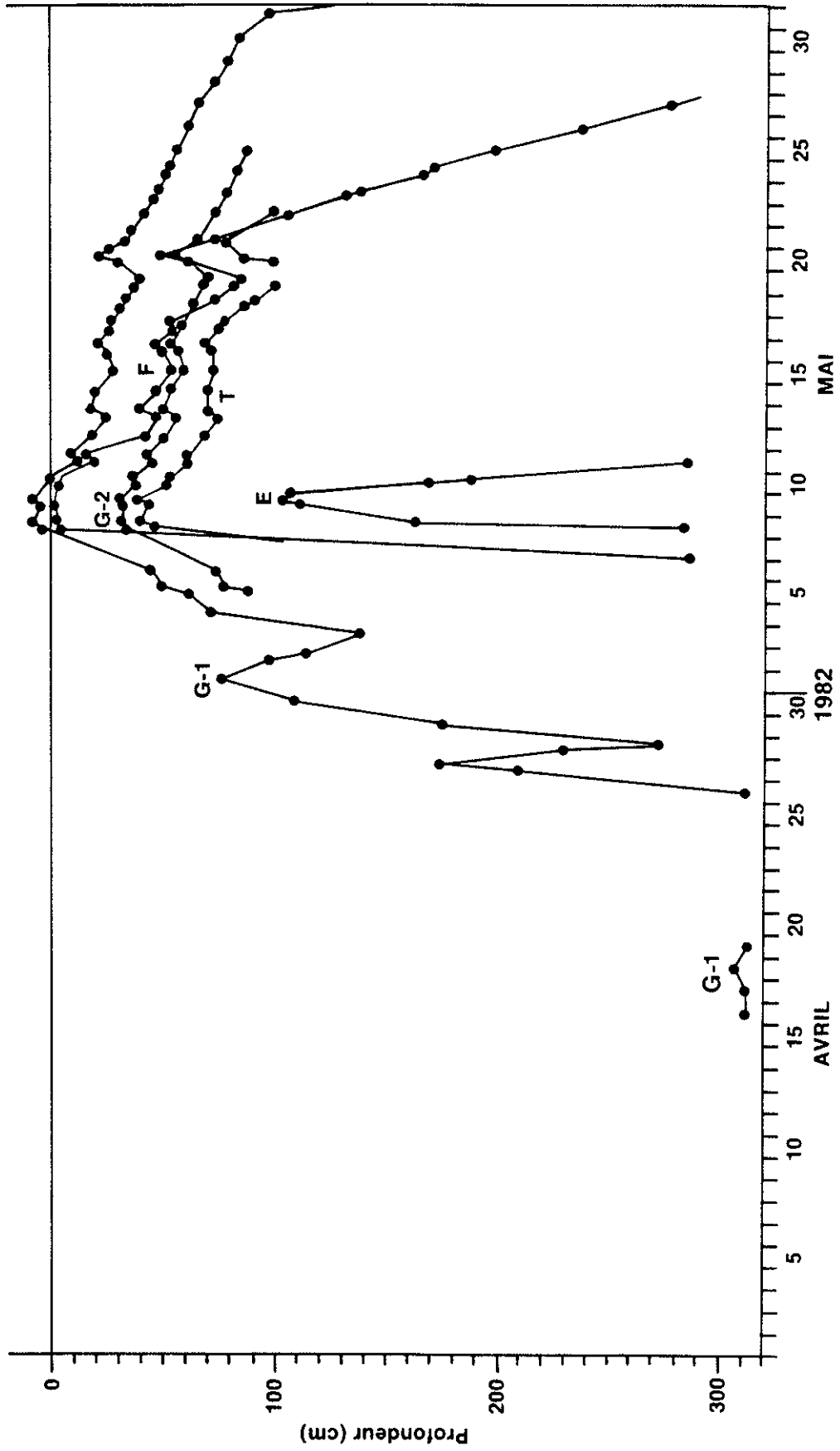


Figure 10 - Niveau d'eau dans les puits H, J et K (1982).

