

**EFFET DU GEL ET DÉGEL SUR LES PROPRIÉTÉS
HYDROLOGIQUES ET THERMIQUES DU SOL
ET DE DIFFÉRENTES COUVERTURES MORTES**

Mémoire présenté
comme exigence partielle
du grade de Maîtrise es sciences (M.Sc)

par
Miroslav CHUM

Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau
2800, Einstein, CP 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7

Août 1995

© Miroslav Chum, 1995

Résumé

Cette étude compare les propriétés physiques et hydrologiques des trois principales couvertures mortes (sphaigne, mousses hypnacées et le sol couvert par les débris végétaux) et elle évalue leur impact sur le dynamisme gel-dégel des sols forestiers du bassin du Lac Laflamme. Les caractéristiques physiques du couvert de neige (hauteur, équivalent en eau) et du type de gel du sol ont été mesurées de façon extensive au niveau du bassin. Les profils du sol thermiques (températures, flux de chaleurs verticaux) et les profils hydriques (teneur en eau liquide et totale, position de la nappe phréatique, capacité d'infiltration du sol) ont été évalués sur sept places-échantillons de façon intensive.

Les travaux de terrain ont été réalisés durant l'hiver et le printemps 1992-93 sur les versants du bassin du Lac Laflamme à la Station expérimentale de la Forêt Montmorency, située à 80 km au nord de la ville de Québec dans une sapinière laurentienne.

Les résultats de cette recherche ont montré que la sphaigne, les mousses hypnacées et le sol couvert par les débris végétaux sont des couvertures mortes ayant des propriétés thermiques, physiques et hydrologiques différentes. Pour les conditions météorologiques de la saison 1992-93, le gel de type compact, au printemps, est associé aux versants exposés au nord, aux couvertures mortes ayant une porosité et une épaisseur élevée (sphaigne) et aux endroits couverts par les jeunes peuplements denses. L'étude des profils thermiques du sol indique que la profondeur et les vitesses de propagation du gel sont différentes pour chaque type de couverture morte. La couverture morte dominée par la sphaigne montre une profondeur du front de gel faible (40 cm) et un avancement lent. Par contre, le sol couvert par les débris végétaux gèle rapidement et plus profondément dans tout le profil. Les conditions thermiques du sol gelé (température et gradient de température) et ses propriétés (conductivité thermique apparente, chaleur spécifique, densité, compositions des différentes couches du sol) ont une influence directe sur son bilan hydrique. La teneur en eau liquide, faible dans les couches du sol gelées, augmente rapidement lors de la fonte printanière. La teneur en glace est plus élevée dans la sphaigne (60 %), suivi par les mousses hypnacées (45 %) et le sol couvert par les débris (35 %). Par conséquent, ces trois couvertures mortes peuvent avoir un impact distinct sur le cycle dynamique du gel-dégel et sur la génération du ruissellement de surface durant la fonte printanière dans la forêt boréale.

Remerciements

Je désire remercier tout d'abord monsieur le professeur Jean Stein pour ses conseils et surtout pour sa disponibilité sans oublier son aide durant la phase expérimentale lors d'installation et visites fréquentes des dispositifs de mesure ainsi que pour la révision du texte et finalement pour son support financier pendant mes deux d'années d'étude. Mes remerciements vont aussi à: monsieur Don Gray de l'Université de Saskatchewan pour son aide lors de l'apprentissage et l'utilisation d'une sonde gamma ainsi que pour ses suggestions lors de la rédaction de la thèse; Denis Lévesque pour le développement des programmes du système d'acquisition automatique de données et préparation technique des unités de lecture des données; Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) pour la bourse octroyée. Cette étude a été rendu possible grâce aux subventions du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), du Fond pour la Formation de Chercheurs et de l'Aide à la Recherche (FCAR) équipe et centre et du Programme de Recherche sur le Climat de l'Institut Canadien pour les Études sur le Climat.

Table des matières

RÉSUMÉ.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SYMBOLES ET SIGLES.....	xi
1. INTRODUCTION	1
2. AIRE EXPÉRIMENTALE.....	9
3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	12
3.1 PRISES DES MESURES EXTENSIVES	12
3.2 PRISE DES MESURES INTENSIVES	15
3.2.1 <i>Sites de mesure</i>	15
3.2.1.1 Site DEBR	15
3.2.1.2 Site HYP.....	17
3.2.1.3 Site SPH.....	18
3.2.2 <i>Paramètres observés</i>	19
3.2.2.1 Mesure de la teneur en eau totale	19
3.2.2.2 Mesure de la teneur en eau liquide et calcul de la teneur en glace	22
3.2.2.3 Mesure des températures du sol, de la neige et de l'air	25
3.2.2.4 Mesure du flux de chaleur	25
3.2.2.5 Mesure de la position de la nappe phréatique	26
3.2.2.6 Mesure de la capacité d'infiltration du sol	26
3.2.2.7 Évaluation de la conductivité thermique apparente.....	27
4. RÉSULTATS ET DISCUSSION	28
4.1 PATRON CLIMATIQUE DE L'HIVER 1992-93.....	28
4.1.1 <i>Températures de l'air</i>	28
4.1.2 <i>Mise en place et évolution du couvert neigeux</i>	31

4.1.3 Évolution temporelle et spatiale du gel associée aux couvertures mortes.....	34
4.2 TEMPÉRATURES ET FLUX DE CHALEUR DU SOL.....	39
4.2.1 Évolution générale	39
4.2.2 Site DEBR.....	41
4.2.3 Site HYP.....	45
4.2.4 Site SPH.....	45
4.3 PROFIL HYDRIQUE DU SOL ET DE LA COUVERTURE MORTE; TENEUR EN EAU LIQUIDE ET TOTALE, POSITION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE.....	46
4.3.1 Site DEBR.....	46
4.3.2 Site HYP.....	49
4.3.3 Site SPH.....	51
4.4 CAPACITÉ D'INFILTRATION DU SOL.....	51
4.5 COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS HYDROLOGIQUES ET THERMIQUES DES COUVERTURES MORTES ...	54
4.6 VOLET DE MODÉLISATION.....	62
5. CONCLUSION.....	69
6. BIBLIOGRAPHIE.....	72
7. ANNEXES.....	76
ANNEXE 1. CÉDULE DE PRISE DE MESURES POUR LA PÉRIODE D'ÉTUDE 1992-93.	77
ANNEXE 2. PROFILS VERTICAUX DU SOL POUR LES TROIS PRINCIPALES COUVERTURES MORTES.	81
ANNEXE 3. CARTE SCHÉMATIQUE DES SITES HYP ET SPH.....	83
ANNEXE 4. PLAN DU SYSTÈME D'ALIMENTATION EN CONTINUE DES INFILTROMÈTRES.	85
ANNEXE 5. ACCUMULATION DE LA NEIGE SUR CHAQUE SOUS-SITE.	87
ANNEXE 6. TEMPÉRATURES DU SOL À 10 ET 20 CM DE PROFONDEUR À LA STATION CLIMATOLOGIQUE DE LA FORÊT MONTMORENCY POUR LES MOIS D'OCTOBRE À DÉCEMBRE 1992.	89
ANNEXE 7. TYPE DE GEL; MOYENNES ET ÉCART-TYPES.....	91
ANNEXE 8. NIVEAU DE LA NAPPE PHRÉATIQUE, TEMPÉRATURES ET TENEURS EN EAU LIQUIDE ET TOTALE À 10 CM ET 20 CM DE PROFONDEUR POUR CHAQUE COUVERTURE MORTE.	93
ANNEXE 9. NIVEAU DE LA NAPPE PHRÉATIQUE, TEMPÉRATURES ET TENEURS EN EAU LIQUIDE ET TOTALE À 10 CM ET 20 CM DE PROFONDEUR POUR CHAQUE SOUS-SITE.....	97
ANNEXE 10. TEMPÉRATURES DU SOL SUR CHAQUE SOUS-SITE POUR L'HIVER 1992-93.	105
ANNEXE 11. FLUX DE CHALEURS SUR CHAQUE SOUS-SITE POUR L'HIVER 1992-93.....	112
ANNEXE 12. TENEUR EN EAU LIQUIDE SUR CHAQUE SOUS-SITE POUR L'HIVER 1992-93.....	119
ANNEXE 13. POSITION DE LA NAPPE PHRÉATIQUE POUR L'HIVER 1992-93.....	126
ANNEXE 14. TENEUR EN GLACE DU SOL SUR CHAQUE SOUS-SITE POUR L'HIVER 1992-93.....	128

ANNEXE 15. DOCUMENTATION PHOTOGRAPHIQUE. 135

Liste des tableaux

Tableau I.	Paramètres de la neige et du sol observés au niveau de tout le bassin lors d'inventaires périodiques durant l'hiver 1992-93.	14
Tableau II.	Paramètres hydrologiques et thermiques du sol, de la neige et de l'air observés sur chaque sous-site d'une façon intensive.	17
Tableau III.	L'inventaire complet des appareils et instruments des sites SPH, HYP et DEBR.	18
Tableau IV.	Évolution de la hauteur, équivalent en eau et densité du couvert de neige selon exposition et élévation.	33
Tableau V.	Températures journalières moyennes (durant périodes significatives) du sol aux différentes profondeurs durant l'hiver 1992-93 sur chaque sous-site	43
Tableau VI.	Flux de chaleur du sol journaliers moyens (durant périodes significatives) aux différentes profondeurs durant l'hiver 1992-93 sur chaque sous-site.	44
Tableau VII.	Changement de la teneur en eau liquide du sol minérale entre la température de 0°C et -0,5°C sur le site DEBR.	48
Tableau VIII	Caractéristiques du sol.	65
Tableau IX	Comparaison de la teneur en eau calculée et mesurée sur différents sous-sites.	66

Liste des figures

Figure 1.	Courbes des taux d'infiltration dans les sols gelés.....	4
Figure 2.	Différents patrons de génération de l'écoulement latéral de surface en milieu forestier selon les conditions d'infiltration prévalant près de la surface du sol et selon la position de la nappe phréatique.....	5
Figure 3.	Localisation de la Station expérimentale de la Forêt Montmorency.....	10
Figure 4.	Localisation des sites d'étude intensifs et des points de mesure des paramètres quantitatifs de la neige sur la carte topographique du bassin versant du Lac Laflamme.....	13
Figure 5.	Localisation des lignes de suivi du type de gel sur le bassin versant du Lac Laflamme.....	13
Figure 6.	Plan schématique du site d'étude dominé par la sphaigne.....	16
Figure 7.	Coupe vertical d'un sous-site typique.....	20
Figure 8.	Dispositif de mesure utilisé pour l'évaluation de la teneur en eau totale par la sonde gamma.....	21
Figure 9.	Évolution de la température de l'air sur le site DEBR ainsi que la précipitation à la station climatologique de la Forêt Montmorency.....	29
Figure 10.	Évolution de l'accumulation, la densité et l'équivalent en eau de la couverture neigeuse sur le bassin évalués à partir des carottes de neige.....	32
Figure 11.	Profils thermiques de la neige enregistrés lors de périodes typiques au site SPH à 6 heures du matin (hiver 1992-93).....	35
Figure 12.	Évolution temporelle du gel de sol selon le type de couverture morte, le couvert forestier et l'exposition (1 = gel très poreux, 5 = gel compact).....	37

Figure 13.	Évolution temporelle des températures sur le sous-site DY aux profondeurs 11, 19, 34, 44 et 54 cm.	40
Figure 14.	Évolution temporelle des flux de chaleurs sur le sous-site DY aux profondeurs 7, 17 et 30 cm.	42
Figure 15.	Évolution temporelle de la teneur en eau liquide du sol sur le sous-site DY aux profondeurs 11, 19, 34 et 44 cm.	47
Figure 16.	Évolution temporelle de la teneur en glace du sol sur le sous-site DY aux profondeurs 11, 19, 34 et 44 cm.	50
Figure 17.	Capacité d'infiltration du sol mesurée durant l'hiver 1992-93 sur infiltromètre #3 (DEBR) et #6 (SPH).	53
Figure 18.	Comparaison des températures de différentes profondeurs du sol sur les sites DEBR, HYP et SPH pour les périodes typiques durant l'hiver 1992-93.	56
Figure 19.	Températures moyennes journalières enregistrées à 30 cm de profondeur sur les sites DEBR, HYP et SPH durant l'hiver 1992-93. ...	57
Figure 20.	Évolution temporelle de la conductivité thermique du sol pour les trois principales couvertures mortes durant la période d'accumulation (hiver 1992-93).	60
Figure 21.	Relation entre la teneur en eau liquide du sol et sa température mesurée durant l'hiver 1992-93.	64
Figure 22.	Relation entre la conductivité thermique de différentes couvertures mortes et la température du sol.	67

Liste des symboles et sigles

ψ_e	potentiel du sol [m]
ψ_{es}	potentiel du sol pour la densité de 1,3 g/cm ³ [J/kg]
ρ_b	densité [g/cm ³]
σ_g	déviatoin standard [mm]
Δ_0	changement de la quantité d'eau (en mm) par rapport à la date de calibration pour une couche considérée (cette valeur est obtenue à l'aide du logiciel SCALERQ)
ΔT	différence de la température du sol entre deux profondeurs [°K]
Δx	distance (différence des profondeurs) [m]
θ_L	teneur en eau liquide [% ou mm d'eau par tranche de sol]
θ_{LC}	teneur en eau liquide du sol au moment de la calibration (sol dégelé) [% ou mm d'eau par tranche de sol]
θ_T	teneur en eau totale [% ou mm d'eau par tranche de sol]
θ_G	teneur en glace [% ou mm d'eau par tranche de sol]
A	coefficient de correction de la longueur de la trace
b	paramètre du sol [-]
B	coefficient de correction de la longueur de la tige de sonde TDR
c	concentration de sels dans l'eau [moles/kg]
EE	équivalent en eau [cm ou mm d'eau]
d_g	moyenne géométrique du diamètre des particules [mm]
D	densité de la neige [g/cm ³]
DEBR	site installé sur la couverture morte dominée par les débris végétaux, <i>débris végétaux</i>
g	accélération gravitationnelle [9,81 m/s ²]
H	hauteur de la neige [cm]
HYP	site installé sur la couverture morte dominée par les mousses hypnacées, <i>mousses hypnacées</i>
k	conductivité thermique apparente [W/m°K]
K	constante diélectrique apparente du sol
L_{et}	longueur de trace (lue sur l'appareil) [cm]
L_f	chaleur latente de l'eau [335 000 J/kg]

L_r	longueur de tige de sonde TDR [cm]
Q	flux de chaleur du sol [W/m^2]
R	constante universelle [8,3243 J/moles/ $^{\circ}K$]
SPH	site installé sur la couverture morte dominée par la sphaigne, <i>sphaigne</i>
T	température [$^{\circ}C$]
T_K	température [$^{\circ}K$]
TDR	méthode de mesure de la teneur en eau liquide par la technique de réflectométrie dans le domaine temporel

1. INTRODUCTION

Selon l'Encyclopédie du Canada (Stanké, 1987), la forêt boréale est l'écosystème le plus répandu du pays. Il occupe environ 40 % de la superficie du Canada. Près de 40 % de l'écoulement annuel se produit lors de la fonte printanière; les réserves en eau stockées dans le couvert neigeux sont donc une composante majeure du bilan hydrologique annuel. La connaissance du processus d'accumulation, d'évolution et du relâchement de cette eau est nécessaire pour pouvoir prédire la réponse du bassin versant aux conditions météorologiques.

Les résultats de travaux effectués, entre autres, au Québec (Stein *et al.*, 1986) ont mis en lumière l'importance de l'**emmagasinement des polluants acides** dans le couvert de neige. Un modèle de fonte quantitatif (SNOW-17) couplé avec un modèle simple conceptuel de la qualité de la fonte de neige a été utilisé pour les prédictions de la qualité et le volume d'écoulement. Le sous-modèle de qualité a été déduit d'un modèle conceptuel du lessivage progressif du manteau nival par les eaux de fonte. Ces auteurs ont démontré que l'identification et la quantification des paramètres de la neige (équivalent en eau, concentrations ioniques de l'eau de pluie, facteur de lessivage de neige) et les mécanismes de fonte et d'écoulement en période printanière sont nécessaires pour la compréhension du phénomène de choc acide. Le choc acide est fréquemment observé dans les écosystèmes forestiers et aquatiques des régions boréales. Pour les besoins de modélisation de la fonte et de l'écoulement à l'échelle du bassin, il est donc essentiel de déterminer les effets dynamiques du gel et dégel sur les propriétés hydrologiques et thermiques des différentes couvertures mortes.

Plusieurs recherches (Prévost *et al.*, 1989, Proulx, 1992, Roberge *et al.*, 1988, Sturm, 1992) ont été consacrées afin de mieux connaître les propriétés physiques (densité, équivalent en eau, hauteur, distribution spatiale), chimiques (accumulation des polluants) et thermiques (gradient de la température, transfert de chaleur par conduction et convection) de la **couverture neigeuse** en forêt boréale. Après les observations des flux de chaleur dans la neige d'une forêt boréale, Sturm (1992) conclut qu'à proximité des arbres conifériens les pertes d'énergie du sol dans la couverture neigeuse sont plus importantes.

L'importance des réserves en eau sous forme de neige ou de glace ont fait l'objet de nombreuses études (MacDonald, 1987). Pour l'ensemble du bassin versant du Lac Laflamme, Plamondon *et al.* (1984) présentent une étude des caractéristiques physiques du couvert de neige en relation avec l'altitude, l'exposition et le couvert forestier. Leur travaux ont permis de constater que l'équivalent en eau de la neige était maximal dans les milieux découverts et apparaissait plus important sous les jeunes peuplements que sous les vieux. Les jeunes sapinières, entourées d'arbres plus hauts, agissent comme des pièges à neige. L'influence de l'exposition ne ressort que durant la période de fonte, où elle est accélérée d'une semaine sur les pentes exposées au sud pour les années étudiées. Aux cours des hivers 1981 et 1982 la fonte de la neige en sous-bois dure un mois et demi en moyenne et est écourtée d'une à deux semaines dans les sites découverts. L'épaisseur, la densité et équivalent en eau maximaux ne sont pas liés à l'altitude dans le bassin du Lac Laflamme.

Prévost *et al.* (1989) ont caractérisé l'évolution des propriétés physiques du couvert de neige (hauteur, équivalent en eau, densité et température) ainsi que les profils thermiques et hydriques du sol durant trois saisons d'accumulation et de fonte. Ils ont confirmé les observations de Plamondon *et al.* (1984) quant à la dynamique d'accumulation et de fonte de la couverture neigeuse selon l'exposition des versants et l'élévation. Leur étude montre la grande différence spatiale de l'équivalent en eau de neige au sol entre le milieu boisé et les milieux découverts. Cette différence est attribuable à l'interception de la neige par les arbres et à la redistribution de la neige densifiée ayant séjourné sur les branches.

Sturm et Johnson (1991) ont observé dans la couverture neigeuse d'une région subarctique (Fairbanks, Alaska) la propagation de la chaleur par convection pour les années 1984-1987. Leurs résultats montrent que les gradients horizontaux de la température sont importants (jusqu'à 16°C/m). La convection, selon les auteurs, influence considérablement l'évolution et la grosseur des cristaux près de la surface du sol. Durant l'hiver, des zones froides et plus chaudes se développent dans la neige et restent relativement stables dans l'espace. Comme le manteau nival forme une interface isolante entre le sol et l'air, son influence sur le processus de formation et présence de la glace est majeure.

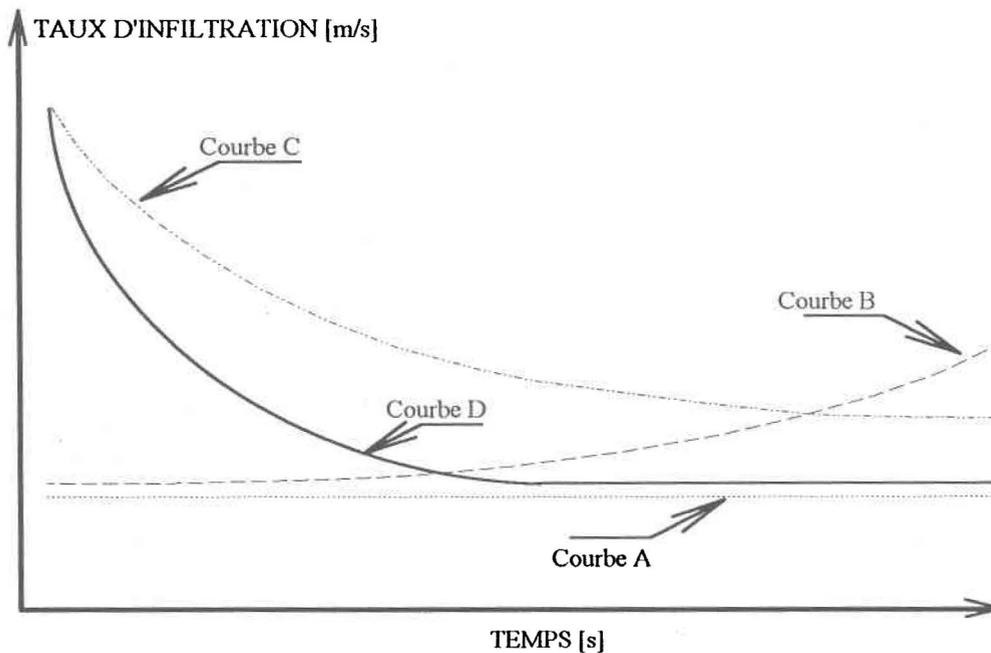
Au début des recherches d'études de processus effectuées sur le bassin versant du Lac Laflamme, le **gel et la présence de la glace** dans le sol forestier ont été

considérés comme des paramètres ayant des impacts négligeables sur le taux d'infiltration du sol (Roberge et Plamondon, 1987). Ce n'est qu'après la simulation des hydrogrammes à l'aide de modèles mathématiques (Prévost *et al.*, 1990, Barry *et al.*, 1990) que l'importance du gel a été reconnue. Les recherches à l'aide des modèles ont montré qu'une diminution de l'indice de l'infiltration du sol, durant la fonte printanière, améliore considérablement les hydrogrammes simulés. Depuis ces recherches, la dynamique d'accumulation et de fonte de la glace du sol est considérée comme un élément important pour la détermination des voies d'écoulement de l'eau de fonte. La figure 1 (Gray, 1972) montre les principaux patrons d'infiltrations qui peuvent se développer dans les sols gelés pour les différentes conditions de teneur en eau avant le gel.