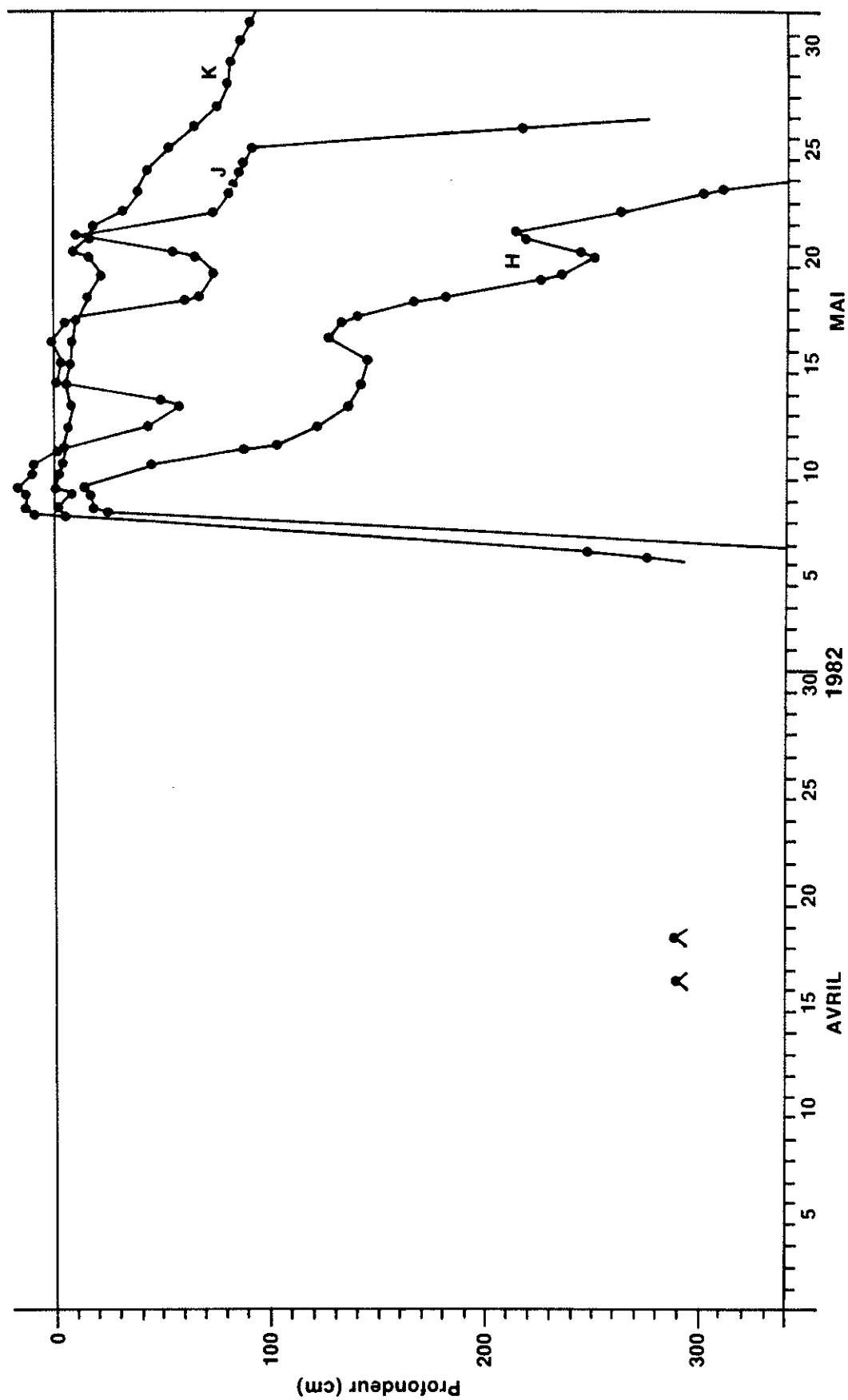


Figure 11 - Comparaison entre le niveau saturé indiqué par les blocs de résistance et ceux mesurés dans les puits voisins.

et -120 elles sont à peu près les mêmes.

Au début d'avril 1982, le niveau saturé n'est mesurable qu'à proximité du lac, soit dans les puits A et B. Si on exclut une fonte de 4 mm le 1er avril, les premiers apports en eau significatifs arrivent du 16 au 19 avril (43 mm). Aux puits A et B, les niveaux réagissent avec une pointe le 18, en même temps que celle des apports en eau. Le 16, la nappe rejoint le fond du puits G-1 à -312 cm et marque également une légère pointe le 18 avril à -308 pour ensuite redescendre sous la base du puits.

La nouvelle vague de fonte du 25 au 30 avril provoque la remontée du niveau d'eau dans le puits C aussi situé en bas de pente et dans le puits G-1. La nappe rejoint le fond du puits C à -250 cm, le 27 avril, puis continue de remonter jusqu'à son niveau maximum pour la saison, à 10 cm au-dessus du sol, le 9 mai. Les plus faibles apports en eau du 28 avril au 2 mai ne provoquent qu'un ralentissement du taux de remontée visible par une inflexion dans la courbe. Au puits G-1, la remontée de la nappe est interrompue par les apports en eau plus faibles (4,7 mm), le 28 avril. Elle remonte ensuite du 28 avril au 1er mai pour des apports de 4,9 et 8,4 mm les 29 et 30 avril. Les faibles apports des 2 et 3 mai (2,2 et 2,7 mm), se répercutent par une autre baisse se terminant le 3 mai. Pendant ce temps, aux puits A et B le niveau remonte graduellement à partir du 25 avril pour atteindre un maximum, le 8 mai au puits B et le 9 au puits A.

Le 3 mai marque le début de la principale période de fonte durant laquelle les apports en eau totaliseront 230 mm (3 au 15 mai). Au cours de cette période, le niveau de la nappe rejoindra les puits D, E, F, T, H, J et K encore secs jusque là. Dans tous les puits le niveau maximum

est atteint le 8 ou 9 mai, en même temps que la pointe d'apports en eau (7-8-9 mai). On remarque qu'au puits E, le niveau d'eau n'est mesurable qu'à proximité de la pointe du 9 mai, soit du 8 au 11 mai. Une pointe secondaire s'observe aussi dans la plupart des puits le 20 ou 21 mai, suite aux averses de 6,4 et 10,8 mm les 19 et 20 mai. Par la suite s'amorce la baisse générale des niveaux d'eau. Celle-ci est toutefois nettement plus lente dans les trois puits situés en bas de pente.

Donc, en 1982, on observe un contraste entre deux groupes de puits: les puits A, B et C en bas de pente et les autres, sur le versant. En bas de pente, les niveaux sont plus élevés et semblent remonter plus tôt au début de la fonte. A la fin, ils redescendent plus tard et plus lentement que les autres. Sur le versant, les niveaux d'eau accusent une remontée importante seulement au début de mai et redescendent rapidement à la fin de la fonte. Seuls les puits G-1, K et D semblent faire exception. Au puits G-1, le niveau remonte plus tôt et redescend plus lentement alors qu'à D et K, la descente est aussi plus lente qu'à E, F, H, J et T.

Si on isole les trois puits en bas de pente A, B et C, ainsi que le premier puits sur le versant D, on constate, en avril et mai, que l'importance de la remontée et de la baisse des niveaux de saturation décroît avec la proximité du lac. Ainsi, du début avril jusqu'à la pointe des 8-9 mai, on a une remontée maximale de 72 cm en A, 150 cm en B, supérieure à 256 cm en C, et supérieure à 294 cm en D. De même, du 8 au 31 mai, la baisse est de 8 cm en A, 32 cm en B, 65 cm en C et 113 cm en D.

3.3 Informations fournies par la tranchée d'interception.

La tranchée d'interception a été conçue afin de capter les

écoulements parallèles à la pente à trois niveaux dans le sol, soit de 0 à -20 cm, de -20 à -60 cm et de -60 à -120 cm. Ce dispositif a été en fonction durant toute la fonte de 1982 et une partie de celle de 1981. En général, des écoulements parallèles à la pente n'ont été observés que lorsque la zone saturée du sol remontait au niveau de la tranchée.

3.3.1 Relation entre les débits à la tranchée et le niveau d'eau dans un puits voisin.

Un puits d'observation voisin de la tranchée a permis de mettre en relation le niveau saturé du sol et les écoulements à la tranchée (figure 13). En 1981 et 1982, on constate que les écoulements aux niveaux inférieur, intermédiaire et supérieur débutent lorsque le niveau d'eau, dans le puits T, dépasse respectivement les cotes de -90, -70 et -55 cm.

Les débits enregistrés à chacun des niveaux augmentent avec le niveau saturé et les pointes de débit coïncident avec les maximums des niveaux d'eau. Un niveau maximum (-50 à -40 cm) correspond aux débits totaux de l'ordre de 6000 à 8000 l/j. Un graphe mettant en rapport, pour chacune des deux années, le débit journalier avec le niveau d'eau dans le puits, montre une relation d'allure exponentielle (figure 14). Le niveau du puits étant mesuré une ou deux fois par jour seulement, il n'est pas toujours représentatif du niveau moyen de la journée, ce qui pourrait expliquer certaines valeurs extrêmes plus éloignées de la courbe. La relation entre l'écoulement journalier pour l'ensemble de la tranchée et le niveau d'eau dans le puits T est à peu près la même en 1981 et 1982. Cependant, entre 1981 et 1982, la relation entre les écoulements du niveau inférieur et ceux du niveau intermédiaire, change radicalement. Alors que durant les écoulements de pointe de 1981, le débit du niveau intermédiaire est supérieur à celui

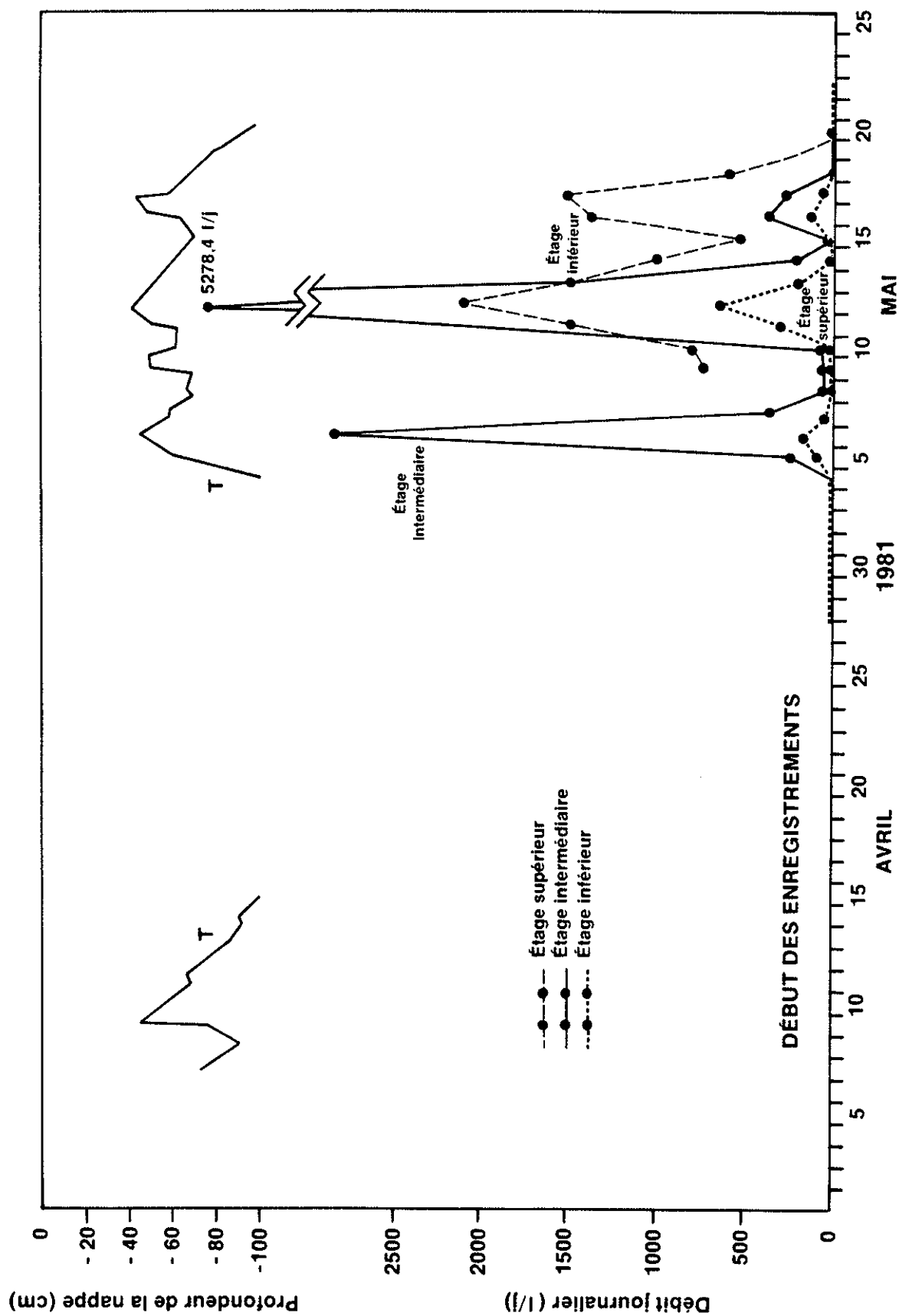


Figure 12 - Ecoulement journalier à chacun des étages de la tranchée d'interception et profondeur du niveau d'eau dans le puits T (1981).