Au niveau hydrologique, la **couverture morte** joue un rôle important dans la forêt. Elle protège le sol contre l'érosion et elle réagit aussi comme le milieu d'échange eau-air-sol-végétation. La litière en forêt réduit l'écoulement de surface et la suppression de la litière réduit le taux d'infiltration (Gray, 1972). En forêt non-perturbée, les canaux créés par des racines de végétaux et par d'autres activités biologiques favorisent généralement l'infiltration. Du point de vue hydrologique, le type (Stein *et al.*, 1994), l'épaisseur, la densité, la quantité de glace et les différentes caractéristiques physiques et hydrologiques de la couverture morte peuvent influencer la quantité d'eau qui se rend aux horizons sous-jacents ou qui s'écoule latéralement sur la surface (figure 2).

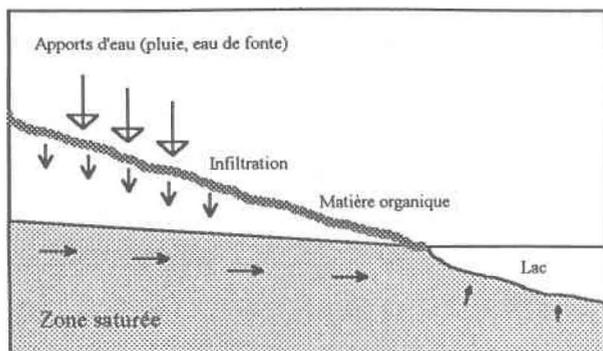
Stein et Proulx (1994) ont comparé le type de gel et la teneur en glace des différents types de couverture morte sur le bassin versant du Lac Laflamme. Ils distinguent trois principaux types de couvertures mortes: le sol couvert par les débris végétaux (DEBR), par les mousses hypnacées (HYP) et par la sphaigne (SPH). Les résultats d'inventaires effectués à l'échelle du bassin montrent que le gel de type compact est présent et que ce type de gel est associé aux couvertures mortes dominées par la sphaigne et par les mousses hypnacées.

En forêt boréale, les **voies d'écoulement** d'eau durant la période d'accumulation et de fonte des neiges, sont déterminées par un des quatre principaux patrons fixés par la capacité d'infiltration du sol (figure 2). En conditions estivales la capacité d'infiltration élevée des sols forestiers permet rarement l'écoulement latéral dans les horizons supérieurs du sol.



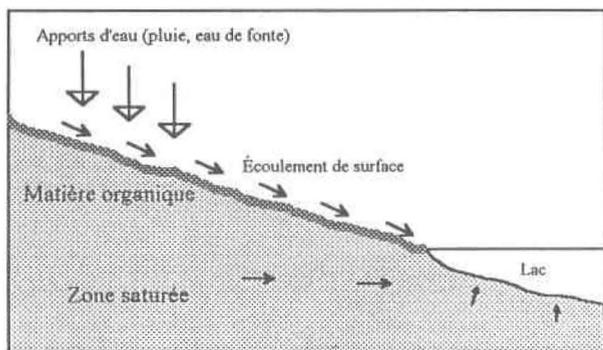
- Courbe A:** Le sol a gelé en condition saturée ou une couche de glace compacte se développe en surface durant la fonte. Taux d'infiltration est très faible et le ruissellement est élevé.
- Courbe B:** Le sol a gelé en teneur en eau élevée. Une partie de l'eau pénètre dans le sol. Au fur et à la mesure que le sol se réchauffe et que la fonte de glace avance, le taux d'infiltration croît progressivement.
- Couche C:** Le sol a gelé à une faible teneur en eau et sa température, durant la fonte, est près du point congélation. Seulement les petits pores sont remplis par la glace. Ils dégèlent rapidement avec le mouvement de l'eau. Sa courbe d'infiltration ressemble beaucoup à un sol dégelé, mais les taux sont plus faibles.
- Couche D:** Le sol a gelé à une faible teneur en eau et sa température, au moment où les apports d'eau se produisent, est au-dessous du point de congélation. L'eau qui pénètre dans le sol gèle dans les pores et l'infiltration est arrêtée.

Figure 1. Courbes des taux d'infiltration dans les sols gelés



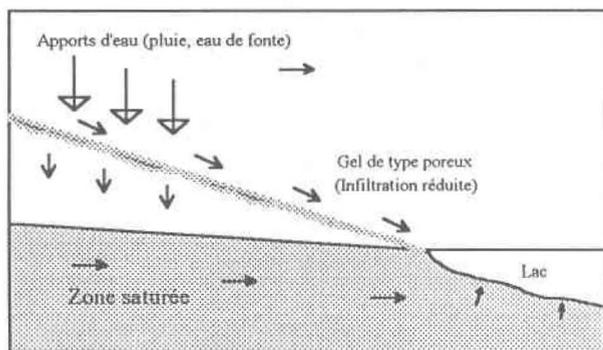
CONDITIONS NORMALES

⇒ capacité d'infiltration du sol > apports d'eau à la surface
 ⇒ nappe phréatique est relativement profonde
 100% de l'eau traverse des couches organiques et la zone non saturée de la matière minérale jusqu'à la nappe phréatique. Ce type de écoulement est généralement observé dans les sols forestiers.



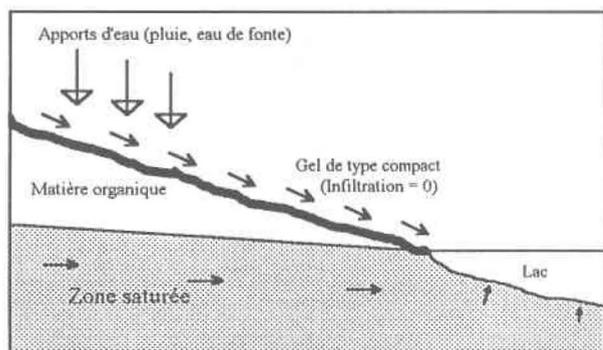
ÉCOULEMENT DE SURFACE EN ZONE SATURÉE

⇒ capacité d'infiltration du sol > apports d'eau à la surface
 ⇒ nappe phréatique atteint la surface du sol
 Une partie de l'eau s'écoule sur la surface. En général, ce type d'écoulement est observé près de cours d'eau ou de lacs. Durant la fonte, à l'interface de la matière organique et du sol minéral, l'écoulement turbulent peut se produire.



ÉCOULEMENT HORTONIEN (PARTIEL)

⇒ capacité d'infiltration du sol < apports d'eau à la surface
 ⇒ nappe phréatique est relativement profonde
 La réduction de la capacité d'infiltration (par le gel de type poreux, par exemple) a comme effet qu'un pourcentage de l'eau s'infiltré et l'autre est conduit sur ou près de la surface vers le réseau hydrographique.



ÉCOULEMENT HORTONIEN (TOTAL)

⇒ capacité d'infiltration du sol = 0
 ⇒ nappe phréatique est relativement profonde
 Le gel de type compact, présent dans la couche organique, peut être responsable de telles conditions. L'eau s'écoule sur la surface du sol. Cette situation a été observée localement durant la fonte.

Figure 2. Différents patrons de génération de l'écoulement latéral de surface en milieu forestier selon les conditions d'infiltration prévalant près de la surface du sol et selon la position de la nappe phréatique.

Donc, ce type d'écoulement ne constitue pas une composante importante des débits de pointe. Afin de déterminer les voies d'écoulement durant la fonte de neige 1988, Maulé et Stein (1990) ont utilisé l'oxygène 18 et la silice comme traceur naturel. Selon leurs travaux une proportion importante (de 41% à 53%) de l'eau n'a pas été en contact avec le sol minéral. Le mouvement d'eau, sur la surface du sol ou à travers le sol gelé est difficile à quantifier à cause de la complexité spatiale et temporaire du phénomène.

L'écoulement de l'eau de fonte a été analysé en place-échantillon sur un versant du bassin (Roberge et Plamondon, 1987). La présence d'un réseau d'écoulement turbulent à l'interface de la matière organique et du sol minéral a été reliée à la montée libre de la nappe phréatique (patron II, figure 1). Les auteurs suggèrent cependant que le comportement hydrologique devrait également être étudié à l'échelle du bassin.

À date, nous ne possédons que très peu des données quantitatives sur le **taux d'infiltration** dans les sols gelés forestiers (Kane et Stein, 1983a, b). La quantité, la forme et les dimensions des pores libres de glace constituent des paramètres fondamentaux qui déterminent le taux d'infiltration dans les sols gelés. Il est donc évident que la teneur en eau du sol au moment du gel est un facteur important. Les conditions hydriques et thermiques prévalant dans les couches superficielles du sol durant l'hiver déterminent, lors de la fonte, la capacité d'infiltration du sol (Kane et Stein, 1984). Ces auteurs ont observé des taux d'infiltration faibles dans les sols silteux ayant une teneur en eau totale modéré (15-30 %); de plus des taux plus élevés ont été observés sur les parcelles relativement sèches (12% et moins de teneur en eau totale). De plus, ils constatent que les hautes teneur en eau à la surface du sol, provenant de pluies automnales ou de gelées hivernales, sont favorables à l'apparition de gel compact, principalement à l'interface des couches organique et minérale.

Les courbes représentant le taux d'infiltration dans les sol forestiers gelés peuvent adopter quatre formes distinctes, selon les conditions au moment du gel ou du dégel (figure 1). Du fait que le taux d'infiltration dans le sol gelé peut varier selon plusieurs patrons, il est jusqu'à un certain point irréaliste de faire de prédiction de la quantité et des voies d'écoulement basés uniquement sur des épaisseurs de neige accumulée et des conditions climatiques. Tels estimés devraient être basés aussi sur

une connaissance des processus qui influencent la formation de la glace dans les couches supérieures du sol.

Sur le bassin versant du Lac Laflamme, des **simulations de l'écoulement** (Barry *et al.*, 1990, Prévost *et al.*, 1990) de l'eau de fonte, à l'aide de différents modèles hydrologiques utilisant l'approche physique, ont échoué sans ajustement des propriétés estivales du sol. Barry a évalué, au moyen d'un modèle hydrologique (HYFOR), la contribution de l'écoulement de surface et souterrain durant la période de fonte nivale. Les premiers résultats de simulations furent insatisfaisants. Les propriétés du sol évaluées en laboratoire ou mesurées en absence de gel sont différentes de celles dans les conditions naturelles. Pour tenir compte de la présence partielle du gel, la porosité, la capacité d'infiltration ainsi que la viscosité de l'eau ont été modifiées. Suite aux changements, les résultats des simulations ont été considérablement améliorés. Prévost *et al.* (1990) ont utilisé une version modifiée du modèle VSAS2 pour simuler l'écoulement lors de la fonte. L'indice de la capacité d'infiltration a été basé sur la proportion de sol libéré du couvert de neige. Cette partie de sol, considérée comme imperméable, a été évaluée à l'aide du modèle SNOW-17. Celui-ci avait été calibré précédemment, avec succès, pour les conditions printanières par Roberge *et al.* (1988).

Les plus récentes observation effectuées sur le bassin du Lac Laflamme (Stein *et al.*, 1994) montrent une certaine corrélation entre le type de couverture morte et le type de gel présent. En général, durant l'hiver 1989-90, le gel de type compact est associé aux couches organiques plus épaisses et moins dense (sphaigne). De plus, selon cette étude, la glace dans la matière organique durant la fonte n'est pas d'origine automnal mais résulte plutôt des événements météorologique hivernaux.

Donc, à partir des études précédentes, l'hypothèse émise est que la sphaigne, les mousses hypnacées et le sol couvert par les débris végétaux sont des types de couvertures mortes forestières ayant un impact différent sur la génération du ruissellement de surface durant la fonte printanière dans la forêt boréale.

Les objectifs de cette recherche ont été:

- analyser l'effet de trois types de couvertures mortes soit la sphaigne, les mousses hypnacées et le sol couvert par les débris végétaux sur le cycle gel-dégel;

- caractériser les effets des cycles gel-dégel sur les propriétés hydrologiques et thermiques du sol;
- établir les relations entre les conditions climatiques et la teneur en eau liquide et la quantité de la glace dans la couche organique et le sol minéral sous trois types de couvertures mortes.

2. AIRE EXPÉRIMENTALE

L'étude a été réalisée sur le bassin versant du Lac Laflamme de la Forêt Montmorency (47°N, 71°O), située à 80 km au nord de Québec (figure 3). D'une superficie de 68 ha dont 6 ha occupés par le lac, le bassin présente des pentes variant de 0 à 30% et des altitudes allant de 777 à 884 m. La précipitation annuelle est élevée (1400 mm) et plus du tiers tombe sous forme de neige. Les maxima d'accumulation de neige varient de 250 à 450 mm d'équivalent en eau et ils sont atteints entre la mi-mars et la mi-avril.

Le site d'étude est localisé dans le domaine climacique de la sapinière à bouleau blanc. Au point de vue forestier, le bassin versant est divisé en quatre secteurs¹:

- bande d'environ 150 m ceinturant le lac (sauf la partie ouest). Elle est composée à 80% de sapin baumier (*Abies balsamea* (L) Mill.) accompagné de bouleau blanc (*Betula papyrifera* Marsh.) et d'épinette blanche (*Picea glauca* Voss.). En moyenne, la hauteur des arbres se situe entre 7 et 12 m (âge de 50 ans);
- partie supérieure du versant exposée au sud. Elle est caractérisée par les épidémies graves et par les chablis. Les jeunes sapinières de 10 à 15 ans se sont établis sur les superficies dégradées;
- partie supérieure du versant exposée au nord. Dans cette partie, même si les chablis sont présents, ils sont moins graves que dans le secteur précédent. Les jeunes sapinières (10-15 ans) occupent environ 30% de la superficie;
- partie aval du bassin à proximité de la station climatologique. Cette partie est presque complètement déboisée. Les arbres qui s'y trouvent ont environ 10 -15 ans.

¹ Selon la carte forestière 21-M-6 S.E. (1:20 000) et la base de données du Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts mise à jour en 1990.

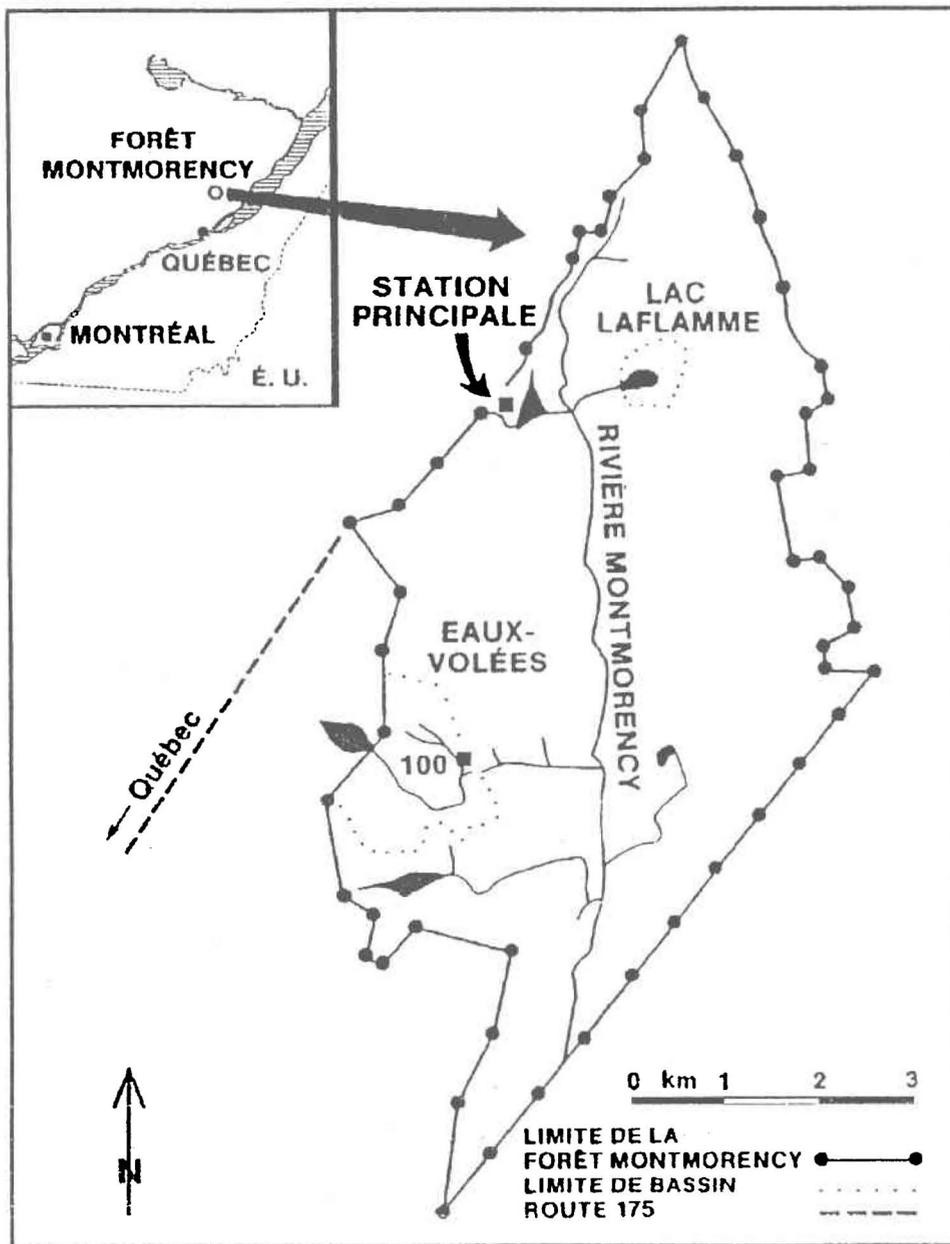


Figure 3. Localisation de la Station expérimentale de la Forêt Montmorency.

Un till sablonneux, épais de 0,5 m sur les sommets à environ 15 m sous le lac, recouvre le gneiss charnockitique formant le sous-sol du bassin. Une petite zone tourbeuse d'environ 1 ha occupe l'extrémité est du lac. Le sol est un podzol orthique constitué d'un mélange de sable et de gravier. L'épaisseur de la couverture morte varie de 7 cm à 20 cm.

Les premiers 50 cm du sol ont généralement une porosité totale élevée (60-70 %) (Barry *et al.*, 1988, 1990) et une conductivité hydraulique saturée très grande (20-60 cm/h). Plus en profondeur (50-100 cm), une couche compactée a une conductivité moins élevée (5-15 cm/h). La profondeur du gel du sol sur le bassin n'excède pas 40 à 50 cm.

Les données quotidiennes de température et de précipitations liquides et solides sont recueillies à la station météorologique No 24 qui est située près de l'exutoire du lac.

3. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les données ont été prises à deux niveaux: de façon intensive sur trois sites et extensive au niveau du bassin.

3.1 Prises des mesures extensives

Afin de distinguer la différence de configuration du terrain et l'exposition pour chaque partie du bassin, celui-ci est subdivisé en neuf sous-bassins appelés segments (figure 4). Les segments A, B, C et D sont exposés au sud, E et F sont orientés vers l'ouest tandis que G, H, et I font face au nord. L'évolution des **propriétés quantitatives** du couvert de neige (hauteur et équivalent en eau) à l'échelle du bassin versant a été suivie grâce au réseau de 19 sites de mesure (figure 4). Les sites de mesure ont été mis en place en 1985 par Prévost *et al.* (1989). On retrouve deux ou trois stations par segment, totalisant 19 stations d'échantillonnage.

L'évaluation de l'**équivalent en eau de couvert de neige** consiste à prélever des échantillons au moyen d'un carottier (Western Snow Conference Snow Sampler). Le tuyau est enfoncé verticalement à travers le couvert jusqu'à la surface du sol. Ensuite, le tube, avec l'échantillon de neige, est soigneusement sorti. La hauteur de neige est lue directement sur l'échelle du tube de carottier, l'équivalent en eau est évalué en pesant la neige prélevée. Tenant compte du type d'instrument, la précision de mesure de la hauteur du couvert est de 1 cm et également 1 cm d'eau pour l'équivalent en eau.

Étant facilement balayée par le vent, la neige s'accumule de façon très hétérogène. Afin de diminuer cet effet, deux prises ont été effectuées par site de mesure; au total: 38 prises sur le bassin (tableau I). Durant l'hiver, les paramètres quantitatifs de couverture neigeuse ont été évalués six fois dont quatre fois à partir du 21 mars jusqu'à la fin de fonte. À la fin de la période de fonte, lorsque le couvert de neige est mince et discontinu, le pourcentage du sol libéré par la neige est évalué visuellement. Les équivalents en eau et les densités sont calculés par la moyenne arithmétique parce que la distribution des stations tient compte de la proportion relative des peuplements (Plamondon *et al.*, 1984).

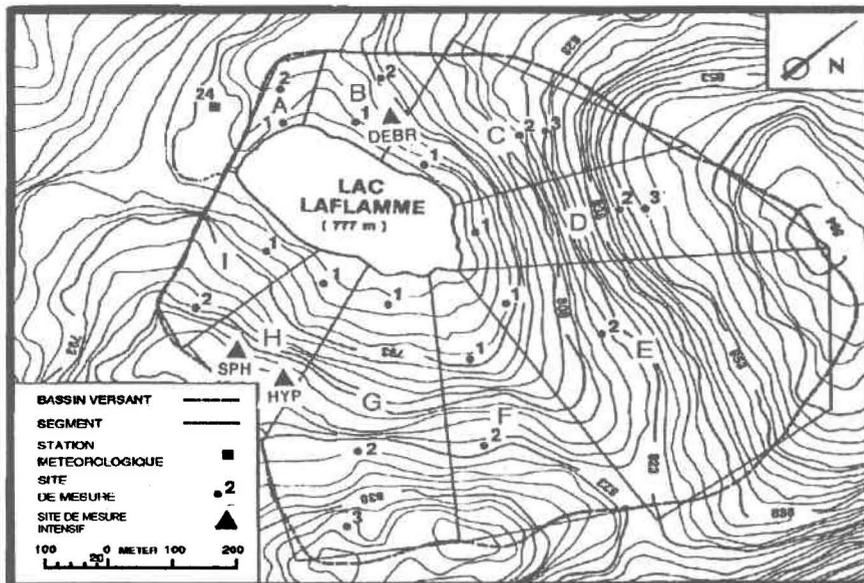


Figure 4. Localisation des sites d'étude intensifs et des points de mesure des paramètres quantitatifs et quantitatifs de la neige sur la carte topographique du bassin versant du Lac Laflamme.

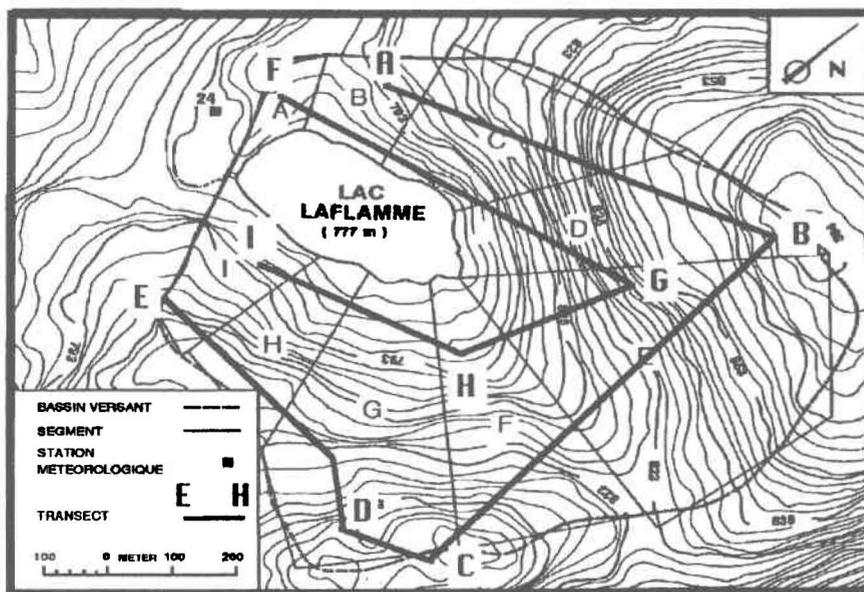


Figure 5. Localisation des lignes de suivi du type de gel sur le bassin versant du Lac Laflamme.

Tableau I. Paramètres de la neige et du sol observés au niveau de tout le bassin lors d'inventaires périodiques durant l'hiver 1992-93.

PARAMÈTRE	INSTRUMENT	NOMBRE DE POINTS DE MESURE
Type de gel	Tige 6 mm	66
Hauteur de la neige	Carottier	38
Équivalent en eau de neige	Carottier	38
Paramètres qualitatifs de la neige	Visuellement	environ 12

Les **paramètres qualitatifs du couvert de neige** ont été évalués occasionnellement, 5 fois durant l'hiver (11 janvier, 26 janvier, 8 mars, 21 mars et 5 avril). Les paramètres ont été observés à l'aide d'une tranchée en se servant d'une pelle. Lors de visites, la présence des couches de glace, la grosseur des cristaux et le degré de mûrissement du stock ont été notés. De plus, une attention particulière a été portée aux couches inférieures du couvert qui sont en contact direct avec la matière organique et sur la présence d'écoulement d'eau de surface, s'il y a lieu.

L'évolution du **type de gel**, présent dans la matière organique, a été suivie à l'aide de lignes (transects) qui ont été tracées dans les principaux axes du bassin (figure 5). Les transects ont été établis selon les travaux de Stein *et al.* (1994). Une tige en acier de 6 mm de diamètre et 110 cm de longueur a servi à la mesure du type de gel. Lors de l'évaluation, la tige est insérée à travers le couvert de neige (s'il y a lieu) jusqu'au sol. Selon la résistance à la pénétration, le type de gel de la couverture morte est classé dans cinq catégories. Par exemple, le type 1 représente le sol dans les conditions non gelées; le type 3 signifie le gel de type poreux et le type 5 est accordé au sol couvert par le gel de type compact ou par de la glace très résistante. Ce classement de type de gel dans cinq catégories a permis de faire les analyses statistiques. Il est cependant à noter que l'évaluation du type de gel peut varier selon l'observateur et par conséquence, elle peut devenir subjective.

3.2 Prise des mesures intensives

3.2.1 Sites de mesure

Étant donné que sur le bassin les trois principales couvertures mortes sont présentes soit la sphaigne, les mousses hypnacées et le sol couvert par les débris végétaux le même nombre de sites de mesure a été installé sur les versants du lac. Chaque site de mesure comporte soit deux (HYP, DEBR) ou trois sous-sites (SPH) (figure 6). Le nom de chaque sous-site comprend deux (2) lettres; la première lettre indique le type de la couverture morte et provient de la première lettre de celle-ci et la deuxième lettre a été choisie arbitrairement. Par exemple, par SE on indique le sous-site E localisé sur la couverture morte dominée par la sphaigne.

Sur chaque sous-site, les **paramètres physiques** (hauteur de la neige, profondeur de la nappe phréatique, teneur en eau liquide et total) et **thermiques** (flux de chaleur du sol, températures du sol) de la couverture morte et du sol ont été mesurés à l'aide des différents appareils (tableau II). Le système d'acquisition automatique des données (CR-10) a enregistré des mesures de l'ensemble des senseurs du 3 janvier 1992 au 16 juin 1993. Le tableau III montre l'inventaire complet des appareils et instruments des sites SPH, HYP et DEBR. La cédule de prise de mesures pour la saison 1992-93 est présentée à l'annexe 1.

3.2.1.1 Site DEBR

Le site DEBR (Débris) de mesure intensive a été installé dans le segment C (figure 4). La couverture morte de ce secteur est dominée par les débris végétaux. L'exposition vers le sud, la pente assez élevée (17 % en moyenne) et une capacité d'infiltration importante des couches minérales font que le milieu est généralement plus sec que le site SPH et HYP. Durant la période estivale la nappe phréatique descend fréquemment dans les profondeurs non mesurables (plus de 1 m) par les puits installés. L'effet du rayonnement direct atteignant le niveau du sol est supérieur aux deux autres sites et peut être attribuable à la pente favorable et aux ouvertures importantes dans le couvert forestier. Le nombre de sous-sites est deux (2), soit DU et DY. Les profils typiques des différentes couvertures mortes ainsi que la documentation photographique sont montrés à l'annexe 2 et 15 respectivement.

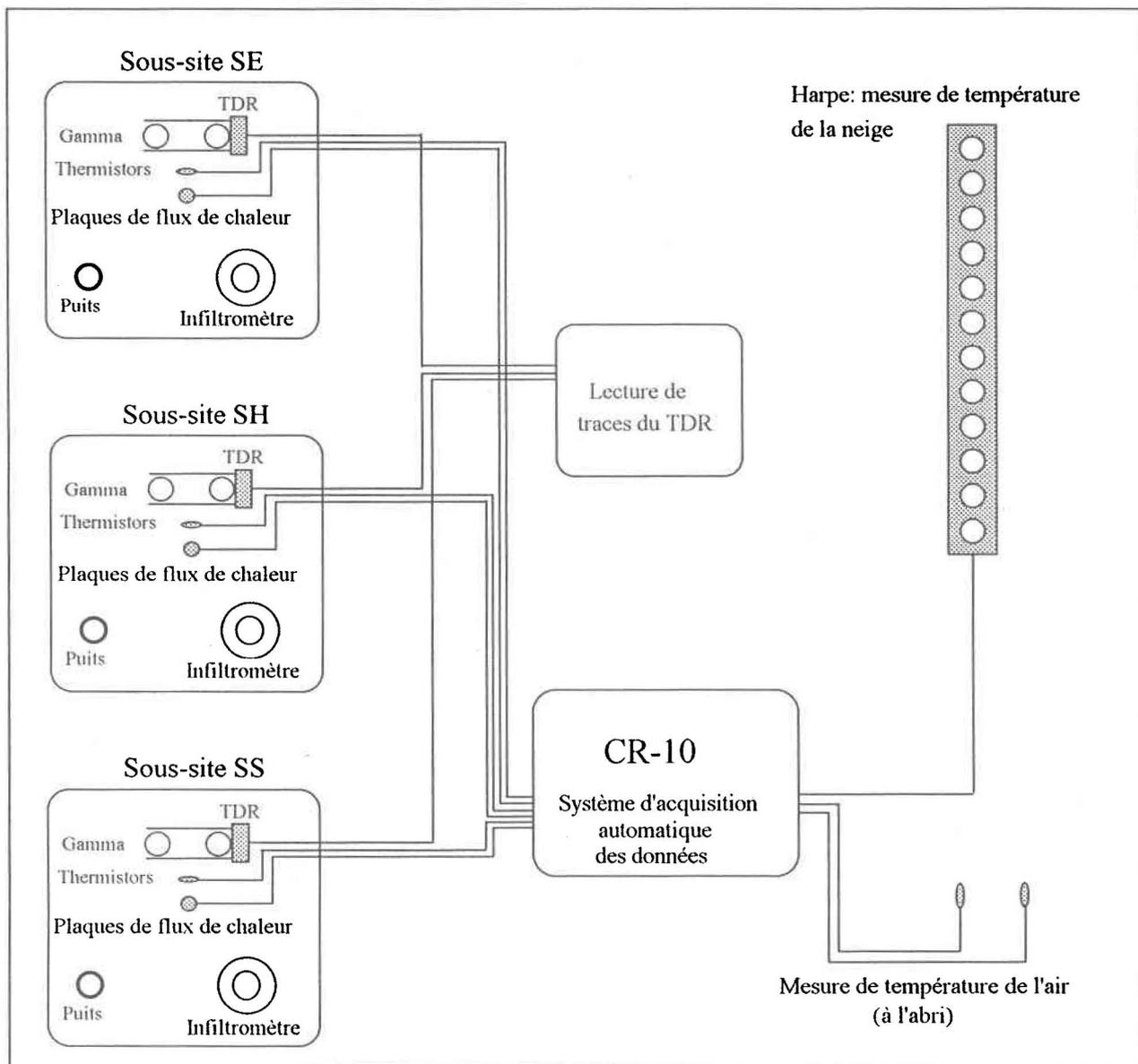


Figure 6. Plan schématique du site d'étude dominé par la sphaigne.

Tableau II. Paramètres hydrologiques et thermiques du sol, de la neige et de l'air observés sur chaque sous-site d'une façon intensive.

PARAMÈTRE	UNITÉ	PRÉCISION	INSTRUMENT	PROFONDEURS [cm]
Hauteur de la neige	cm	±1 cm	Règle sur le dispositif gamma	s.o.
Profondeur de la nappe phréatique	cm	±1 cm	Piézomètre	s.o.
Température du sol	°C	±0,1°C	Thermistor*	10, 15, 30, 45, 60
Flux de chaleur du sol	W/m ²	± 0,1 W/m ²	Plaque de flux de chaleur*	10, 15, 30
Teneur volumique en eau liquide	% (volume)	± 1%	Sonde TDR	10, 15, 30, 45, 60
Teneur volumique en eau totale	% (volume)	± 5%***	Sonde gamma	0 - 40 cm: à 2 cm 40 cm et plus: à 4 cm
Capacité d'infiltration	mm/min.	±0,2 mm/min.	Infiltromètre à double anneaux	s.o.
Température de l'air	°C	±0,1°C	Thermistor****	s.o.
Température de la neige**	°C	±0,1°C	Thermistor*	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 (hauteurs)

* Données enregistrées automatiquement par le CR-10

** Seulement sur SPH

*** Précision déterminée lors des essais en laboratoire

**** Données enregistrées automatiquement par le CR-10 sur DEBR et SPH

s.o. Sans objet

3.2.1.2 Site HYP

Le site HYP (Mousses hypnacées) se situe dans le segment G (figure 4) ayant une pente moyenne de 10 %. Les mousses hypnacées dominent 80 % de la surface du site; 10 % est couvert par la sphaigne et 10 % par les débris végétaux.

En général, sur ce site, la hauteur et la densité des arbres empêchent les rayons solaires de pénétrer au niveau du sol. Un des deux sous-sites instrumentés sur les mousses hypnacées (sous-site HN) se trouve dans une légère dépression. L'annexe 3 montre un croquis de sites HYP et SPH.

Tableau III. L'inventaire complet des appareils et instruments des sites SPH, HYP et DEBR.

PARAMÈTRE	SONDE	NOMBRE SUR SPH	NOMBRE SUR HYP	NOMBRE SUR DEBR
Teneur en eau totale	Système gamma	3	2	2
Teneur en eau liquide	TDR	15	10	10
Température du sol	Thermistor	15	10	10
Température de la neige	Thermistor	13	0	0
Température de l'air	Thermistor	2	0	2
Flux de chaleur du sol	Plaques de flux de chaleur	9	6	6
Position de la nappe phréatique	Puits	3	2	2
Acquisition des données	CR 10	1	1	1
Capacité d'infiltration du sol	Infiltromètre	3	2	3

3.2.1.3 Site SPH

Le site SPH (Sphaigne) se trouve dans le segment G (figure 4) ayant une pente d'environ 8 %. La sphaigne couvre 90 % de la surface du site et les mousses hypnacées sont présentes sur 10 %. La faible profondeur de la roche mère de la surface du sol fait que le site a un taux d'humidité relativement élevé en comparant avec les autres sites étudiés. La nappe phréatique atteint fréquemment, durant certaines périodes pluviales ou durant la fonte de neige, la surface du sol. Cependant, durant d'hiver ou les périodes sèches, la nappe descend jusqu'à 1m de profondeur. Sur le site SPH trois sous-sites ont été installés en forme d'un triangle. Les appareils utilisés ainsi que le schéma de leurs connections est présenté sur la figure 6.

3.2.2 Paramètres observés

3.2.2.1 Mesure de la teneur en eau totale

Chaque sous-site est équipé d'un **système gamma** qui sert à mesurer les teneurs en eau totales du sol minéral et de la matière organique. Le dispositif de mesures est formé par des tubes en ABS ayant 5 cm de diamètre intérieur (figure 7 et 8). Ceux-ci sont verticaux et sont espacés de 30,5 cm de centre à centre. Les tubes sont insérés jusqu'à l'assise rocheuse. Un bouchon de bentonite a été installé autour du dispositif près de la surface du sol dans la matière organique. Ce bouchon empêche l'infiltration d'eau le long des tuyaux lors de la fonte printanière. Les surfaces noires sont peintes en blanc afin d'éviter le réchauffement excessif causé par l'absorption du rayonnement solaire.

La **procédure** d'utilisation du système gamma est simple. Elle consiste à descendre, dans un des deux tubes, une source de césium 137 de 5 mCi (0,185 GBq) à une profondeur donnée et dans l'autre tube, un détecteur de scintillations placé à la même profondeur. Une mesure dure une minute à une profondeur donnée. La quantité de radiation qui traverse un volume du sol est détectée et mémorisée par un lecteur. On effectue une mesure par tranche du sol de 2 cm d'épaisseur ce qui implique 30 - 40 mesures par profil. Cette méthode ne peut pas indiquer les changements temporels rapides de la teneur en eau du profil en raison de la durée de mesure relativement longue (1 heure environ pour le profil du sol complet). Mentionnons que les teneurs en eau sont exprimées en mm d'eau par tranche horizontale du sol. Cela est effectué de cette façon pour faciliter les calculs de la teneur en glace.

La teneur en eau totale est calculée selon l'équation 3.1;

$$\theta_T = \theta_{LC} + \Delta_o \quad \dots 3.1$$

où: θ_T teneur en eau totale (mm d'eau par tranche)

θ_{LC} teneur en eau liquide du sol au moment de la calibration (sol dégelé),
(mm d'eau par tranche)

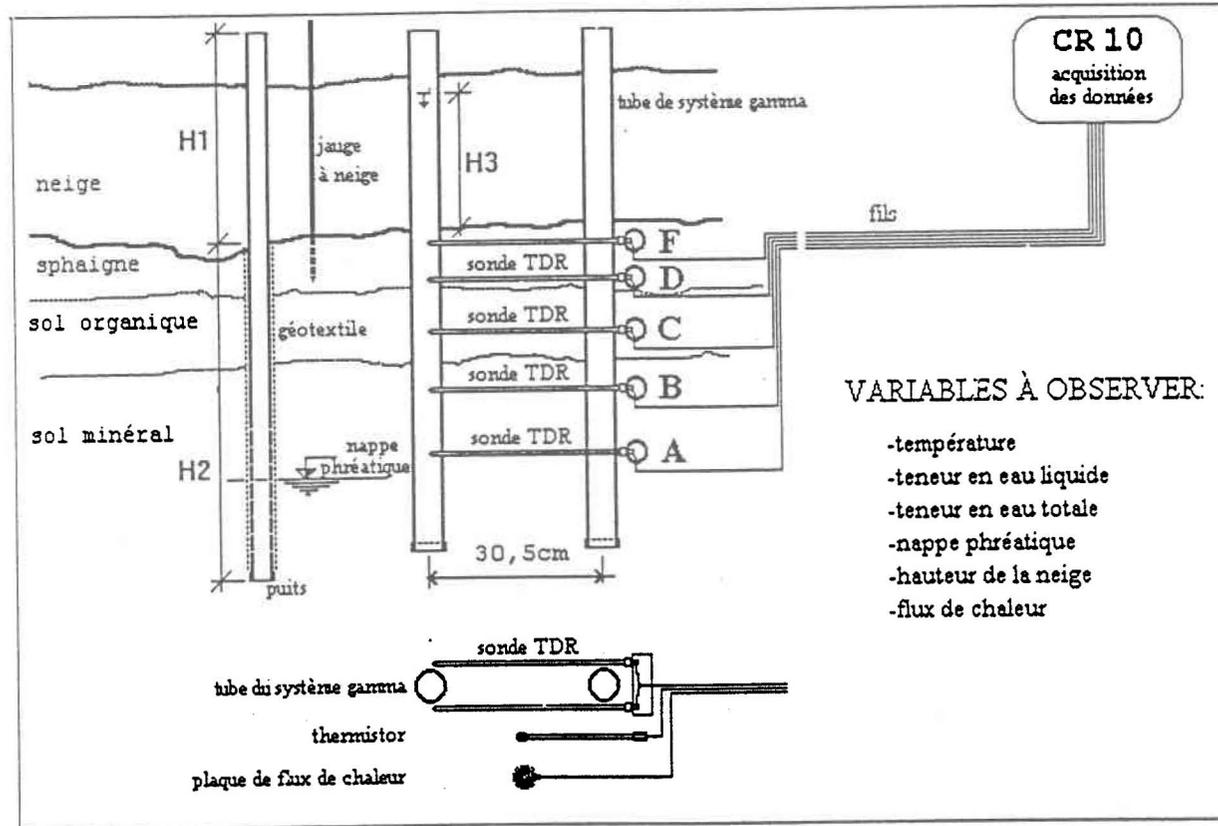


Figure 7. Coupe vertical d'un sous-site typique.

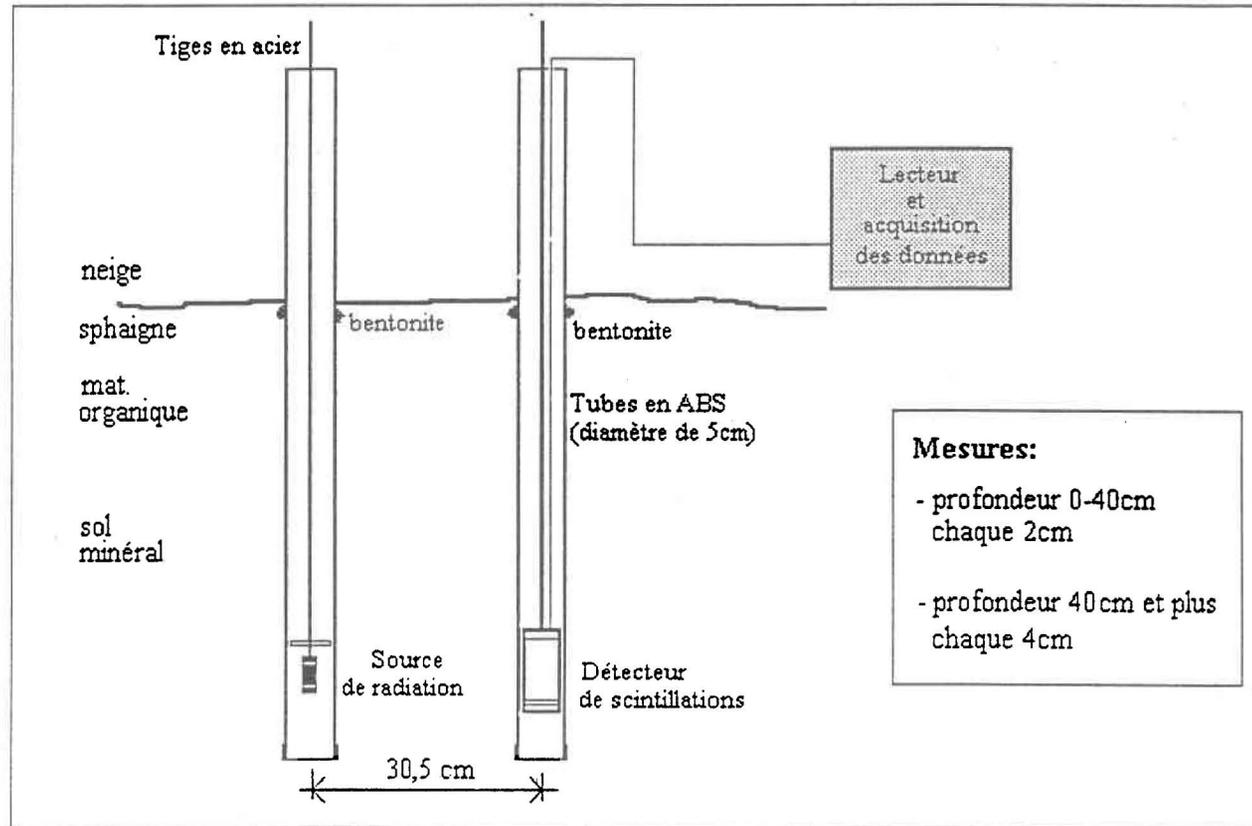


Figure 8. Dispositif de mesure utilisé pour l'évaluation de la teneur en eau totale par la sonde gamma.

Δ_0 changement de la quantité d'eau par rapport à la date de la calibration (mm d'eau par tranche). Cette valeur est obtenue à l'aide du logiciel SCALERQ.

3.2.2.2 Mesure de la teneur en eau liquide et calcul de la teneur en glace

La teneur en eau liquide a été mesurée à l'aide de sondes TDR (Topp *et al.*, 1980). Les sondes TDR ont été installées aux profondeurs théoriques 10, 20, 30, 45 et 60 cm à partir de la surface du sol (figures 7 et 8). Afin de pouvoir connaître la proportion d'eau liquide pour le même sol, les tiges de sondes TDR sont enfoncées horizontalement de façon à ce que le champ électromagnétique généré entre les tiges de ces sondes se trouve aussi entre les tubes du système gamma pour la profondeur donnée. Les sondes TDR consistent en 2 tiges en acier inoxydable de 31 cm de longueur espacées de 6,5 cm et relié à un câble coaxial type RG 58 (Stein et Kane, 1983).

Les sondes TDR permettent de déterminer la constante diélectrique du sol à l'aide de la technique de la réflectométrie dans le domaine temporel. Cette constante varie selon la teneur en eau liquide du sol. Sa détermination est basée sur la différence de la constante diélectrique de l'eau à l'état liquide (80) et celles beaucoup plus faibles de sols minéraux (2,2 à 3,5) et de la glace (3,2). Les constantes diélectriques du sol sont évaluées à l'aide de l'appareil portatif 1502 TDR Cable Tester fabriqué par la compagnie Tektronix. Les données sont enregistrées sur une bande de papier.