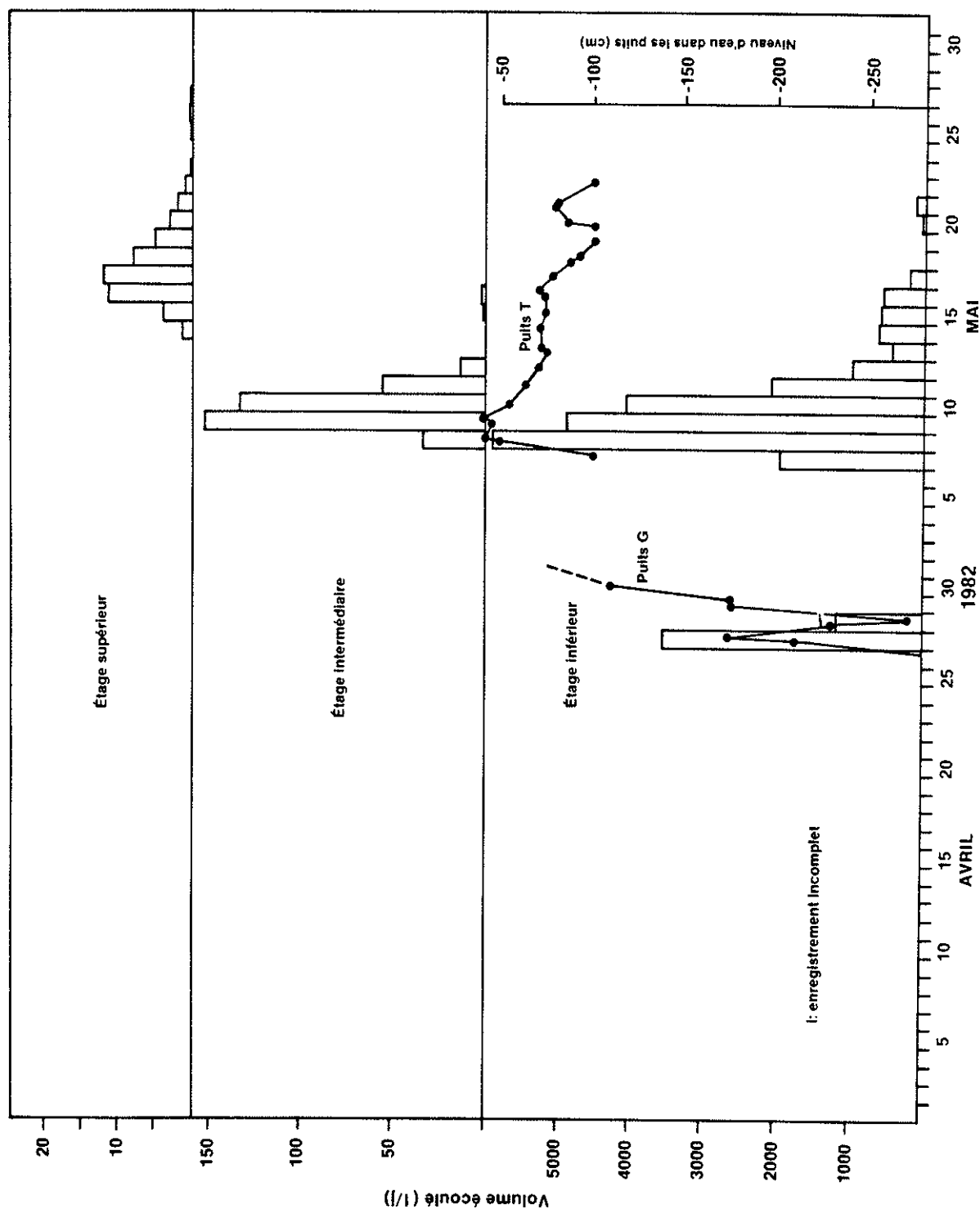


Figure 13 - Ecoulement journalier à chacun des étages de la tranchée d'interception et profondeur du niveau d'eau dans les puits G et T (1982).