Pour la détermination de la teneur en eau liquide de la matière organique la courbe d'étalonnage suivante est utilisée (Pépin *et al.*, 1991):

$$\theta_L = -0,1547 + 0,557 K - (1,322 \cdot 10^{-3}) K^2 + (1,372 \cdot 10^{-5}) K^3 \quad \dots 3.2$$

Pour la détermination de la teneur en eau liquide dans les couches minérales du sol la courbe d'étalonnage suivante est utilisée (Topp *et al.*, 1980):

$$\theta_L = -0,053 + 0,092 K - (5,5 \cdot 10^{-4}) K^2 + (4,3 \cdot 10^{-6}) K^3 \quad \dots 3.3$$

où: θ_L teneur en eau liquide du sol [%]
 K la constante diélectrique apparente du sol

La constante diélectrique apparente du sol K est définie comme suit (Stein et Kane, 1983)

$$K = (L_{et} / L_r)^2 \quad \dots 3.4$$

où: L_{et} longueur de trace (lue sur l'appareil) [cm]
 L_r longueur de tige de sonde TDR [cm]

Les teneurs en eau mesurées lors de période de calibration selon la méthode du TDR ont été, par la suite, comparée aux valeurs obtenues à l'aide des échantillons gravimétriques du sol. Un logiciel d'optimisation a été utilisé pour l'analyse et l'ajustement de deux paramètres (longueur de trace enregistrée et longueur de tige de sonde) afin de tenir compte de la présence du tube vide entre les tiges des sondes TDR dans le dispositif expérimental. Ce traitement consiste à:

- la détermination de la teneur en eau liquide par la méthode gravimétrique;
- la modification de l'équation 3.4; cette fonction devient:

$$K = (L_{et} * A / (L_r * B))^2 \quad \dots 3.5$$

où: A coefficient de correction de la longueur de la trace
 B coefficient de correction de la longueur de la tige
 (donc les coefficients A et B ont une certaine signification physique);

- la détermination de la teneur en eau liquide par la méthode du TDR à la date de calibration pour chaque sonde (constante diélectrique est calculée selon équation 3.5);
- le calcul des écarts au carré entre les teneurs en eau liquide déterminées selon la méthode gravimétrique et la méthode du TDR;
- l'optimisation de paramètres A et B pour que la somme des écarts de tous les données disponibles au carré soit minimale.

La teneur en glace est obtenue en soustrayant la teneur en eau liquide de celle totale (équation 3.6). Étant donné que la densité de la glace ($0,92 \text{ g/cm}^3$) est différente de celle de l'eau liquide ($1,00 \text{ g/cm}^3$ pour la température de 4°C), les teneurs sont

exprimées en millimètres d'eau liquide par tranche horizontale du sol considérée. L'épaisseur de cette tranche est choisie en fonction de la stratification du sol et il varie de 40 à 80 mm.

$$\theta_G = \theta_T - \theta_L \quad \dots 3.6$$

où: θ_G teneur en glace [mm d'eau/tranche]
 θ_T teneur en eau totale [mm d'eau/tranche]
 θ_L teneur en eau liquide [mm d'eau/tranche]

Prenons un **exemple**:

Les paramètres suivants ont été évalués sur le sous-site DY (site DEBR) à la profondeur de 11 cm:

- épaisseur de tranche du sol de 60 mm (de 80 à 140 mm de profondeur);
- teneur en eau liquide de 22,3 % (13,4 mm d'eau liquide pour une tranche de sol de 60mm) évaluée à partir de la méthode du TDR le 29 mars 93;
- données du profil hydrique du sol à l'aide du dispositif gamma le 29 mars 93;
- teneur en eau liquide de 27,7 % (16,6 mm/60 mm) évaluée à partir de la méthode du TDR au moment de la calibration du site (5 août 93) .

Voici le calcul de la teneur en glace:

- augmentation de la quantité d'eau totale entre la date de calibration (sol dégelé) et 29 mars 93 de 17,7 mm d'eau par tranche. Cette valeur est obtenue à l'aide du logiciel Scalerq fourni avec le dispositif de mesure de la teneur en eau totale;
- teneur en eau totale est obtenue comme la somme de la teneur en eau au moment de la calibration et le changement de la quantité de l'eau entre les deux dates (équation 3.1). Donc:

$$16,6 + 17,7 = 34,3 \text{ mm}/60 \text{ mm};$$

- teneur en glace est obtenue selon équation 3.6:

$$34,3 - 13,4 = 20,9 \text{ mm}/60\text{mm};$$

- cette valeur représente 34,8 % et elle est exprimée en eau liquide;
- la teneur en glace volumique est obtenue en connaissant la densité de la glace (0,92 g/cm³):

$$34,8 / 0,92 = 37,9 \text{ %};$$

- *donc, la teneur en glace le 29 mars 93 a été de 37,9 %.*

3.2.2.3 Mesure des températures du sol, de la neige et de l'air

Des **thermistors** mesurant la température du sol ont été installés (figure 6 et 7) à proximité du système gamma aux mêmes profondeurs que les sondes TDR. Ces thermistors sont fabriqués par Har-Tech Electric et ils ont été reliés à des câbles coaxiaux de type Belden 9394. La progression et les changements de températures dans le couvert de neige sont évalués à l'aide de thermistors installés sur une harpe. Cette dernière consiste à 12 tiges en bois espacées de 10 cm l'une de l'autre. La longueur des tiges diminue de 1,20 m, avec un pas de 10 cm, jusqu'au sol. Ces senseurs sont installés aux extrémités des tiges et sont reliés au système d'acquisition automatique des données (CR-10). Les senseurs thermiques ont été lus aux 15 min. et des moyennes de une heure (température de l'air) et de six heures (températures du sol et de la neige) sont enregistrées. Pour l'analyse ultérieure des températures, seulement celles qui ont été obtenues durant la période de recouvrement total du senseur par la neige ont été utilisées. Les températures de l'air ont été mesurées sur le site DEBR et SPH. Chacun de ces sites a été muni de deux thermistors à l'abri de la radiation directe du soleil et du vent. Mentionnons que l'abri contre la radiation consiste de boîtes de bois peinturées blanc et ventilées. Dans les boîtes, les senseurs ont été fixés sur un morceau de styrofoam de façon que les extrémités des sondes ne touchent à aucun objet (parois, fond, attaches). Les températures ont été enregistrées du 3 décembre 1992 au 16 juin 1993.

3.2.2.4 Mesure du flux de chaleur

Sur chaque sous-site trois **plaques de flux de chaleur** ont été installées (Campbell Scientific, modèle HFT-1) horizontalement à proximité des tubes gamma et parallèlement aux sondes TDR aux profondeurs théoriques à partir de la surface du sol 10, 20 et 30 cm (figure 7). Ces plaques permettent d'évaluer le flux de chaleur dans la couche organique et minérale du sol pour chaque sous-site. La partie sensible de la sonde HFT-1 a un diamètre de 38,6 mm, et une épaisseur de 3,9 mm. Les thermistors et les plaques de flux de chaleur (fils de 13,2 m de longueur) ont été reliés à un système d'acquisition automatique de données (Campbell Scientific CR-10). Les flux de chaleur ont été lus aux 15 min. et une moyenne a été enregistrée à toutes les heures. Pour le traitement de données ultérieur, la moyenne est calculée

comme le rapport de la somme des valeurs sur le nombre d'observations (moyenne arithmétique). Les valeurs positives des flux de chaleurs sont employées pour les transferts thermiques de la profondeur vers la surface du sol.

3.2.2.5 Mesure de la position de la nappe phréatique

La position de la nappe phréatique a été déterminée à l'aide de **puits** (figure 6 et 7). Chacun des sous-sites a été doté d'un puits. De plus, les sites HYP et SPH ont été entourés par 9 puits. Les puits consistent en tubes¹ de 37 mm de diamètre en ABS. Pour empêcher l'infiltration de particules fines à l'intérieur des tubes, ces derniers sont enrobés par du géotextile. Le niveau d'eau est mesuré manuellement à l'aide un piezomètre électronique qui indique la profondeur par un signal sonore. Les mesures ont été prises occasionnellement durant l'hiver et régulièrement durant la fonte (environ 3 fois par semaine).

3.2.2.6 Mesure de la capacité d'infiltration du sol

La capacité d'infiltration du sol est mesurée par des **infiltromètres à double anneaux**. Les infiltromètres se situent près de chaque sous-site et consistent en deux anneaux de plastique (PVC) ayant un diamètre de 37,5 cm et 15,6 cm respectivement. Ses hauteurs sont de 25 cm. Les deux aires sont alimentées (centrale et extérieure) par de l'eau en continue pour assurer une charge hydrostatique constante de 5 cm environ. De la neige est mélangée dans le système d'alimentation pour s'assurer d'une température voisine de 0°C. La capacité d'infiltration du sol est calculée en connaissant le débit d'eau et l'aire de la partie centrale de l'infiltromètre. Un schéma du dispositif d'alimentation des infiltromètres en continue qui a été développé et utilisé est montré à l'annexe 4.

¹ Détails de perforation des puits (aux 40 cm inférieurs du tuyau):

nombre de trous	40
diamètre des trous	2 mm
distance verticale des trous	40 mm
distribution des trous	quatre trous sur le périmètre du tuyau

3.2.2.7 Évaluation de la conductivité thermique apparente

L'équation qui permet d'évaluer le transport de la chaleur par la conduction thermique dans le sol s'écrit comme suit:

$$Q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \dots 3.7$$

où: Q flux de chaleur, [W/m²]
 k conductivité thermique apparente, [W/m°K]
 ΔT différence de la température du sol entre les deux points considérés, [°K]
 Δx distance entre deux points considérés, [m]

Cette équation a servi à évaluer, de façon approximative, la conductivité thermique apparente. La distance Δx a été fixée à 10 cm. Les températures du sol et les flux de chaleur appropriés ont été calculés à l'aide d'interpolation linéaire entre les valeurs connues dans le profil vertical du sol. L'équation 3.7 n'est valide qu'en assumant que les apports d'énergie par convection sont négligeables. Plus ces apports deviennent importants, comme par exemple au début de la fonte, lorsque les conditions se prêtent à un apport plus important d'énergie par convection, plus l'erreur est grande.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Patron climatique de l'hiver 1992-93

4.1.1 Températures de l'air

La Forêt Montmorency est caractérisée par un climat froid avec *une température moyenne annuelle de 0,1°C* et une moyenne de 234 jours de gel par année¹. Étant donné la faible distance entre la station climatologique principale et le bassin versant du Lac Laflamme, les données de cette station² ont été utilisées pour comparer les résultats de l'étude menée en 1992-93 avec les observations antérieures.

Les **conditions climatiques** ont une influence directe sur l'accumulation, sur la fonte de neige et, par conséquent, sur la détermination des voies d'écoulement d'eau lors de périodes de fonte. Voici quelques observations, jugées les plus importantes:

- les températures moyennes³ de l'air mesurées sur les sites DEBR et SPH ne manifestent pas d'écarts significatifs entre elles;
- durant la période du 5 décembre 1992 au 22 mars 1993, les *températures de l'air mesurées aux six heures sont restées toujours au-dessous du point de congélation* sur les sites DEBR et SPH (figure 9);
- la température moyenne pour la période du 12 décembre 1992 (début d'établissement du couvert permanent) au 5 juin 93 (disparition du manteau nival sur 95 % de superficie du bassin versant) a été de -8,5°C;

¹ Selon les statistiques de la station climatologique de la Forêt Montmorency pour les années 1966-91.

² La station climatologique de la Forêt Montmorency est située environ 2 km vers l'Ouest et son altitude est de 100 m inférieure au Lac Laflamme.

³ Dans le présent document, le terme *moyenne* signifie la moyenne arithmétique de toutes les données disponibles (distribution temporelle des observations étant homogène) pour la période considérée.

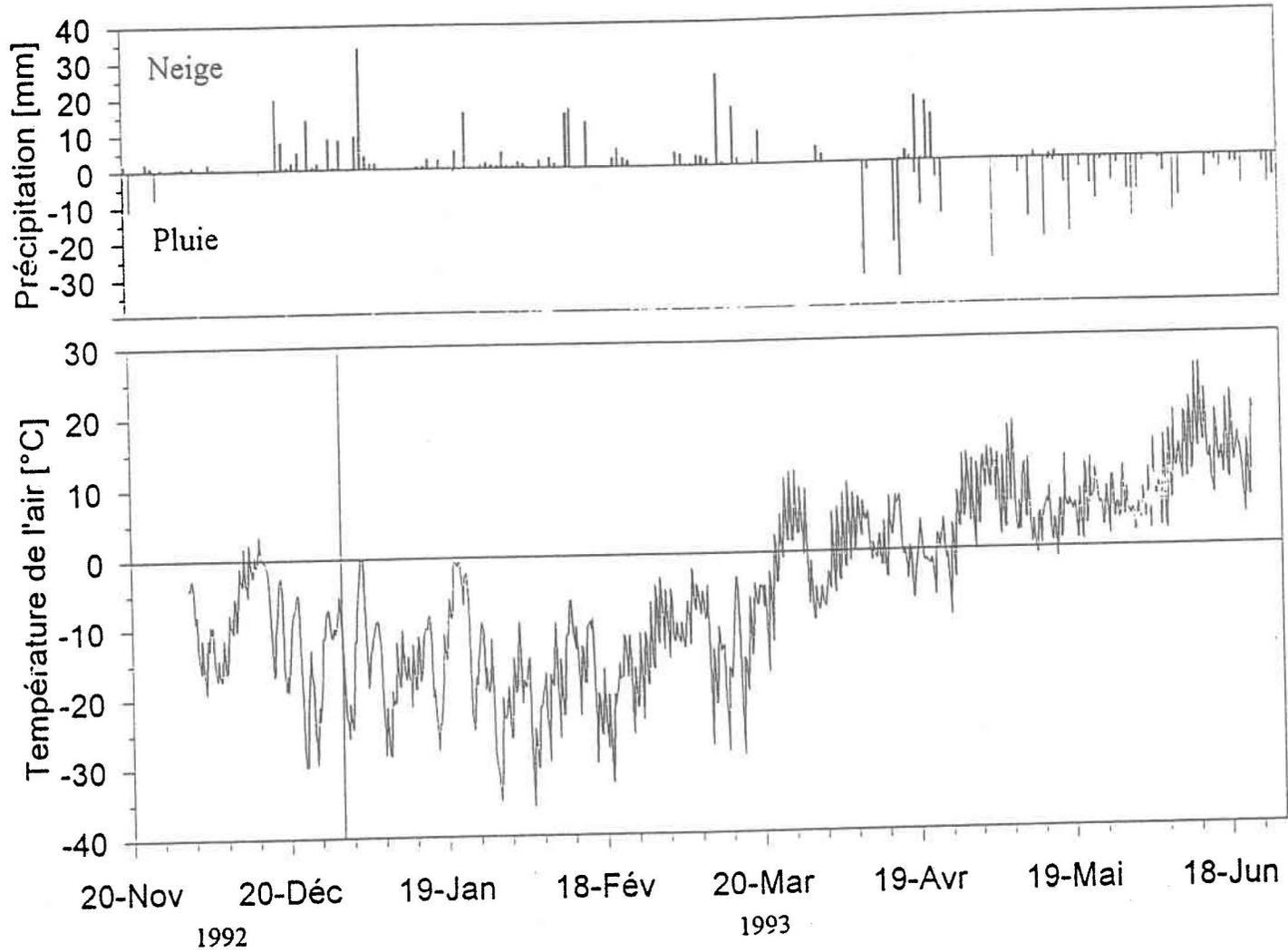


Figure 9. Évolution de la température de l'air sur le site DEBR ainsi que la précipitation à la station climatologique de la Forêt Montmorency.

- la température minimale de l'hiver 1992-93 de -36°C est atteinte le 5 février 1993;
- durant la période d'étude (du 3 décembre 1992 au 16 juin 1993), les journées ensoleillées se démarquent par des écarts de températures moyennes nocturnes (à 24:00) et journalières (à 12:00) importantes (environ 15°C);
- la *période de fonte commence le 22 mars*; les températures montent rapidement pour atteindre 10°C environ. La température moyenne journalière durant les 6 jours suivants est de $4,8^{\circ}\text{C}$;
- la *fonte est entrecoupée, après une semaine, par 6 jours froids* avec une moyenne des températures de -5°C .

Selon la grille d'analyse¹ établie par Proulx (1992), des événements météorologiques importants survenus durant 22 années antérieures (1965-1990), l'hiver 1992-93 se distingue par une date de mise en place du couvert tardive (mi-décembre en 1992; la moyenne étant le 14 novembre). Une saison d'accumulation sans pluie ou des températures au-dessous de 0°C durant les années concernées, est observée avec 45 % de probabilité. Durant la saison étudiée la période de fonte est entrecoupée d'une période sans accumulation de neige importante. Ce type de scénarios de fonte se produit durant 50% du temps pour la période entre 1965 et 1990 (Proulx, 1992). Le début de la fonte (22 mars) est avancé de 14 jours de la moyenne. Dans les 22 ans étudiés par Proulx (1992), il n'y a qu'une année où la fonte débute avant le 22 mars. Cet événement est survenu le 18 mars 1968. L'augmentation brusque des températures de l'air génère une fonte rapide avec la date de disparition du couvert avant la moyenne. On peut considérer la période de mise en place du couvert de neige (mi-décembre) ainsi que la date du début de la fonte comme des événements météorologiques exceptionnels.

¹ La grille d'analyse a été établie pour la station climatologique de la Forêt Montmorency.

4.1.2 Mise en place et évolution du couvert neigeux

Selon les données de la station climatologique de la Forêt Montmorency, *la neige recouvre le bassin plus de 6 mois par année* en moyenne. Durant la saison d'étude (l'hiver 92-93) la période d'accumulation est considérablement raccourcie. La neige demeure au sol seulement à partir de mi-décembre (figure 10) et elle disparaît à la fin du mois d'avril sur les pentes exposées au sud; cependant sur le versant exposé au nord la neige persiste jusqu'à la mi-mai. Le maximum d'accumulation nivale (entre 20 et 25 cm d'équivalent en eau) est atteint le 21 mars (tableau IV). Les données détaillées d'accumulation de la couverture neigeuse sur les sites DEBR, HYP et SPH sont présentées à l'annexe 5.

Les **paramètres qualitatifs du couvert de neige** ont été observés cinq (5) fois durant l'hiver 1992 - 93 (11 janvier, 26 janvier, 8 mars, 29 mars et 5 avril). Au point de vue de ces paramètres, l'hiver 1992-93 est caractérisée par la métamorphose de la masse neigeuse homogène sans la présence de strates de glace importantes. En raison d'absence de pluie ou de réchauffement hivernal la neige n'a pas subi de chocs thermiques importants occasionnés par le climat. À cet égard, la formation de couches de glace considérables dans le profil de neige n'est pas favorisée. Cependant, une faible couche de glace très poreuse est observée le 11 janvier environ à 10 cm à partir de la surface air-neige. Même si ni réchauffement dépassant 0°C, ni pluie n'a été enregistrée pour cette période, on peut présumer que la couche de glace a été générée par un réchauffement de très courte durée ou par une faible pluie. Ces événements ont probablement eu lieu entre le 4 ou 5 janvier 1992.

Le mûrissement du stock est plus avancé à la base de couvert et il évolue au fur et à mesure que la neige perdure sur le sol. Le couvert subit une métamorphose graduelle et la densité augmente régulièrement jusqu'à un maximum de 0,36 g/cm³ (moyenne du bassin), atteint à la fin de fonte. L'augmentation importante des températures de l'air à partir du 23 mars se reflète sur des conditions qualitatives de la neige. Selon les observations effectuées le 29 mars, le couvert a été mur dans tout le profil. Malgré la fonte rapide des neiges, le 29 mars le ruissellement n'a pas été observé¹ sur la surface du sol sur aucune couverture morte.

¹ Selon les observations visuelles de l'interface sol-neige sur environ trois sites choisis au hasard sur chaque couverture morte.

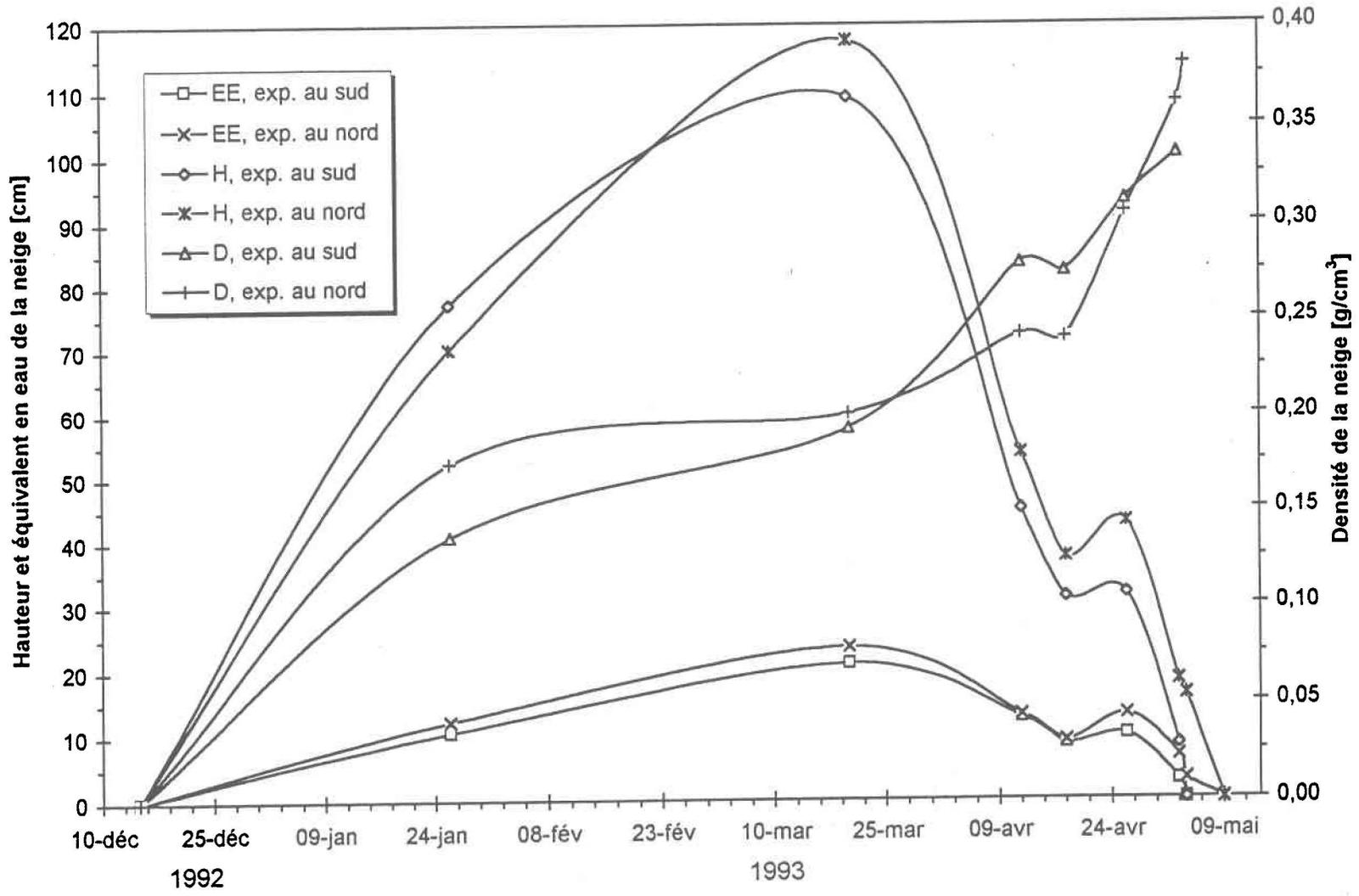


Figure 10. Évolution de l'accumulation (H), la densité (D) et l'équivalent en eau (EE) de la couverture neigeuse sur le bassin évalués à partir des carottes de neige.