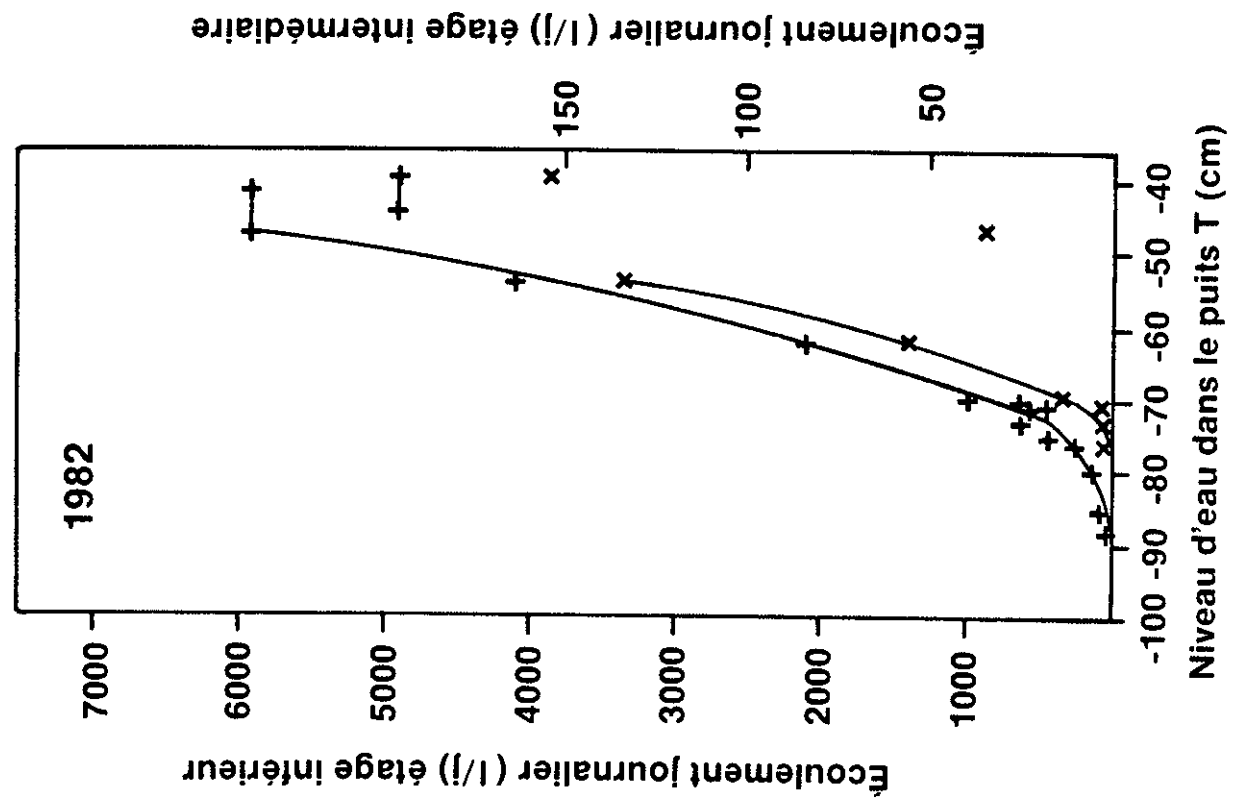
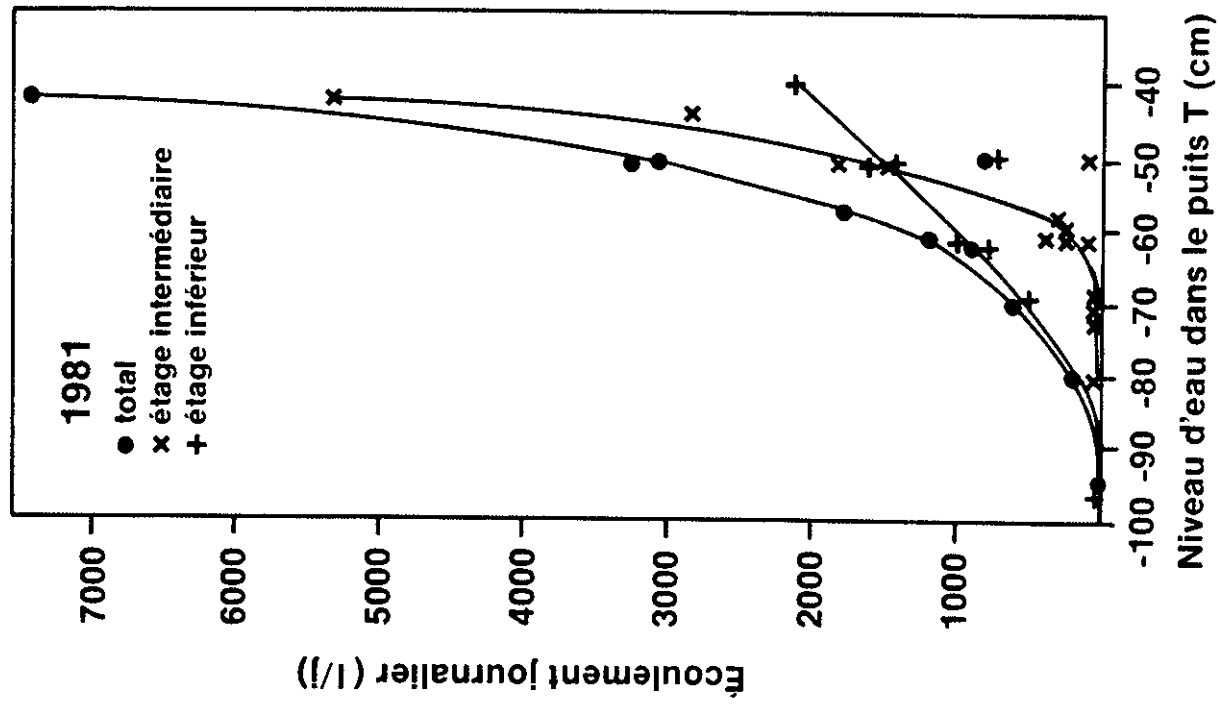


Figure 14 - Relation entre le niveau d'eau au puits T et l'écoulement à la tranchée d'interception.

du niveau inférieur, en 1982, pour des niveaux saturés équivalents, le niveau inférieur reçoit plus de 95% du débit. Bien que pour les deux années l'eau commence à s'écouler au niveau intermédiaire pour la même hauteur d'eau dans le puits, en 1982 le débit journalier n'y dépasse pas 155 l/j. Cela pourrait résulter, soit de fuites dans la structure d'interception déversant l'écoulement du niveau intermédiaire dans le niveau inférieur, soit d'un colmatage partiel des pores réduisant leur perméabilité (effet du gel).

3.3.2 Ecoulements du niveau supérieur.

Les apports du niveau supérieur (0 à -20 cm) paraissent quantitativement négligeables quant on les compare à ceux de l'ensemble de la tranchée. En 1981, ils représentent moins de 6% de l'écoulement total et moins de 0,2% en 1982. En 1981, les débits maximums y sont observés lorsque le niveau d'eau dépasse la cote approximative de -55 cm. Les débits journaliers atteignent alors plus de 60 l/j. Ils dépassent même 650 l/j le 12 mai, alors que dans le puits, le niveau saturé est à -42 cm. Cette année-là, on a aussi observé des écoulements au niveau supérieur lorsque la zone saturée était très basse. Ces écoulements sont alors générés par un écoulement hypodermique matriciel mais demeurent quantitativement négligeables (0,5 à 16 l/j et 90.1 litres en tout).