Tableau IV. Évolution de la hauteur, équivalent en eau et densité du couvert de neige selon l'exposition et l'élévation.

Date	Total pour le bassin			Selon exposition						Selon élévation					
	H	EE	D	<i>Exposé au sud</i>			<i>Exposé au nord</i>			<i>Bas de pente</i>			<i>Partie supérieure</i>		
				H	EE	D	H	EE	D	H	EE	D	H	EE	D
[cm]	[cm]	[g/cm ³]	[cm]	[cm]	[g/cm ³]	[cm]	[cm]	[g/cm ³]	[cm]	[cm]	[g/cm ³]	[cm]	[cm]	[g/cm ³]	
1993-01-26	72	11	0,16	77	11	0,14	70	12	0,17	70	11	0,15	76	12	0,16
1993-03-21	112	22	0,20	109	21	0,19	118	24	0,20	110	22	0,20	115	22	0,20
1993-04-13	48	12	0,26	45	13	0,28	54	13	0,24	44	12	0,27	53	14	0,26
1993-04-19	34	8	0,25	31	9	0,27	37	9	0,24	30	9	0,30	35	8	0,23
1993-04-27	37	11	0,30	32	10	0,31	43	13	0,30	33	10	0,31	41	13	0,31
1993-05-03	15	5	0,36	8	3	0,34	18	7	0,37	9	4	0,38	17	6	0,36

H hauteur de la neige [cm]

EE équivalent en eau de la neige [cm d'eau]

D densité du couvert de neige [g/cm³]

L'étude des profils de température de la neige indique des gradients de température élevés pour la neige tombée au début de la saison d'accumulation par rapport à la fin de la saison (figure 11). Au fur et à mesure que la métamorphose et la densification progresse les capacités isolantes du couvert diminuent, la conductivité thermique apparente et les échanges entre le sol, la neige et l'air augmentent sur le site SPH. Le couvert a atteint l'isotherme 0°C le 5 avril.

L'année 1992-93 montre une *densification lente et régulière* du couvert qui atteint son maximum de densité de 0,38 g/cm³ sur les versants exposés au sud. Selon les études précédentes effectués sur le bassin, les densités maximales du couvert observées ont été plus élevées (0,50 g/cm³, Plamondon *et al.* (1984)). Les maxima absolus observés sont de 0,52 g/cm³ (Proulx, 1992).

4.1.3 Évolution temporelle et spatiale du gel associée aux couvertures mortes

La **glace dans la matière organique** est observée visuellement dès le début de l'hiver 1992-93 même avant la mise en place de la couverture neigeuse (3 décembre 1992). Les températures de l'air automnales au-dessous de 0°C et l'absence de neige au sol ont fait descendre les températures des couches supérieures du sol de quelques degrés (°C) au-dessous du point de congélation. Cette période froide a été entrecoupée par un réchauffement soudain suivi d'une pluie (11 et 8 mm le 21 et le 26 novembre respectivement). L'eau de précipitation a pénétré seulement les quelques premiers centimètres de profondeur du sol avant que le gel n'arrête son mouvement vertical. Grâce à ce phénomène, une couche de glace très compacte a été formée à la grandeur du bassin. À titre indicatif, les observations des températures automnales (octobre - décembre) du sol à la Station principale de la Forêt Montmorency sont présentées à l'annexe 6. Il est à noter l'écart important¹ entre ces données et les températures du sol mesurées sur le bassin du Lac Laflamme pour le mois de décembre. Les températures du sol sont en général plus froides sur le bassin du Lac Laflamme et les écarts atteignent jusqu'à 2,7°C sur le site HYP (1,5 et 1,3°C sur les sites DEBR et SPH respectivement).

¹ Les températures du sol sur la Station principale de la Forêt Montmorency sont mesurées à l'aide de termistors installés en-dessous du gazon entretenu et exposé à la radiation provenant du soleil et ils offrent une précision de mesure de ±0,5 °C.

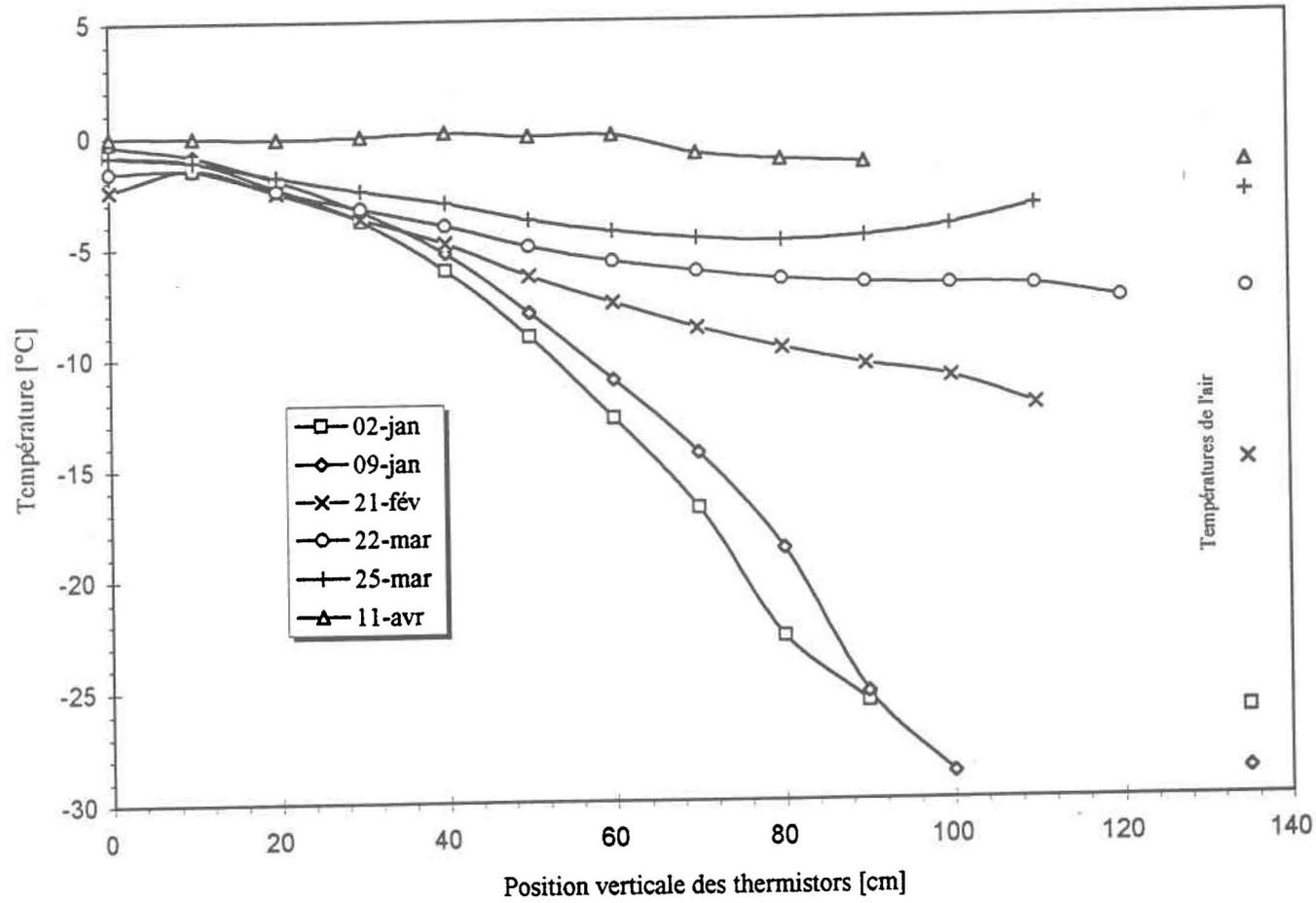


Figure 11. Profils thermiques de la neige enregistrés lors de périodes typiques au site SPH à 6 heures du matin (hiver 1992-93).

Les observations faites lors de l'**inventaire du type de gel** (figure 12) indiquent que la couche de glace compacte (type de gel no 4 sur une échelle de 1-très poreux à 5-compact), mise en place durant automne, a été formée sur les trois couvertures mortes principales. Aucune différence significative de dureté de la glace n'a été remarquée. Par contre, la position verticale de cette couche varie selon le type de couverture morte. Sur le parterre forestier couvert par les débris végétaux, la glace compacte a été formée sur les 3 premiers centimètres de l'interface sol-air environ. L'observation des couches de matière organique dominées par HYP et SPH, ont révélé que la glace de type compact se trouve plus profondément que sur DEBR, à environ 8 à 12 cm pour HYP et SPH respectivement. Les mêmes phénomènes ont été aussi observés par Stein *et al.* (1994). Les écarts moyens des séries de mesure du type de gel sont présentées à l'annexe 7.

Même si la dynamique de la formation et de la distribution spatio-temporelle des couches de glace dans le sol est complexe, cette étude a démontré que *la densité et l'épaisseur de la matière organique jouent des rôles importants* dans ce processus. La sphaigne, ayant une densité faible, réagit comme un isolant thermique efficace et par conséquent la perte de chaleur de la sphaigne vers l'atmosphère ou vers la couverture de neige est plus faible. Durant la période automnale, quand le bilan thermique du sol est négatif, l'eau provenant de la pluie peut donc pénétrer plus profondément, grâce à sa chaleur latente élevée, avant que l'équilibre thermique ne s'établisse (gel du sol). De plus, la sphaigne ralentit la propagation du front du gel par sa capacité de rétention de l'eau plus élevée que les deux autres couvertures mortes (HYP, DEBR).

L'eau liquide contenue dans les premiers centimètres du parterre forestier se trouve soit dans les interstices entre les différentes particules du sol ou de matière organique, soit directement dans les cellules vivantes de la matière organique. Étant donnée que la sphaigne est composée, en grande partie de la matière organique vivante la quantité d'eau retenue de cette façon est considérablement plus élevée que pour les autres types de couvertures mortes.

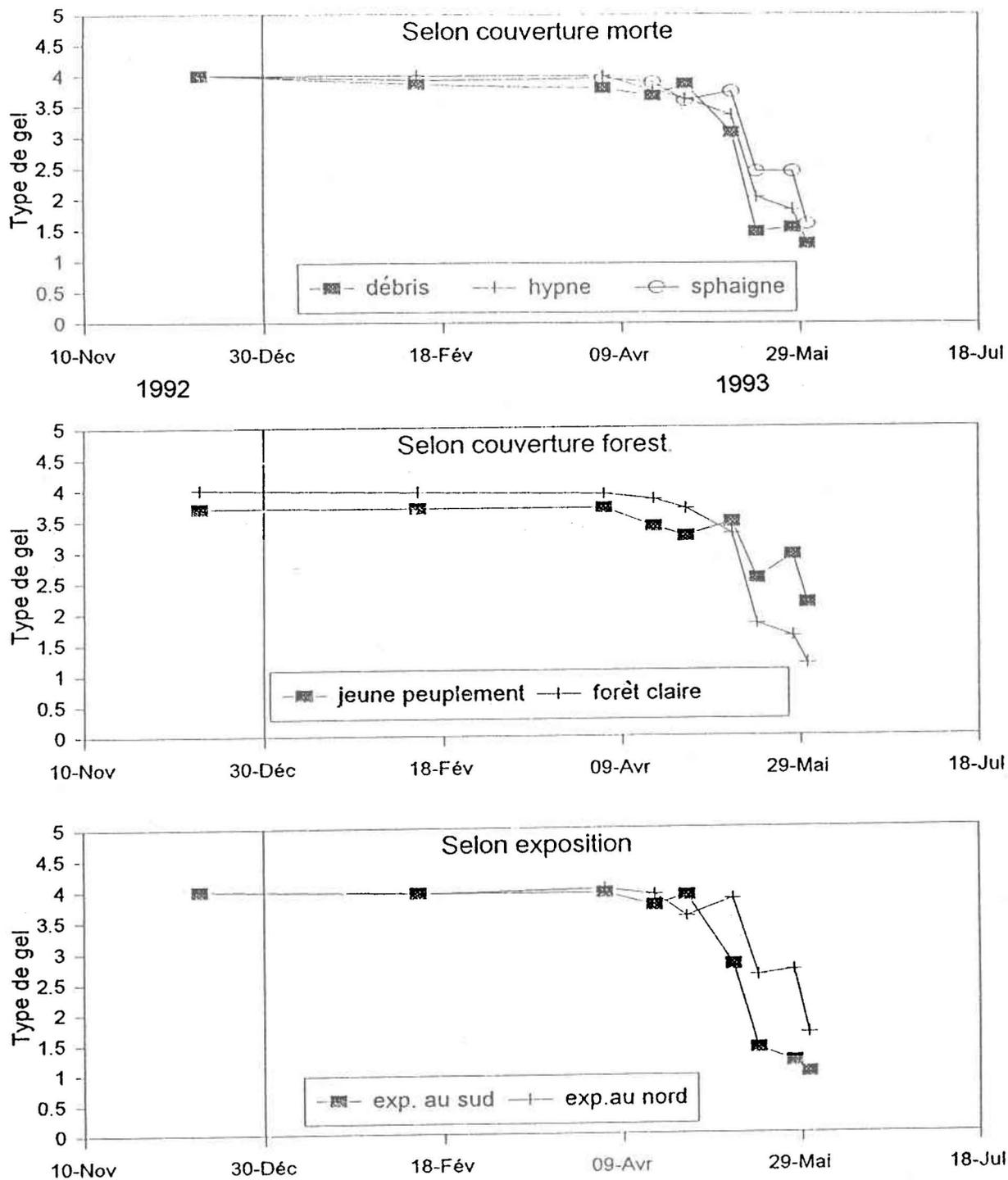


Figure 12. Évolution temporelle du gel de sol selon le type de couverture morte, le couvert forestier et l'exposition (1 = gel très poreux, 5 = gel compact).

L'analyse des températures du sol a permis de constater que, durant la période de l'accumulation de la neige sur le sol, le front du gel se propage régulièrement avec une vitesse de 1 cm par jour environ. Nombreux auteurs (Kane et Stein 1983 b, entre autres) ont observé la formation d'une couche de glace par la redistribution de l'eau vers le haut lors de l'avancé d'un front de gel et l'augmentation de la teneur en eau à sa proximité. Puisque le front de gel réagit comme une pompe, la succion peut transporter une quantité importante d'eau du sol vers la couche de glace. Toutefois, pour qu'un tel processus se produise, il faut un sol ayant les particules très fines comme de l'argile. Lorsque la texture du sol est trop grossière comme dans notre cas, la conductivité hydraulique est beaucoup trop faible pour permettre un transfert de chaleur assez rapide pour compenser la perte de chaleur à la lentille de glace. Durant l'hiver 1992-93 un phénomène semblable n'a pas été observé. Étant donné que qu'il n'y a pas eu de pluie ou de fonte hivernale, la couche de glace de la matière organique a eu son origine dans les événements automnaux.

Durant la période d'accumulation de la neige la couche de glace est restée compacte, sans des changements de structure mesurables¹. Les sondages du sol, effectués lors de la fonte printanière montrent que le type de gel au niveau de tout le bassin est sensiblement le même pour les trois couvertures mortes. Étant donné que la majeure partie du sol couvert par débris végétaux se situe sur les versants exposés au sud, la disparition de gel sur cette couverture est légèrement avancée par rapport aux autres couvertures. Ces observations permettent de conclure que pour l'hiver 92-93 la présence de glace compacte dans la matière organique n'est pas différente selon les types de couvertures mortes. Par contre, la profondeur ainsi que l'épaisseur de la couche de glace compacte varie selon les types de couverture morte (DEBR, près de surface de sol et relativement mince, SPH plus profonde et épaisse).

¹ Les différences de compacité les plus élevées entre les différents types de la matière organique représentent environ 0,4 unité sur l'échelle de 1 à 5. Également, il faut tenir compte une certaine subjectivité de la méthode employée pour l'évaluation du type de gel. Afin de rendre les résultats de cette recherche compatibles avec les observations de Stein *et al.* (1994), des mesures comparatives ont été effectuées au mois de mars 1994. Les résultats ont révélés que le type de gel qui a été mesuré durant l'hiver 90-91 par les auteurs mentionnés est surestimé d'environ une unité. Par exemple, le type de gel classifié comme 3 par Stein *et al.* (1994) durant cette étude aurait été classifié comme 4 dans l'étude présente, toujours sur une l'échelle de 1 (glace poreuse) à 5 (glace compacte).

Les écarts importants du type de gel (figure 12) sont observés sur les lieux ayant un couvert forestier et une exposition différente. Le couvert forestier dense diminue les apports thermiques au sol par radiation. En général au-dessous des jeunes peuplements la glace subsiste considérablement plus longtemps et sa dureté est nettement plus élevée. Dès que le couvert commence à devenir mince et discontinu l'effet de l'exposition joue un rôle important. Lors de l'observation faite le 27 mai 92 sur quelques endroits, situés sur le versant exposé au nord, couvert par les jeunes peuplements (couramment appelés "St. Michel") la glace était très compacte, difficilement pénétrable avec la tige en acier. Le même jour, sur le versant exposé au sud la glace n'est plus observée.

4.2 Températures et flux de chaleur du sol

4.2.1 Évolution générale

Étant donné la capacité isolante élevée de la couverture neigeuse, les échanges thermiques à l'interface sol-neige sont faibles durant la période d'accumulation de la neige. Les températures de l'air du mois de décembre (de -30 à $+3^{\circ}\text{C}$ avec une moyenne de -11°C , figure 9) et l'absence ou très faible accumulation de neige ont fait chuter les températures du sol à près de -5°C (exceptionnellement à -7°C à proximité de la surface du sol) tel que montré à la figure 13 et à l'annexe 10¹. Par la suite, après les précipitations neigeuses, les pertes énergétiques du sol (représentées par flux de chaleur) ont diminué. La diminution de pertes de chaleur vers l'atmosphère, après l'établissement du manteau nival, se reflète par la hausse des températures du sol. Par exemple pour le site HN la température à 10 cm de profondeur a descendu le 8 décembre 1992 à $-5,2^{\circ}\text{C}$ (avant mise en place de neige). Le 8 janvier 1993, sur le même site et même profondeur, la température de $-0,6^{\circ}\text{C}$ a été enregistrée.

¹ Étant donné la quantité de graphiques considérable, nous présentons dans la partie principale de ce document les données pour le site DY (DEBR) seulement. Les données graphiques traitant des autres sites sont regroupées en annexes.

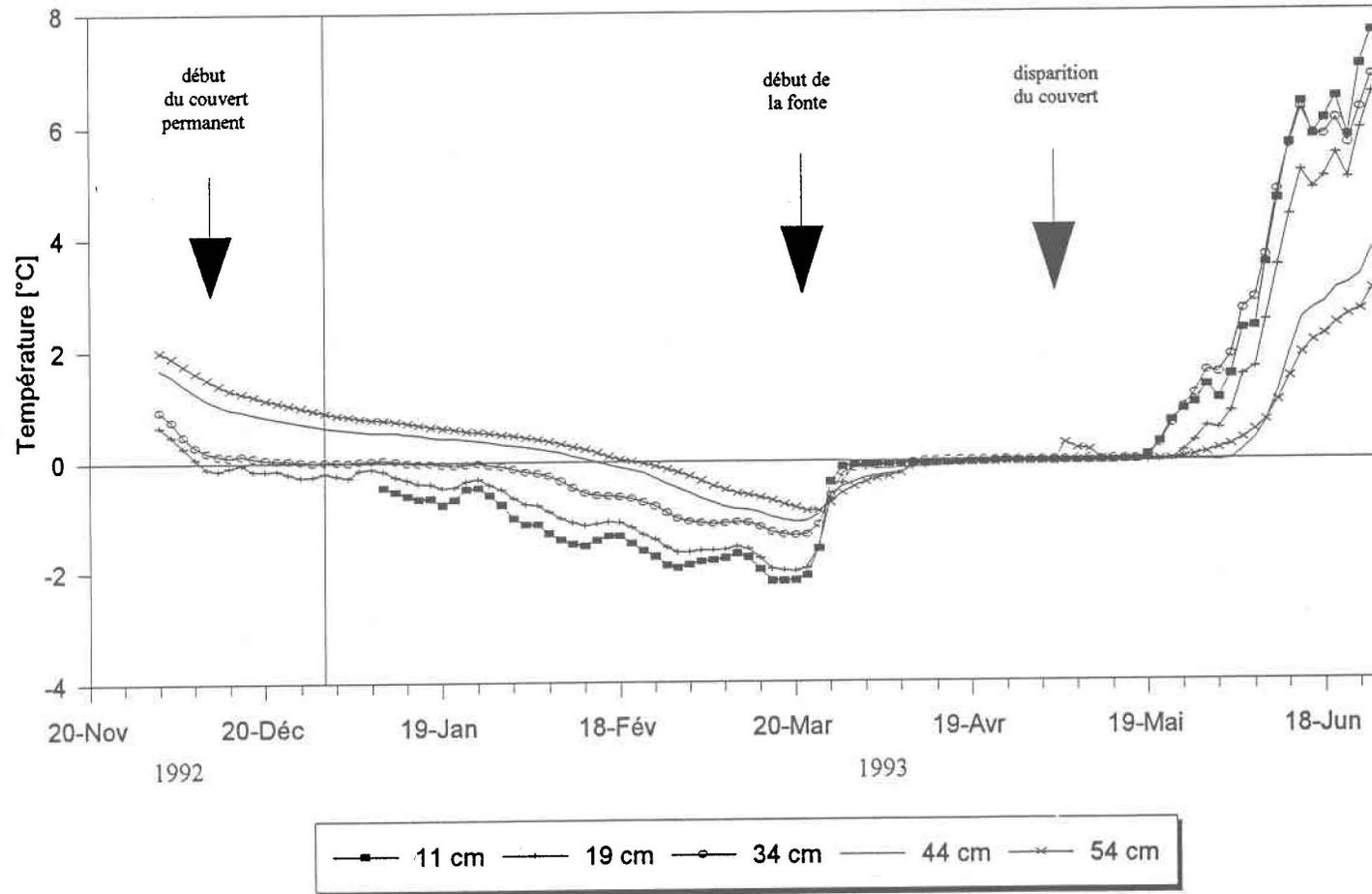


Figure 13. Évolution temporelle des températures sur le sous-site DY aux profondeurs 11, 19, 34, 45 et 54 cm.

Sur tous les sites les *températures du sol (mesurées aux 6 heures) ne descendent pas au-dessous de $-2,5^{\circ}\text{C}$* durant la période d'accumulation (tableau V). Ces valeurs sont sensiblement différentes de celles mesurées par Prévost *et al.* (1989) au même bassin versant. L'auteur a observé les températures minimales hivernales du sol de $-1,3^{\circ}\text{C}$ (mois de mars). Il est important de mentionner que la diminution de la température du sol de 1°C en dessous de 0°C entraîne une diminution considérable de la teneur en eau liquide du sol. Selon des résultats discutés dans le chapitre 4.5 ce changement peut représenter 6% de la teneur en eau liquide entre la température -1°C et -2°C . Ce phénomène a des grandes conséquences sur la dynamique de formation de la glace du sol. La profondeur de gel excède 40 à 55 cm sur tous les sites. Ces valeurs sont confirmées aussi par Prévost *et al.* (1989).

Durant la fonte printanière, la disparition du couvert favorise les échanges thermiques entre l'air et le sol qui dégèle rapidement. Le dégel progresse de quelques cm par jour selon l'exposition du site et le type de couverture morte.

L'hétérogénéité du sol forestier se projette de façon prononcée dans les valeurs mesurées du flux de chaleur. Les observations faites lors de l'étude montrent une très grande variabilité de ce paramètre. Les écarts importants sont observés entre les différents sous-sites. L'accumulation non homogène de la neige contribua, sans doute, à un tel phénomène. Mentionnons que selon Sturm (1992), les gros arbres influencent fortement la mise en place de la neige sur une distance de 1 m environ du tronçon d'un arbre.

4.2.2 Site DEBR

Les températures du sol (moyenne arithmétique des données enregistrées aux deux jours) sur le site DEBR sont montrées à la figure 13 et à l'annexe 10 pour le sous-site DY et DU respectivement. Les flux de chaleur vers la surface varient de -8 à -20 W/m^2 (figure 14) et la diminution brusque des températures (jusqu'à $1,8^{\circ}\text{C}$ par jour) indiquent que les pertes énergétiques dans la couche organique sont très fortes durant le mois de décembre. En effet, durant ce mois, caractérisé par une accumulation de neige négligeable (figure 10), les températures dans les couches supérieures suivent avec rigueur l'évolution des températures de l'air. Le taux de diminution de température observé sur le sous-site DU à 7 cm de profondeur, durant le début de décembre, a été de $0,9^{\circ}\text{C}$ par jour.

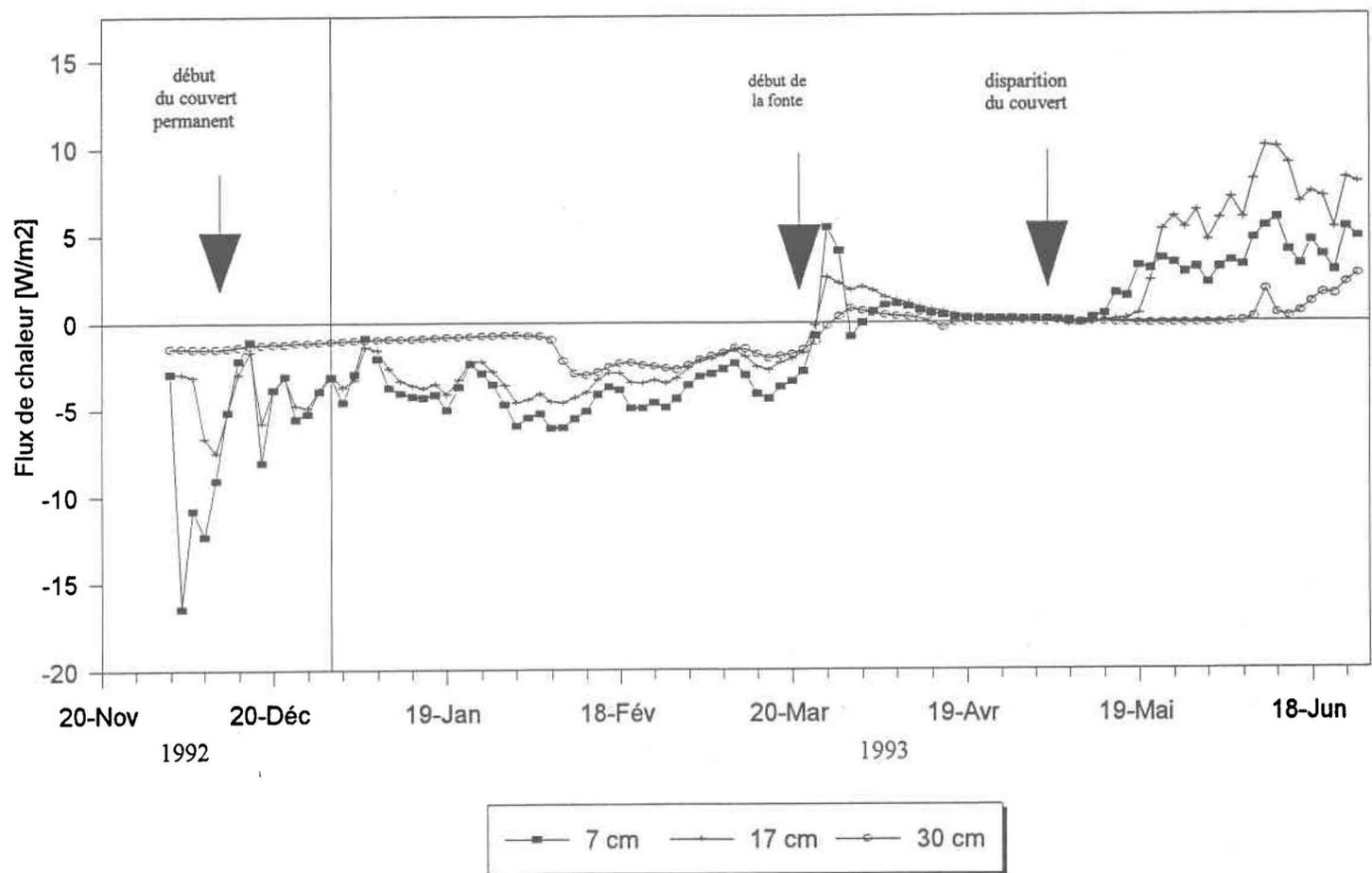


Figure 14. Évolution temporelle des flux de chaleurs du sol sur le sous-site DY aux profondeurs 7, 17 et 30 cm.

À cette profondeur et sur ce sous-site les températures ont atteint le 7 déc. 1992 le minimum de $-3,1^{\circ}\text{C}$. L'exposition du site au sud, la forêt éclairée et les journées ensoleillées ont légèrement ralenti la perte de chaleur des couches minérales du sol par rapport aux sites sur le versant opposé. Le deuxième minimum ($-2,9^{\circ}\text{C}$) est observé à la mi-mars. Lors de la fonte les apports d'énergie par convection égalisent les températures mesurées dans le profil complet du sol. Pour cette période, elles se situent près de $0^{\circ}\text{C} \pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Tableau V. Températures journalières moyennes (durant périodes significatives) du sol aux différentes profondeurs durant l'hiver 1992-93 sur chaque sous-site

COUVERTURE MORTE	SOUS- SITE	PROFONDEUR [cm]	Tmoy 1 déc 92 - 10 jun 93 [$^{\circ}\text{C}$]	Tmoy,accum 1 déc 92 - 23 mar 93 [$^{\circ}\text{C}$]	Tmoy,fonte 24 mar 93 - 10 jun 93 [$^{\circ}\text{C}$]	Tmin 1 déc 92 - 10 jun 93 [$^{\circ}\text{C}$]
Débris	Y	11	-	-	0,1	-2,6
		19	-0,7	-1,1	-0,2	-2,4
		34	-0,3	-0,7	0,2	-1,7
		45	-0,2	-0,2	-0,4	-1,5
		54	-0,1	0,1	-0,4	-1,3
	U	6	-0,4	-2,0	1,9	-3,9
		13	-	-	-	-
		32	-0,5	-0,9	0,0	-2,6
		45	-0,4	-0,7	0,1	-2,4
		51	-0,3	-0,4	-0,1	-2,4
Hypne	N	10	-	-2,1	-	-6,8
		20	-	-1,7	-	-3,8
		30	-	-1,1	-	-2,0
		45	-	-0,3	-	-0,5
		60	-	-0,2	-	-0,5
	W	10	-	-1,6	-	-3,5
		20	-	-0,9	-	-1,4
		30	-	-0,8	-	-1,1
		45	-	-0,4	-	-0,6
		59	-	0,0	-	-0,3
Sphaigne	E	10	-	-1,0	-	-2,7
		16	-	-0,6	-	-0,9
		30	-	-0,1	-	-0,5
		45	-	0,2	-	-0,2
		60	-	0,3	-	-0,2
	H	7	-1,5	-1,5	-	-4,9
		13	-0,3	-0,4	-0,1	-0,7
		21	-	-1,2	-	-3,2
		45	-0,2	-0,2	-0,4	-0,4
		60	-	-	-	-
		S	10	-0,8	-1,6	0,3
	15		-0,8	-1,2	-0,3	-3,2
	30		-0,2	-0,2	-0,3	-0,5
	44		-0,1	0,0	-0,3	-0,4
56	-0,1		0,1	-0,3	-0,3	

- données pour la période non-complètes (bris d'équipement)

L'évolution des températures dans la couche organique est représentée par une courbe ayant deux minima pour le site DU (annexe 10). La même tendance ne peut être confirmée sur l'autre sous-site (DY) à cause du manque de données à cette profondeur. Par contre, les courbes pour la matière minérale ont un seul minimum (avant la fonte). Le premier minimum (-3,1°C) dans la matière organique est atteint durant les conditions caractérisées par les températures basses et par l'absence de neige au sol. Pour cette période le bilan énergétique de cet horizon est négatif. Dès que la neige forme une couche isolante les températures augmentent légèrement en raison des apports énergétiques de la profondeur du sol vers la surface.

Tableau VI. Flux de chaleur du sol journaliers moyens (durant périodes significatives) aux différentes profondeurs durant l'hiver 1992-93 sur chaque sous-site.

COUVERTURE MORTE	SOUS-SITE	PROFONDEUR [cm]	Fmoy 1 déc 92 - 10 jun 93 [W/m ²]	Fmoy,accum 1 déc 92 - 23 mar 93 [W/m ²]	Fmoy,fonte 24 mar 93 - 10 jun 93 [W/m ²]	Fmin 1 déc 92 - 10 jun 93 [W/m ²]
Débris	Y	7	-2,0	-4,5	-3,3	-27,8
		17	-1,0	-3,3	2,2	-8,8
		30	-0,8	-1,5	0,1	-3,0
	U	12	0,3	-2,1	3,8	-9,3
		22	-0,2	-2,8	3,5	-10,2
		31	-0,8	-2,3	1,3	-6,7
Hypne	N	10	-	-2,7	-	-18,8
		20	-	-4,4	-	-29,1
		30	-	-7,4	-	-41,3
	W	7	-	-1,5	-	-8,0
		13	-	-3,5	-	-19,7
		30	-	-2,3	-	-5,8
Sphaigne	E	10	-	-1,7	-	-8,7
		16	-	-3,1	-	-15,6
		30	-	-1,4	-	-4,8
	H	7	-0,6	-4,6	5,4	-37,5
		21	-2,5	-5,0	1,3	-28,4
		30	-2,1	-4,0	0,7	-10,9
	S	10	0,2	-1,1	2,2	-6,7
		20	-1,7	-3,2	0,6	-18,0
		30	-1,7	-2,8	0,0	-6,8

- données pour la période non-complètes (bris d'équipement)

4.2.3 Site HYP

Le gel automnal du sol et de la matière organique décrit pour le site DEBR a été encore plus prononcé sur le site HYP (annexe 10). Durant la première semaine du mois de décembre, *la température à 7 cm de profondeur est descendue exceptionnellement bas* ($-6,8^{\circ}\text{C}$ sur le sous-site HN). Cette température si basse est atteinte grâce aux flux de chaleur du sol élevés (environ 20 W/m^2) dues à l'absence de neige au sol et l'épaisseur de la matière organique relativement faible (10 cm). Les apports d'énergie sont également minimales en raison de la localisation du site sur le versant exposé au nord et de la couverture forestière dense. L'analyse d'une partie des températures n'est pas possible à cause d'un bris du système automatique de l'acquisition des données (CR-10) qui est survenu dans la dernière semaine du mois d'avril.

L'évolution des températures de la matière organique sur le site HYP est représentée par des courbes ayant un seul minimum. Ce minimum a lieu au début du mois de décembre. Par contre, dans la matière minérale (profondeurs 45 et 60 cm) les températures n'ont aucun minimum significatif.

4.2.4 Site SPH

Le site SPH est caractérisé par l'épaisseur de la matière organique supérieure (environ 17 cm) aux deux autres sites. Ce fait se traduit par les températures (annexe 10) plus élevées et une pénétration du gel plus lent par rapport au site HYP qui a des conditions d'ensoleillement et de couverture forestière similaires. Les courbes qui représentent l'évolution des températures durant l'hiver ont une allure semblable au site HYP. Une température minimum est survenue au début du mois de décembre et un léger réchauffement est observé par la suite.

Les flux de chaleurs importants au début de l'hiver (de 10 à 30 W/m^2) diminuent au fur et à mesure que le couvert de neige s'établit sur le bassin et que les échanges thermiques entre le sol et l'air diminuent. Sur l'annexe 11 on distingue (sous-site SE) les flux qui se trouvent au dessous du front de gel et au-dessus. La variation forte des flux qui se trouvent dans la zone du sol gelée et leur évolution beaucoup plus

constante dans les zones non gelées montre que le *front de gel fonctionne comme un amortisseur thermique efficace*.

La hausse de température de la matière organique (10 cm de profondeur) sur le sous-site SE survenue entre le 6 janvier et 9 janvier 93 est due au réchauffement des températures de l'air (températures sur les sous-sites SH et SS ont la même tendance). On peut expliquer la température du sol de 0,3°C par un réchauffement local du sous-site par la radiation. Même si la couverture neigeuse a eu une épaisseur moyenne de 45 cm à cette date, on peut présumer que au début de la période d'accumulation sa distribution a été assez hétérogène.

4.3 Profil hydrique du sol et de la couverture morte; teneur en eau liquide et totale, position de la nappe phréatique

4.3.1 Site DEBR

Les observations de la teneur en eau liquide (θ_L) durant l'hiver 92-93 sont indiquées à la figure 15 et à l'annexe 12 pour les trois sites. Rappelons que la teneur en eau totale et la profondeur de la nappe phréatique ont été mesurées seulement à partir du mois de mars 1992 en raison de l'acquisition tardive de l'appareil gamma. La présence de la glace dans les puits jusqu'à la dernière semaine de mars a empêché des mesures de la profondeur de la nappe phréatique.

Le site DEBR se distingue des autres sites par le gel relativement profond (environ -2°C à 50 cm de profondeur). Ces conditions thermiques du sol se traduisent par θ_L faible (~10%) de la matière minérale durant la période de gel et par le changement de la teneur en eau liquide élevé à proximité du front de gel. Par exemple, sur le sous-site DU à 45 cm de profondeur, θ_L a diminué de 19 % du 25 jan. 93 au 7 mars 93. Le tableau VII montre le changement de la teneur en eau liquide du sol minéral sur les sous-sites DY et DU. En moyenne, la quantité de d'eau liquide diminue de 8,6 % entre ces deux températures considérées: 0°C (immédiatement avant le gel) et -0,5°C.

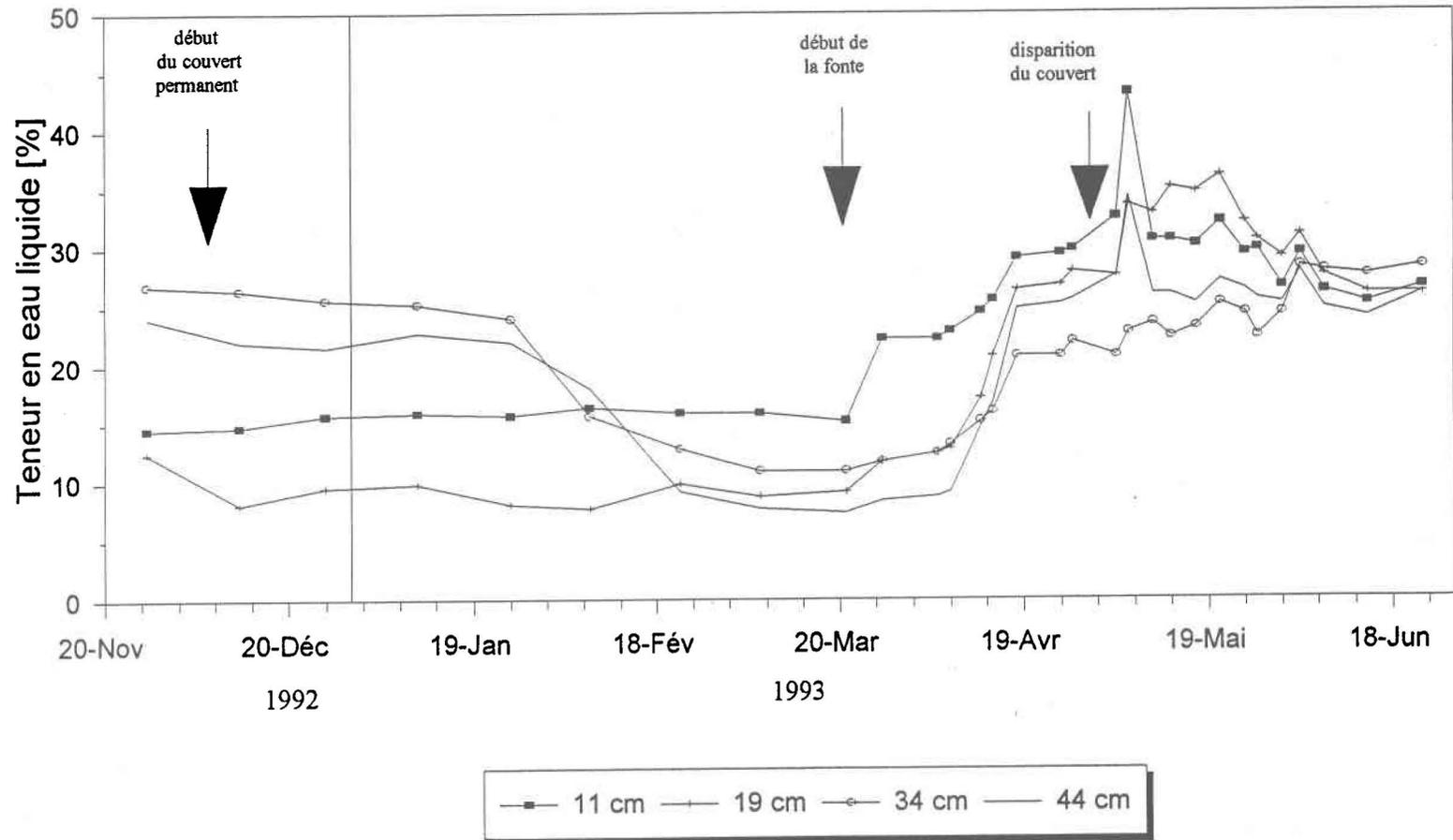


Figure 15. Évolution temporelle de la teneur en eau liquide du sol sur le sous-site DY aux profondeurs 11, 19, 34 et 44 cm.

Soulignons que la discussion plus approfondie du dynamisme du gel dans des matières poreuses est présentée au chapitre 4.6. Quant à la matière organique, la quantité d'eau liquide est plus ou moins constante durant la période d'accumulation. Mentionnons également que la matière organique avait déjà été gelée au début des observations (28 novembre 1992).

Tableau VII. Changement de la teneur en eau liquide du sol minéral entre la température de 0°C et -0,5°C sur le site DEBR.

Sous-site	Profondeur [cm]	θ_L immédiatement avant le gel [%]	θ_L pour la température de -0,5°C [%]	Différence $\theta_{L, 0^\circ\text{C}} - \theta_{L, -0,5^\circ\text{C}}$ [%]
DY	34	27	15	12
DY	44	16	8	8
DU	32	26	13	13
DU	45	24	17	7
DU	51	19	16	3
Moyenne	41,2	22,4	13,8	8,6

La fonte de la neige (à partir de fin mars) et les apports d'eau liquide sont responsables d'une augmentation de θ_L (environ 10 %) dans tout le profil du sol. Le dégel du sol (début du mois de mai) est suivi par une autre augmentation de θ_L (atteignant 25 % dans la couche de matière organique). Les valeurs maximales de θ_L près de la surface du sol atteint environ 45%. Lors de la fonte, la saturation atteint 100% pour une courte durée et la nappe phréatique s'approche de la surface du sol sur tous les sites. Cependant, aucun écoulement de surface n'a été observé visuellement.

La fluctuation de la position de la nappe phréatique (annexe 13) sur le site DEBR est importante. Durant la période d'accumulation la nappe se situait au-dessous de la partie inférieure des puits, soit 70 cm. Dès la deuxième semaine de fonte (le 10 avril), une montée de la nappe est observée à 30 cm de profondeur. En général, sur les deux sous-sites (DY, DU), l'évolution temporelle de la position de la nappe est la même. La seule exception est observée du 24 au 27 avril, pendant les jours où le gel et dégel suivent un cycle quotidien.

Étant donné que les températures, durant l'hiver, sont inférieures à 0°C dans tout le profil mesuré (profondeur 0-60 cm), une partie de l'eau a été transformée en glace. La quantité de glace contenue dans le sol (θ_G) sur le sous-site DY est montrée sur la

figure 16¹. On y observe une faible augmentation (7 %) de θ_G vers la mi-avril dans la matière organique sur ce sous-site. Par contre, sur le sous-site voisin (DU) aucune augmentation semblable de θ_G n'est observée (annexe 14). Cette période est caractérisée par les cycles gel-dégel approchés avec les températures allant de -8°C (nuit) à 8°C le (jour). La glace perdue dans le sol jusqu'à la disparition de la couverture neigeuse (5 mai). Après cette date, sur le sous-site DY, le θ_G diminue rapidement (rappelons que l'ensoleillement sur ce site est supérieur aux autres sites) à tous les niveaux du profil.