En 1982, aucun écoulement n'a été mesuré au niveau supérieur avant le 14 mai même si dans le puits T, l'eau remonte à -40 cm les 8 et 9 mai. Les écoulements débutent le 14 mai, alors que le sol est en bonne partie dégagé par la neige. Ils atteignent un maximum les 16 et 17 mai avec respectivement 11,6 et 12,3 l/j, puis diminuent graduellement jusqu'à

0,1 l/j le 24 mai. En tout, ils ne totalisent que 49,5 litres, soit à peine 4% du volume de sol du niveau supérieur de la tranchée. La pointe de l'écoulement, les 16 et 17 mai, ne correspond ni à un niveau élevé de la nappe ni à des apports en eau, aucune averse n'étant tombée ces jours-là et la neige ayant fini de fondre. Aussi il semble plausible d'attribuer ces écoulements au relâchement d'eau gelée emmagasinée dans la couche supérieure de la tranchée d'interception, au fur et à mesure du dégel du sol.

3.4 Informations fournies par le drain hypodermique.

3.4.1 L'écoulement hypodermique en conduits, considérations théoriques.

La formation de conduits naturels dans les matériaux non consolidés (piping) est un phénomène connu et rapporté depuis longtemps. Cela intéressa d'abord les ingénieurs, compte tenu des problèmes d'érosion et de déstabilisation des sols qui y sont souvent associés (Terzaghi, 1936; Fletcher et al., 1954). Ce n'est que plus récemment que les hydrologues et géomorphologues se sont intéressés à l'aspect hydrologique de la question, l'écoulement en conduit (pipe flow) (Whipkey, 1965, 1969; Jones, 1971; Whipkey et Kirkby, 1978). Jusqu'à présent, des réseaux de conduits naturels dans les sols ont été rapportés tant aux Etats-Unis, en Angleterre qu'en Pologne, en Nouvelle-Zélande, en Australie, en Turquie, en Chine, en Afrique du sud, au Soudan ou en Tanzanie, sous des climats aussi bien semi-arides qu'humides, en milieux agricole ou naturel et dans des sols sablonneux ou fins.

Les conduits proviendraient de l'aménagement et de l'interconnection

de vides naturels du sol, soit des trous d'animaux, des cavités de racines mortes, des fissures de dessiccation et simplement des vides texturaux dans les matériaux grossiers (Whipky, 1965, 1969; Whipkey et Kirkby, 1978). Ils pourraient aussi se former par érosion au contact de deux couches de perméabilités différentes (Fletcher et al., 1954; Jones, 1971). Ils se situent généralement dans la zone peu profonde du sol, au sommet d'une couche présentant une perméabilité bien inférieure à celle de matériaux sus-jacents (Fletcher et al., 1954; Jones, 1971; Whipkey et Kirkby, 1978). Dans les podzols, cela coïncide souvent avec le contact entre la matière organique et le loam sableux sous-jacent (Jones, 1971). Selon Whipkey et Kirkby (1978), dans les milieux forestiers humides, les épais dépôts organiques s'accumulant au sol, forment souvent des ponts au-dessus des plus petits ruisseaux, les forçant à circuler sous la surface du sol sur une grande partie de leur cours.

L'existence de ces réseaux de conduits confère à la zone supérieure du sol une perméabilité accrue. En fait, elle se compose de deux perméabilités distinctes: une perméabilité matricielle et une perméabilité de conduits (Whipkey, 1965, 1969). En situation non-saturée, seule la perméabilité matricielle intervient. Par contre, si la matrice du sol est saturée, l'eau peut envahir les conduits et s'y écouler de façon turbulente. La turbulence de l'écoulement lui permet d'éroder les parois de conduits, de les agrandir et éventuellement d'en réorganiser et hiérarchiser le réseau (Whipkey et Kirkby, 1978).

Donc, lorsque la zone supérieure du sol se sature, soit par des apports excédant l'infiltrabilité d'une couche sous-jacente, soit par remontée de la nappe, des conduits superficiels pourraient permettre un écoulement hypodermique rapide et causer une réponse hydrologique hâtive

et brusque aux précipitations (Jones, 1971; Whipkey et Kirkby, 1978). Les eaux empruntant les conduits parviendraient rapidement au réseau hydrographique. Par conséquent, si le milieu et le temps de transit de l'eau sur le versant a une influence déterminante sur son évolution qualitative, la présence de ce mode d'écoulement pourrait avoir des conséquences sur la qualité chimique des lacs et cours d'eau. Ainsi, dans certains bassins, les réseaux de conduits hypodermiques constitueraient un élément stable mais occulte du système hydrographique, dont la distribution et le comportement hydrologique sont encore mal compris et difficilement quantifiables.

3.4.2 Ecoulement au drain hypodermique: résultats et interprétation.

3.4.2.1 Dispositif de mesure.

Telle que conçue, la tranchée d'interception est apte à recueillir les écoulements matriciels mais pas d'éventuels écoulements en conduits. Le remplissage de chacun des niveaux de la tranchée avec le matériel d'origine a sans doute effacé toute présence d'éventuels conduits pré-existants. Durant la fonte de 1981, certaines observations nous ont laissés croire à la présence de ce type d'écoulement à faible profondeur dans le sol.

Aussi, avant la fonte de 1982, un drain agricole long de 30 m a été installé perpendiculairement à la pente directement sur la paroi amont d'un fossé d'une vingtaine de centimètres de profondeur. Une feuille de polyéthylène ferme le drain de toute part, sauf sur la face de contact direct avec la lèvres amont du fossé. Une légère pente permet à l'eau interceptée de s'écouler vers une extrémité du drain où elle alimente un débitmètre à auget basculant. Celui-ci, semblable à ceux installés au lysimètre et à la tranchée d'interception, pouvait mesurer des débits de 0,015 à 10 l/min.