4.3.2 Site HYP

Le site HYP (annexe 12) montre une diminution de θ_L dans le sol minéral plus tardive que sur le site DEBR. Suite à la fonte, on observe une augmentation constante de θ_L à tous les niveaux du sol. Cette hausse est plus accentuée dans la matière organique sur le sous-site HN. Du 22 mars au 25 mai, le θ_L a augmenté de 34 %. La capacité au champ plus importante sur le site HYP a permis une rétention d'eau plus élevée et pendant plus longtemps que sur DEBR. L'augmentation de θ_L de la matière minérale très brusque (16 % en 4 jours) et sa propagation vers la surface (8 avril à 59 cm, 15 avril à 45 cm, 28 avril à 30 cm) indique une remontée de la nappe phréatique. Ces observations sont aussi confirmées avec la position de la nappe qui est montrée à l'annexe 13. La proximité de la nappe (3 cm) de la surface du sol sur le sous-site HN lors de la disparition de la neige a été causée par une légère dépression topographique dans lequel le dispositif de mesure a été localisé.

Le peuplement dense, l'exposition vers le nord et l'absence de rayonnement ont contribué à la disparition plus tardive et plus lente (fin de mai) de la glace du sol (annexe 14). La matière organique (mousses hypnacées) se démarque par la teneur en glace élevée (environ 50 % au début de la fonte) des autres horizons. Selon ces données, les couches profondes (60 cm) n'ont pas été significativement affectées par le gel. Ces observations sont aussi en accord avec les données de températures sur ce site. Aucune augmentation printanière de la glace du sol due au cycle gel-dégel n'a été observée sur les sous-sites HN et HW.

¹ Les valeurs sont présentées telles que mesurées et calculées. La teneur en glace négative est causée par l'imprécision de la méthode.

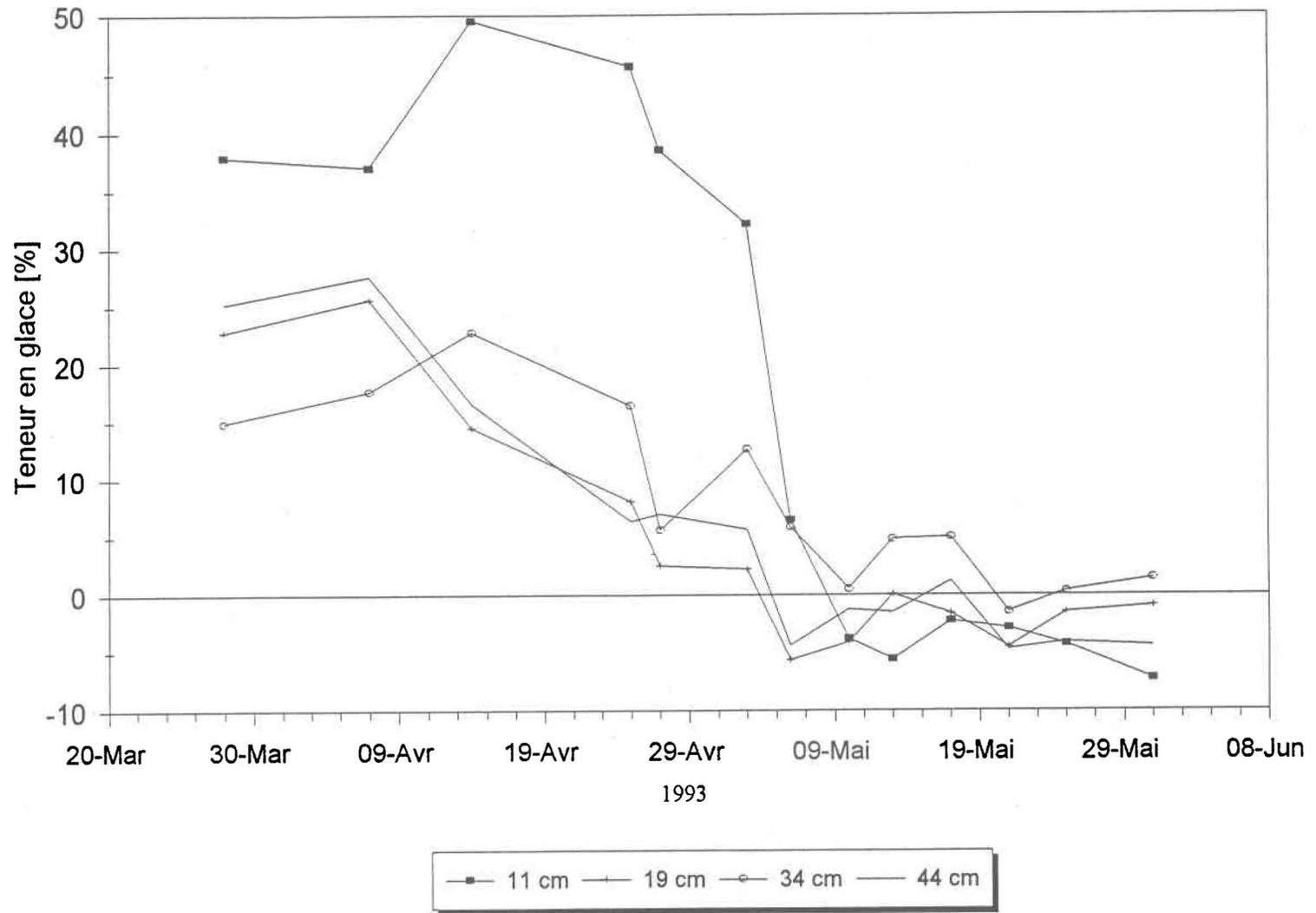


Figure 16. Évolution temporelle de la teneur en glace du sol sur le sous-site DY aux profondeurs 11, 19, 34 et 44 cm.

4.3.3 Site SPH

Durant les périodes d'accumulation et de fonte de la neige (novembre - mai) le site SPH (annexe 12) ne montre presque aucune variation du θ_L dans la matière minérale (profondeur de 40 à 60 cm). Ses valeurs augmentent légèrement (de 5 %) à mi-avril. Cependant, la matière organique subit des changements sensiblement plus importants. Une fois gelée, la teneur en eau se maintient autour de 15 % jusqu'au début de la fonte. Après cette période, on observe une augmentation du θ_L de 5 % vers le 15 avril et une autre, beaucoup plus prononcée, de 30 à 50 % vers le 10 mai. Ces valeurs maximales de θ_L sont atteintes au moment du dégel de chaque couche du sol et par la suite elles diminuent rapidement.

Après une stagnation hivernale dans les profondeurs non mesurables par les installations utilisées, une augmentation importante (jusqu'à 70 cm) du niveau de la nappe phréatique (annexe 13) est observée dès le début de la fonte. Durant la fonte la nappe est localisée à environ 15 cm de la surface du sol et sa position subit peu de variations.

Les courbes d'évolution de θ_G montrent nettement l'effet de l'influence du rayonnement. Sur les sous-sites SE et SS, plongés continuellement dans l'ombre, la disparition de la glace du sol se produit plus tard d'une à deux semaines environ¹. Par contre, sur le sous-site SH qui est partiellement exposé au soleil, on observe la fonte complète de la glace dès le 25 mai. Comme mentionné précédemment, sur le site SPH, la température dans le sol minéral est voisine de 0°C durant la période d'accumulation. En général elle varie de +1 à -0,2°C pour le sous-site SE et entre +0,2 et -0,2°C pour les sous-site SH et SS.

4.4 Capacité d'infiltration du sol

Comme mentionné précédemment, la capacité d'infiltration du sol joue un rôle prédominant dans le processus de ruissellement. L'état des infiltromètres qui ont été recouverts par la neige, a été vérifié sporadiquement durant la fonte afin de ne pas

¹ La date exacte de disparition de glace du sol sur les sous-sites SE et SS n'est pas connue à cause du manque des données.

perturber excessivement le milieu. Selon les observations effectuées à l'aide d'une tige d'acier la matière organique du sol a été gelée sur tous les sous-sites étudiés. Les observations effectuées dès la première semaine de fonte de la neige indiquent la présence d'eau liquide à la base de la majorité des infiltromètres. Tenant compte des sondages à la tige et de ce fait, on peut conclure que le gel du sol a été de type compact et le taux d'infiltration a été très faible ou égal 0. Les seules exceptions ont été observées sur un infiltromètre (#3) localisé sur DEBR et sur un autre (#6) situé près de sous-site SS (site SPH).

En raison du gel, seulement ces deux infiltromètres (#3 et #6) ont été aptes à subir des **tests de la capacité d'infiltration** du sol. L'évolution de ce paramètre dans le temps est montrée à la figure 17. L'essai sur le dispositif #3 a été effectué le 29 mars 1993 (une semaine après le début de la fonte). La forme de la courbe nous indique une infiltration plus élevée (4 mm d'eau par min.) durant les quelques premières minutes et par la suite sa diminution constante. Selon la classification (Gray, 1972) cette allure de la courbe représente un *sol gelé à une faible teneur en eau*. Malheureusement, le manque des données du début de l'hiver 1992-93 ne permet pas de vérifier cette confirmation. Probablement, seulement une partie des pores est remplie par la glace et elle dégèle progressivement avec le mouvement d'eau. La saturation graduelle du sol est mise en évidence par le ralentissement léger de la capacité d'infiltration observée dans la deuxième partie du test. Les observations des taux d'infiltration supérieures de la matière organique (9,6 mm par min. en moyenne) sont rapportées par Prévost *et al.* (1990)¹ sur le même bassin versant. Cependant, ces auteurs ont mesuré une diminution de la capacité d'infiltration pour la matière minérale (3,6 mm par min.).

Lors d'un essai réalisé plus tard (le 26 avril) on remarque, sur le même site, un *accroissement important du taux d'infiltration*. Au début de ce test les valeurs de vitesse d'arrivée d'eau se situent près de 9,5 mm par min. Une faible diminution (7 mm par min.), survenue entre la 20ème et la 40ème minute, est suivie par une montée considérable (14 mm par min.).

¹ La capacité d'infiltration a été mesuré pour les conditions estivales.

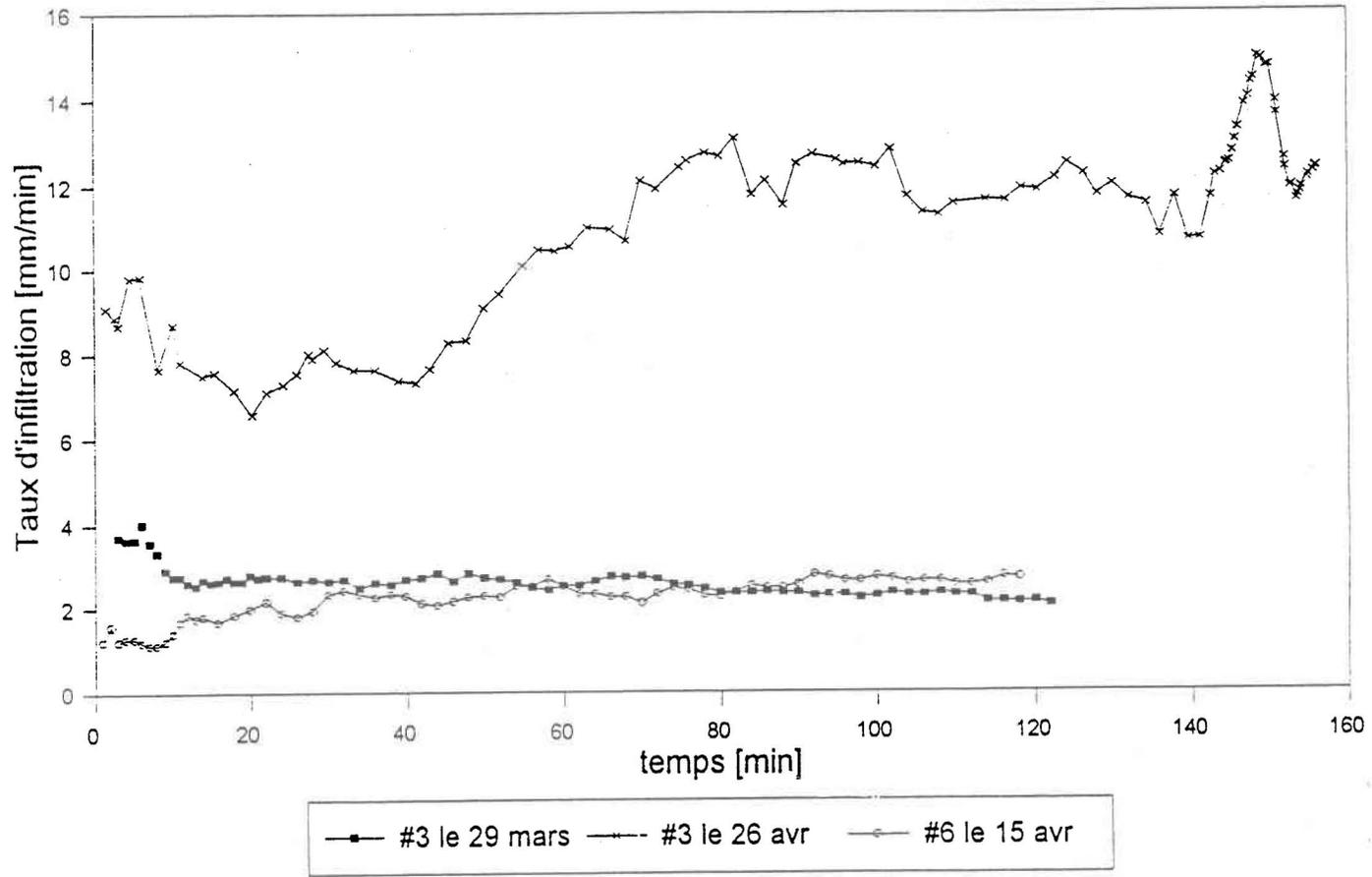


Figure 17. Capacité d'infiltration du sol mesurée durant l'hiver 1992-93 sur infiltromètre #3 (DEBR) et #6 (SPH).

L'inégalité entre les courbes obtenues aux différentes dates démontre une diminution de la teneur en glace du sol d'environ 20% entre le 29 mars et 26 avril 1993, et par conséquent, une amplification de la capacité d'infiltration du sol. Étant conscient du faible nombre d'observations, il est fortement probable que la diminution de la capacité d'infiltration à la fin de mois de mars a été causée par la glace contenue dans le sol. Les tests sur le sous-site DY effectués durant l'hiver 1992-93 indiquent que la diminution de la teneur en glace de 21% (entre 29 mars et 26 avril) à la profondeur de 19 cm se traduit par l'augmentation de la capacité d'infiltration d'environ 8 mm/min. Par contre, pour la même période, la quantité de glace de la matière organique (à 11 cm) est restée sensiblement égale. Ces observations laissent prétendre que durant la fonte, *l'infiltration du sol n'est pas contrôlée par les couches superficielles du sol*. Rappelons que ces déductions ne s'appuient que sur la quantité d'échantillons non suffisante pour pouvoir tirer des conclusions générales.

Le test sur l'infiltromètre #6 a été accompli le 15 avril. La forme de la courbe d'infiltration indique le même type de processus que lors des tests effectués sur le site #3. La vitesse d'arrivée de l'eau à la surface du sol, au début est faible (1 mm d'eau par min.), et s'accroît d'une façon régulière et constante pour atteindre les valeurs de 3 mm par min.

4.5 Comparaison des propriétés hydrologiques et thermiques des couvertures mortes

Le but de cette partie est d'**intégrer et discuter les résultats** des quatre sections précédentes en faisant ressortir l'effet des principales couvertures mortes présentes dans la forêt boréale sur ses propriétés thermiques et hydrologiques.

Afin de comparer les températures du sol aux mêmes profondeurs théoriques (10, 20, 30, 45 et 55 cm), nous avons interpolé entre les valeurs mesurées. Les moyennes journalières ont été calculées pour les périodes significatives durant la saison d'étude sur les trois couvertures mortes. Cette comparaison est mise en évidence à la figure 18. En harmonie avec les prévisions, cette figure montre une diminution de la température du sol vers la surface sol-neige durant l'hiver 1992-93 sur les trois sites étudiés. Par contre, des différences importantes sont observées au niveau de la vitesse de la propagation du gel et de la profondeur maximale atteinte par ce dernier

pour chaque milieu (figure 13 et annexe 10). La température minimale atteinte sur le site couvert par la sphaigne est sensiblement supérieure aux autres sites. Également, de façon plus détaillée, les températures moyennes journalières à 30 cm pour les trois sites, soit DEBR, HYP et SPH sont montrées sur la figure 19. Le site DEBR se distingue nettement des autres sites par les températures minimales qui ont été atteintes. Elles sont descendues jusqu'à $-1,8^{\circ}\text{C}$ avant la fonte (22 mars). Durant la période d'accumulation de neige, les variations de températures du sol sur le site HYP sont élevées. Cette variable fluctue entre $-0,9$ et $-0,2^{\circ}\text{C}$. La même variation on observe dans les couches supérieures de ce site. Donc on peut présumer que cela a été causé par la diminution locale de la capacité isolante de la couverture neigeuse (affaiblissement, accumulation hétérogène, activité biologique à proximité des senseurs). Les températures sur le site SPH descendent au-dessous du point de congélation pour une courte période de 5 février à 3 avril 1993.

Une synthèse de résultats (niveau de la nappe, température de matière organique, teneur en eau totale et liquide) pour chaque site (DEBR, HYP, SPH) est montrée à l'annexe 8. Les mêmes paramètres sont mis en évidence pour chaque sous-site séparément à l'annexe 9. Une chute de température très prononcée ($3,5^{\circ}\text{C}$ en deux jours) est observée dans la matière organique au début du mois de décembre sur le site HYP (annexe 10). Les autres sites (DEBR et SPH) révèlent une baisse de ce paramètre nettement moins importante. Ceci est probablement causé par les apports thermiques, par la radiation et par l'épaisseur et la capacité isolante de la matière organique plus élevée sur le site DEBR et SPH respectivement.

Les données témoignent d'une autre différence entre les couvertures mortes: les **températures** de cet horizon sur le site HYP augmentent régulièrement dès janvier 1993; néanmoins, sur le site DEBR on observe un léger réchauffement suivi par une baisse atteinte juste avant la fonte. Le faible réchauffement a été probablement provoqué par l'augmentation de la température de l'air et par la mise en place d'une couche de neige de 40 cm environ. Cette couche a ralenti les pertes de chaleur de la matière organique vers la surface et par conséquent les apports thermiques provenant du sol ont augmenté les températures. Les températures observées à 10 cm et 20 cm ont pratiquement la même évolution temporelle. Cependant, les températures à 20 cm sont plus modérées. Comme déjà mentionné, c'est le site *DEBR* qui se démarque constamment des autres sites par la diminution des températures durant la période de l'accumulation de la neige maximale (février et mars).

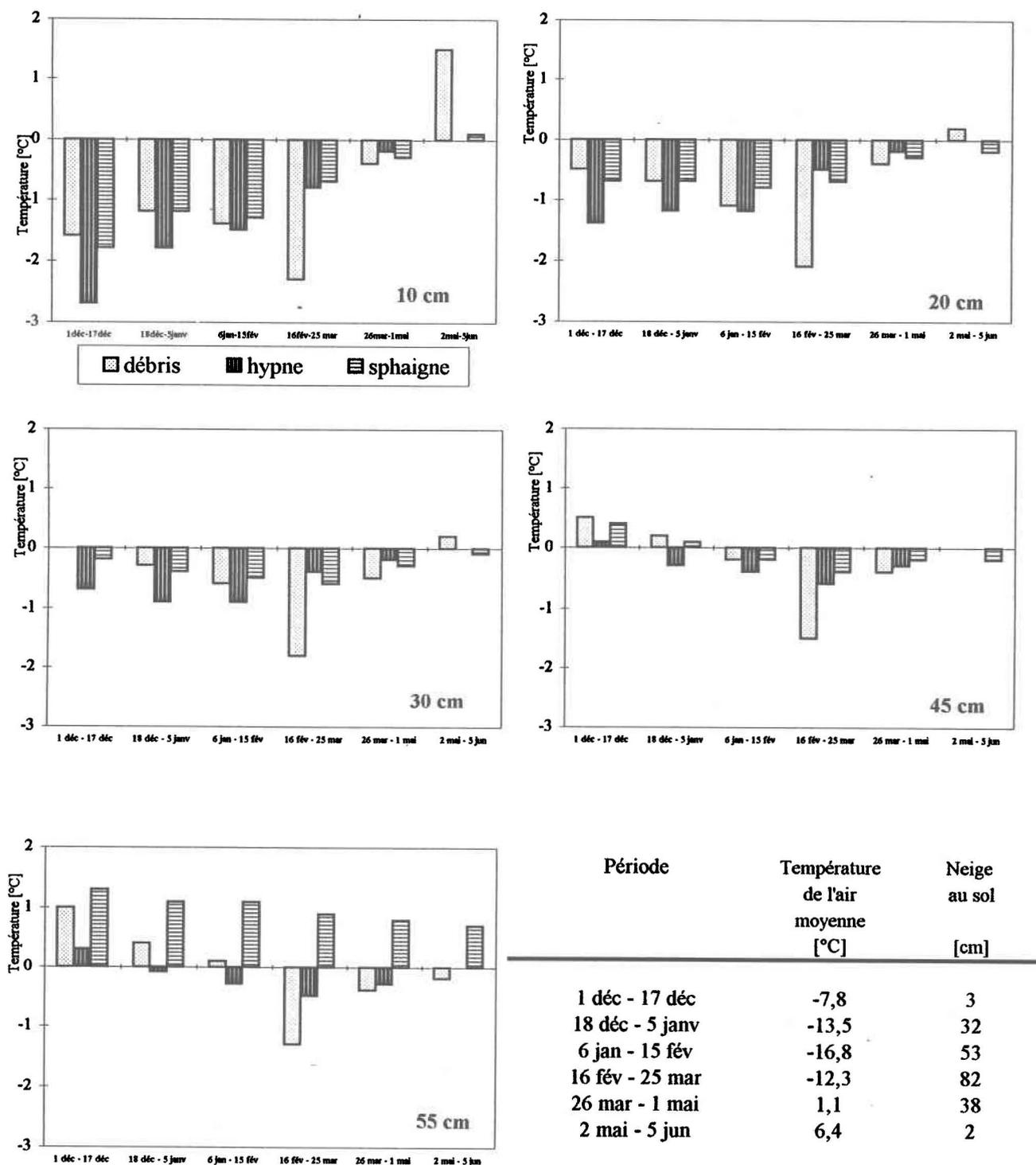


Figure 18. Comparaison des températures de différentes profondeurs du sol sur les sites DEBR, HYP et SPH pour les périodes typiques durant l'hiver 1992-93.