3.4.2.2 Ecoulements captés.

Les premiers écoulements mesurés au drain débutent le 16 avril alors que la plupart des puits sont secs (tableau 1). Les débits sont d'abord faibles, soit de 0 à 75 l/j. Les écoulements se produisent uniquement lorsque les apports en eau dépassent 3 mm/j, soit les 16, 17, 18, 21, 25 et 26 avril. Le 27 avril, le débitmètre, qui avait déjà subi des pannes de quelques heures les 17, 18 et 21 avril, cesse de fonctionner définitivement et à compter du 28 avril, seuls des débits instantanés seront mesurés manuellement de deux à six fois par jour, généralement entre 9h00 et 16h00. Cette période ne représentant qu'une faible fraction de la journée, il n'est plus possible, après le 26 avril, d'estimer l'écoulement journalier total. On note, dès le 28 avril, des débits instantanés supérieurs à 10 l/min atteignant même plus de 190 l/min, les 8 et 9 mai. A partir du 22 mai, on n'observe plus aucun écoulement issu de ce drain.

3.4.2.3 Circonstances favorables à l'existence d'écoulement hypodermique en conduits.

Dans l'ensemble, on constate que les écoulements au drain hypodermique se produisent quand l'une et/ou l'autre des circonstances suivantes se rencontre(nt) : des apports en eau supérieurs à 3 mm/j et des niveaux d'eau très élevés dans les puits. Les plus forts débits correspondent aux jours où la zone saturée est la plus haute et atteint ou approche la surface du sol en plusieurs endroits sur le versant et au cours desquels les apports en eau sont les plus forts (du 6 au 10 mai ainsi que le 20 mai). Lorsque le niveau saturé est très bas et les apports en eau importants, les débits sont très faibles (≤ 75 l/j ou $\leq 0,15$ l/h avant le 27 avril), alors que lorsque les apports en eau cessent mais que la zone saturée est encore

Tableau 1 - Ecoulements au drain hypodermique (1982)

Partie A : Ecoulements journaliers avant le 28 avril 1982.

<u>Date</u>	<u>Ecoulement cumulé (l/j)</u>	<u>Remarque</u>
31 mars 1982	0	Début des enregistrements
1er avril	0	
2 "	0	
3 "	0	
4 "	0	
5 "	0	
6 "	0	
7 "	0	
8 "	0	
9 "	0	
10 "	0	
11 "	0	
12 "	0	
13 "	0	
14 "	0	
15 "	0	
16 "	3	Début des écoulements
17 "	12	
18 "	7	
19 "	0	
20 "	0	
21 "	0	Enregistrements incomplets
22 "	0	
23 "	0	
24 "	0	
25 "	26	
26 "	75	
27 "	5	Panne définitive du débitmètre au début de la journée

Tableau 1 - Ecoulements au drain hypodermique (1982).

Partie B : Débits instantanés mesurés à compter du 28 avril 1982.

<u>Date</u>	<u>Heure</u>	<u>Débit (l/min)</u>	<u>Date</u>	<u>Heure</u>	<u>Débit (l/min)</u>
28 avril	10h40	16,9	8 mai	10h00	150,0
	15h45	11,8		10h00	150,0
29 "	9h30	3,3		13h30	192,86
	11h30	2,61		14h30	150,00
	12h30	2,6		15h45	192,86
	14h15	2,2	9 "	9h15	168,75
30 "	12h00	1,94		13h30	192,86
	15h00	2,0		15h00	192,86
1er mai	14h00	5,3	10 "	9h30	67,5
	16h00	4,5		12h00	48,22
2 "	8h45	1,22		13h00	61,36
	13h30	0,76	11 "	8h30	22,5
	14h30	0,77		11h00	20,77
3 "	13h00	0,32		13h45	22,5
	14h30	0,61		15h30	27,0
	15h30	0,86	12 "	9h00	13,24
4 "	9h15	16,9		11h15	11,25
	10h15	16,9		15h30	10,89
	11h00	16,35	13 "	8h30	10,0
5 "	9h45	33,8		9h00	10,56
	10h45	31,69		11h00	10,35
	13h15	33,8		13h00	12,62
	15h45	50,7		14h00	16,88
6 "	9h00	56,33	14 "	9h00	18,11
	9h30	50,0		10h00	11,95
	11h00	45,0		11h00	11,95
	12h00	45,0		13h00	11,95
	13h00	50,0		16h00	20,45
	14h30	67,50	15 "	8h30	10,8
7 "	9h30	90,0		9h00	11,07
	12h30	112,5		10h00	10,14
				11h00	10,14
				11h30	10,38
				12h30	10,38

Tableau 1 - Ecoulements au drain hypodermique (1982).

Partie B : Débits instantanés mesurés à compter du 28 avril 1982 (suite).

<u>Date</u>	<u>Heure</u>	<u>Débit (l/min)</u>
16 mai	8h30	12,27
"	10h00	7,71
	17h00	13,5
17 "	9h30	19,85
	12h00	18,24
	14h30	18,24
18 "	10h30	8,45
	16h30	8,89
19 "	9h30	4,83
	12h00	4,59
	13h00	4,59
	15h30	5,23
20 "	8h30	30,0
	9h00	30,0
	10h00	32,14
	16h00	71,05
21 "	9h30	15,0
	10h00	14,91
	11h00	13,5
	14h00	11,6
22 "	12h00	0,75
	15h15	0,48

Pas d'écoulement après le 22 mai.

haute dans le sol, soit les 16, 17, 18, 19 et 21 mai, les débits mesurés sont plus importants, soit entre 5 et 20 l/min.

Les écoulements mesurés au drain pourraient être produits par deux types de mécanismes. Quand la nappe ne rejoint pas le niveau supérieur du sol, le réseau de conduits naturels serait alimenté par les excès des apports en eau sur l'infiltrabilité du sol. Le gel des premiers centimètres du sol pourrait contribuer à réduire cette infiltrabilité et à favoriser ce type d'écoulement au printemps, bien qu'il puisse aussi se produire durant l'été (des écoulements substantiels au drain ont été observés notamment à la mi-juin 1983, à la fin d'un orage violent mais bref, alors que les puits sur le versant étaient tous secs. Lorsque la nappe est haute et rejoint le niveau supérieur du sol, le réseau de conduits naturels serait alimenté par la partie supérieure de la zone saturée, elle-même constituée principalement des apports en eau (pluie et fonte) locaux. Le réseau de conduits offrant une résistance moindre à l'écoulement que la matrice du sol environnant, il est à même de véhiculer de gros débits et d'absorber les apports en eau disponibles. Ce type de mécanisme d'alimentation prévaudrait surtout les 7, 8, 9, 10 et 20 mai. En 1982, alors que rien ne s'écoulait du niveau supérieur de la tranchée d'interception, les seuls écoulements latéraux observés au niveau supérieur du sol étaient ceux véhiculés par des conduits naturels.

3.4.2.4 Provenance des écoulements mesurés.

A la fin de la fonte, les observations sur le terrain ont permis de constater que l'essentiel du débit mesuré dans le drain provenait d'un seul petit cours d'eau souterrain situé à son extrémité amont et partiellement capté par celui-ci. Le cours d'eau souterrain de faible profondeur de ce

ruisseau a pu être partiellement repéré en suivant son gargouillement souvent audible, ainsi que les zones visiblement les plus humides du sol (mousse plus épaisse). Par endroit, ce ruisseau s'écoule à la surface avant de réemprunter la voie souterraine à quelques mètres plus loin. A la lumière de ces observations, il nous semble préférable d'abandonner l'usage du drain pour le remplacer par un dispositif de jaugeage installé directement sur ce petit ruisseau. De plus, un ensemble de puits d'observation pourrait être installé à proximité afin d'étudier les relations entre les écoulements de ce ruisseau souterrain et le niveau saturé dans le sol.

4. CONCLUSION.

L'analyse des données journalières des fontes de 1981 et 1982 permet de mieux comprendre le cheminement de l'eau de fonte sur le versant. Nous avons d'abord constaté que les écoulements matriciels non-saturés n'y jouent qu'un rôle négligeable. Les eaux libérées par la fonte auxquelles s'ajoutent occasionnellement celles de la pluie, s'achemineraient vers le lac selon deux voies préférentielles, d'une part un écoulement matriciel saturé (écoulement de la nappe) et d'autre part un écoulement turbulent de conduits à faible profondeur.

Au début de la fonte, les apports en eau qui s'infiltrèrent dans le sol comblent d'abord les déficits en eau jusqu'à la capacité au champ de la zone saturée. Comme durant la fonte, on considère que l'évapotranspiration à partir du sol est négligeable, on peut supposer que ce tribut n'est prélevé qu'une seule fois au début de la fonte. Toute infiltration supplémentaire s'acheminerait alors par drainage vers la zone saturée. Là, rejoignant la nappe, elle s'écoulerait selon les gradients hydrauliques prévalants et la conductivité hydraulique du milieu en accord avec le modèle de Darcy.

D'autre part, lorsque les apports en eau au sol dépassent la capacité d'infiltration des premiers horizons du sol, une partie de l'eau s'acheminerait via un réseau de conduits naturels établis à partir de macropores. De même, durant les pointes de fonte alors que la nappe remonte jusqu'à la surface du sol en plusieurs endroits du versant, le sommet de la zone saturée alimenterait abondamment ces conduits.

Le rapport entre la quantité d'eau cheminant dans la nappe et celle

empruntant les conduits superficiels, dépendrait alors à la fois du taux d'apport en eau, de l'infiltrabilité du sol et du niveau de la nappe. Les apports en eau peuvent être estimés assez précisément en utilisant les résultats du lysimètre de fonte. Il en va de même du niveau saturé qu'on mesure dans les puits d'observation, bien que nous n'ayons pas encore réussi à en faire l'enregistrement continu. L'infiltrabilité du sol demeure, quant à elle, beaucoup plus difficile à évaluer. Il y a toutefois de fortes raisons de croire qu'au printemps, elle dépend grandement de la présence du gel dans le sol et de ses caractéristiques (température, épaisseur et perméabilité) et que celles-ci peuvent varier d'une année à l'autre et peut-être même au cours de la même saison.

Les conduits naturels semblent pouvoir acheminer rapidement l'eau disponible de la surface du sol jusqu'à la base des versants, lui laissant peu de temps de contact avec les minéraux du sol, contrairement aux eaux de la nappe qui séjournent beaucoup plus longtemps dans le sol. Les modalités du cheminement de l'eau auraient donc un impact environnemental non négligeable. Aussi, nous croyons qu'il serait judicieux d'orienter les futures observations vers les conditions d'écoulement dans les drains, ainsi que l'influence du gel dans le sol. D'ici là, l'analyse des données horaires de 1981 et 1982 devrait permettre de raffiner la compréhension du phénomène.

REFERENCES.

-
- Berry, L., 1970. Some erosional features due to piping and sub-surface wash with special reference to the Sudan. *Geografiska Annaler* 52A (2): 113-119.
- Fletcher, J.E., K. Harris, H.B. Peterson et V.N. Chandler, 1954. Piping. *Trans. Am. Geophys. Union*, 35, p. 258-262.
- Jones, A., 1971. Soil piping and stream channel initiation. *Water Resour. Res.*, 7(3): 602-610.
- Roberge, J. et A.P. Plamondon, 1982. Fonte de la neige et écoulement dans le sol au printemps, lac Laflamme, Forêt Montmorency, Québec. Rapport présenté à la Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Québec. 88 p.
- Terzaghi, K., 1936. Earth slips and subsidences from underground erosion. *Eng. News Rec.*, 107, p. 90-92.
- Whipkey, R.Z., 1965. Sub-surface stormflow from forested slopes. *Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 10e Année Bull., 2, p. 74-85.
- Whipkey, R.Z., 1969. Storm runoff from forested catchments by sub-surface routes. *Dans Floods and their computation*, *Int. Ass. Sci. Hydrol. Publ.* 85(2): 773-779.
- Whipkey, R.Z. et M.J. Kirkby, 1978. Flow within the soil. *Dans Hillslope Hydrology*, J. Wiley & Sons, M.J. Kirkby (ed.), p. 121-145.