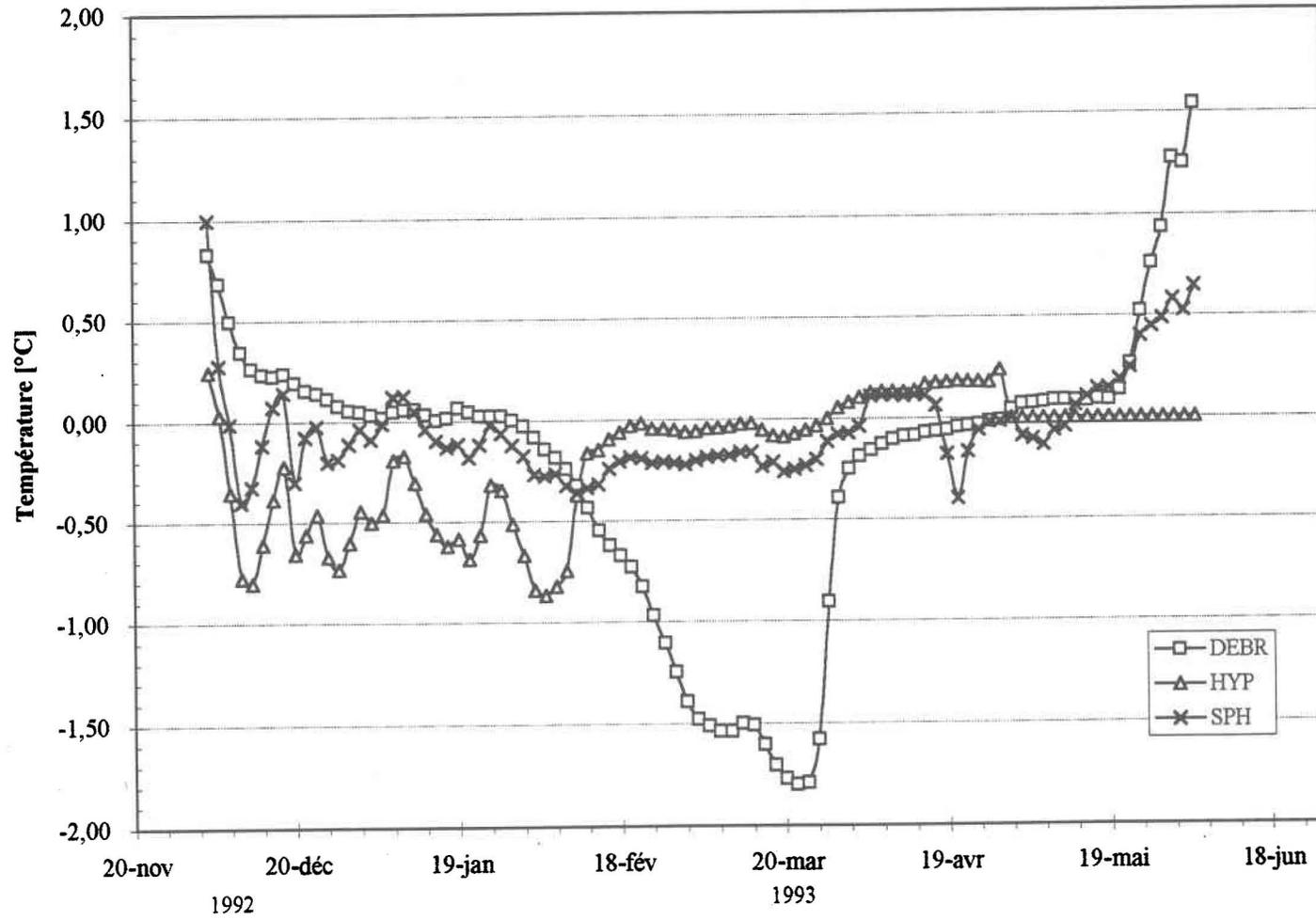


Figure 19. Températures moyennes journalières enregistrées à 30 cm de profondeur sur les sites DEBR, HYP et SPH durant l'hiver 1992-93.

Les observations montrent que la **matière minérale** subit les écarts saisonniers de température plus faibles que les couches supérieures du sol. Ces dernières ne descendent presque jamais au-dessous de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ à 30 cm de profondeur sur le site HYP et le site SPH. Encore une fois, uniquement le site DEBR montre les températures qui se rapprochent de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. À l'exception du site HYP à 30 cm (annexe 10), les minima absolus de température ont lieu juste avant la fonte. Cela signifie un *refroidissement continu du sol durant l'hiver*. Au cours de l'expérience, un incident provoqua la perte de données sur une unité d'enregistrement automatique, ce qui empêche de comparer les températures printanières du sol.

L'hétérogénéité du sol forestier se reflète clairement dans les observations des **flux de chaleur du sol**. La variation de ce paramètre est grande d'un sous-site à l'autre. La présence des cavités, roches, racines ou d'autres types de matériel créant des voies de chaleur préférentielles, ou par contre, des zones moins conductrices thermiquement, peuvent expliquer un tel phénomène. Malgré ces variations, la comparaison révèle que sur le site DEBR, les flux de chaleur de la matière organique sont les plus forts (en moyenne $-3,5\text{ W/m}^2$) durant la période d'accumulation de neige, suivis par le site HYP et SPH (-2 W/m^2).

L'analyse des profondeurs maximales qui ont été atteintes par le **gel**, révèle que les trois couvertures mortes manifestent des dissimilitudes importantes. Le niveau de gel sur le site DEBR dépasse 55 cm de profondeur. Cependant le front de gel s'est arrêté à 45 cm et à 40 cm sur HYP et SPH respectivement. Ces différences ne peuvent être expliquées seulement par l'épaisseur du manteau nival (sur le site SPH l'accumulation a été de 10 % supérieure aux autres sites). C'est ainsi que cette différence de profondeur de gel entre les types de couvertures mortes pourrait corroborer l'hypothèse de départ (... *sphaigne, les mousses hypnacées et le sol couvert par les débris végétaux sont des types de couvertures mortes ayant un impact différent sur la génération du ruissellement...*). De plus, cette hypothèse est renforcée par les résultats de la comparaison des conductivités thermiques apparentes calculées pour chaque type de couverture morte (figure 20). Le site couvert par les débris végétaux se dissocie des autres par la variation et valeurs élevées de la conductivité durant les mois de janvier et février qui atteint jusqu'à $1,2\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. Le paramètre concerné montre des valeurs à peu près constantes de 0,3 et 0,5 $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ pour le site SPH et HYP respectivement. Donc, encore une fois c'est le site DEBR qui se sépare incontestablement par les valeurs relativement différentes de ce paramètre. L'écart,

qu'il montre, est grand; de 0,4 à 1,2 W/m²K. Comme déjà mentionné, les valeurs sur HYP et SPH restent constantes et aucun changement de la conductivité en fonction de la température n'est observé.

L'étude de **profils hydriques** montre une faible quantité d'eau liquide présente dans la matière organique durant la période hivernale sur tous les sites. Les valeurs de la teneur en eau liquide oscillent entre 8 et 18 % dans l'horizon concerné. Cependant, les mesures prises dans la matière minérale indiquent les variations importantes d'un site à autre. Faible (10 % environ) sur le site DEBR, la teneur en eau liquide est déjà plus élevée sur HYP (20 %) et des valeurs maximales (40 %) sont mesurées sur le site SPH. Comme sur le site SPH le niveau du gel se situe près de 40 cm de profondeur, on peut conclure que ces différences sont probablement causées par la profondeur de gel et ainsi que par le gel d'une partie de l'eau liquide. Étant donné la porosité du sol réduite par la glace, l'eau provenant de la fonte de neige et des précipitations printanières provoque la remontée de la nappe phréatique plus rapide durant cette période que durant la période estivale.

Il est à noter qu'une des **propriétés de l'eau** dans les corps poreux est qu'elle gèle à des températures inférieures à 0°C. Il n'y a pas de température unique de congélation de l'eau dans le sol (Williams, 1967). Au fur et mesure que la glace se forme, le degré de congélation descend au-dessous de 0°C. Une chaleur de fusion latente est donc en cause lors du changement de température couvrant quelques degrés au-dessous de 0°C. La chaleur latente et chaleur spécifique constituent ensemble une chaleur apparente spécifique.

Les chaleurs spécifiques apparentes varient d'un sol à l'autre. Elles sont grandes dans les sols argileux et plus faibles dans les sols organiques. La détermination précise de la température de gel est difficile, surtout à cause de plusieurs facteurs qui influencent la congélation de l'humidité se trouvant dans le sol. Malgré une très grande variabilité spatiale de la quantité de glace contenue dans les sols du bassin du Lac Laflamme, on observe que les *couvertures mortes ayant la porosité plus élevée (densité et épaisseur plus faible) montrent un pourcentage volumique de glace plus fort*. Par exemple: au début de la fonte on remarque des teneurs en glace allant de 35 % sur le versant exposé au sud (site DEBR) et 45 % sur le site HYP et à plus de 60 % sur la sphaigne (SPH).

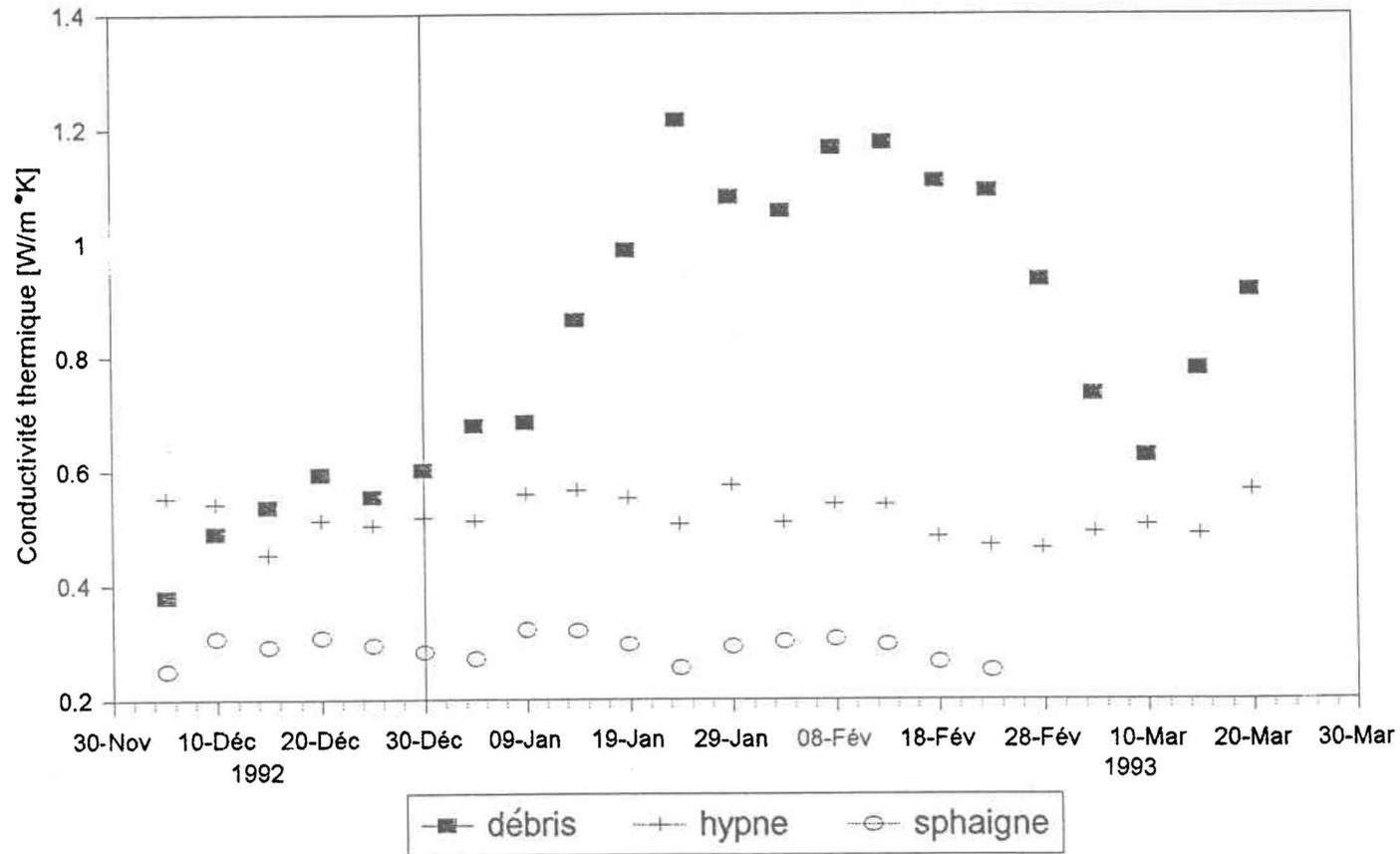


Figure 20. Évolution temporelle de la conductivité thermique du sol pour les trois principales couvertures mortes durant la période d'accumulation (hiver 1992-93).

La date de disparition de la glace est plus avancée (première semaine de mai) sur le versant nord (site DEBR) que sur les sites HYP et SPH où les traces de glace dans le sol perdurent jusqu'au début de juin. Ces observations sont aussi confirmées par les résultats de l'inventaire de type de glace effectué au niveau de tout le bassin à l'aide d'une tige d'acier.

En général, la *couverture morte sur les sites dominés par les débris végétaux contient moins de glace* (50% dans la matière organique) durant la période d'accumulation et la période de fonte que les sites couverts par la sphaigne (jusqu'à 80%). Selon les données récoltées, ces différences sont engendrées par les conditions hydriques inégales sur les deux types de sites. Les préférences vitales de la sphaigne tel que l'adaptation aux milieux humides et l'exigence de la proximité de la nappe sont responsables de sa distribution spatiale (annexe 3). Donc, la quantité de la glace plus élevée sur cette couverture, est causée par un plus grand volume d'eau disponible dans le milieu. Ainsi pour la sphaigne, la géologie, le régime et les propriétés hydriques de cette couverture morte sont simultanément responsables de la teneur en glace plus élevée.

Comme la capacité d'infiltration du sol est étroitement reliée à la porosité on peut présumer que les sols ou matières organiques ayant une teneur en glace élevée favorisent plus d'écoulement de surface. Les observations effectuées sur les infiltromètres aux sites SPH et HYP confirment cette supposition. En général, la capacité d'infiltration sur ces sites a été très faible même après la disparition du couvert. *Le sol du site DEBR montre une infiltration plus forte* et l'augmentation de ce paramètre plus rapide.

L'intégration de ces résultats indique *des différences importantes entre les principales couvertures mortes* (sol couvert par les débris végétaux, mousses hypnacées et sphaigne) au point de vue hydrologique et thermique. En général le site *DEBR se distingue visiblement des autres sites*. Le niveau de gel plus profond, les températures et les flux de chaleur plus bas, la porosité (limitée par la glace contenue dans le sol) réduite et les délais de réponses plus courtes aux événements météorologiques sont les propriétés qui le dissocient le plus.

4.6 Volet de modélisation

L'analyse et la prédiction des propriétés hydrologiques, physiques et chimiques du sol et de la neige, ainsi que les processus qui les relient ensemble étaient souvent des objectifs de recherches sur le bassin du Lac Laflamme (Prévost *et al.*, 1990, 1991, Barry *et al.*, 1988, 1990, Roberge *et al.*, 1985). En général, pour ce type de problème, les modèles numériques sont utilisés. La connaissance des propriétés du milieu et leur distribution dans le temps et l'espace sont un atout pour les modèles utilisant une approche physique du processus. Les observations de cette recherche confirment un certain nombre de principes:

- le bassin versant devrait être subdivisé selon ses propriétés physiques et non selon un treillis orthogonal. Cette division du bassin doit être adaptée pour chaque paramètre étudié. Naturellement, cette contrainte amène la modélisation à une complexité supérieure;
- les propriétés physiques et hydrologiques du sol et de la neige devront être évaluées (dans impossibilité, vérifiées) dans son milieu naturel;
- la complexité de l'écosystème de la forêt boréale demande une approche multidisciplinaire (hydrologue, chimiste, biologiste ...).

L'étude a démontré une *grande variation des propriétés physiques et hydrologiques de la matière organique* et du sol minéral en fonction de sa température et la couverture morte. Par exemple: la diminution de la teneur en eau liquide survenue après une baisse de température est beaucoup plus forte sur des sites dominés par la sphaigne que sur les sols couverts par des débris végétaux (annexe 12). Comme bien des propriétés, la conductivité thermique apparente, le paramètre ayant une influence importante aux échanges énergétiques entre le sol, la neige et l'air, dépend aussi de la couverture morte et de sa teneur en eau liquide (figure 20). Elle est la plus faible pour la sphaigne et plus forte pour les mousses hypnacées et pour le sol couvert de débris végétaux.

Pour les fins de modélisation, il serait intéressant d'examiner l'hypothèse suivante: Pendant la fonte printanière, lorsque la couverture neigeuse devient mince ou discontinue, et que simultanément, les températures nocturnes descendent vers -10°C, une couche de glace se forme sur la surface du sol. Rappelons que cette

couche de glace pourrait diminuer, de façon importante, la capacité d'infiltration du sol et ainsi accentuer les pics de l'hydrogramme. Durant l'hiver 1992-93, les conditions appropriées pour valider l'hypothèse mentionnée précédemment sont survenues entre 23 et 25 avril. Les températures journalières ont monté à 5°C et la température nocturne a atteint le minimum de -9,2°C. Pour ces journées, le manteau nival était disparu sur environ 40 % de la superficie sur les versants exposés au sud et sur 10% sur les pentes opposées. L'équivalent en eau de la neige était de 10 cm et 13 cm pour les versants orientés au sud et au nord respectivement.

Les paramètres importants pour la modélisation des processus de gel dans les sols sont la teneur en eau liquide et la conductivité thermique apparente. Examinons ces variables en fonction de la température du sol respective. L'évolution de la **teneur en eau liquide** du sol minéral pour les températures voisines de 0°C est montrée à la figure 21.

Malheureusement, on ne dispose pas de données pour la matière organique puisqu'elle était déjà gelée au début de mois de décembre. Les valeurs mesurées ont été comparées avec celles calculées à l'aide de relations empiriques présentées par Flerchinger (1987).

$$\theta_L = \theta_S \cdot \left[\frac{\frac{L_f T}{T + 273,16} + cRT_K}{g\psi_e} \right]^{-1/b} \quad \dots 4.1$$

où:	θ_L	teneur en eau liquide [cm ³ /cm ³]
	θ_S	porosité du sol [cm ³ /cm ³]
	L_f	chaleur latente de l'eau [335 000 J/kg]
	T	température [°C]
	c	concentration de sels dans l'eau [moles/kg]
	R	constante universelle [8,3243 J/moles/°K]
	T_K	température [°K]
	g	accélération gravitationnelle [9,81 m/s ²]
	ψ_e	potentiel du sol [m]
	b	paramètre du sol [-]
	ρ_b	densité [g/cm ³]

La valeur de c a été estimée à 0,008 moles/kg pour l'ensemble du profil.

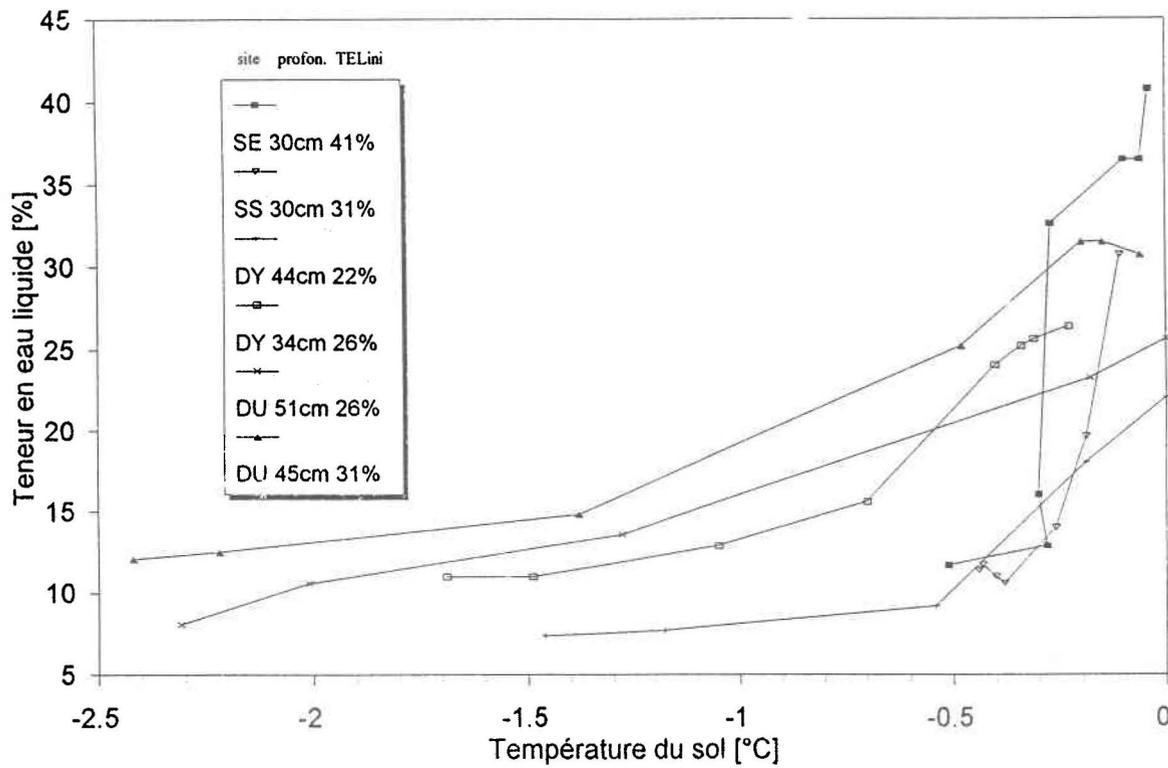


Figure 21. Relation entre la teneur en eau liquide du sol et sa température mesurée durant l'hiver 1992-93.

$$\psi_e = (\psi_{es}/g)(\rho_b/1,3)^{0,67b} \quad \dots 4.2$$

Le paramètre b est déterminé selon:

$$b = -2\psi_{es} + 0,2\sigma_g \quad \dots 4.3$$

où: ψ_{es} potentiel du sol pour la densité de 1,3 g/cm³ [J/kg], ($\psi_{es} = -0,2 d_g^{-0,5}$)
 σ_g écart-type [mm]
 d_g moyenne géométrique du diamètre des particules [mm]

Campbell (1985) présente les relations suivantes; m_a , m_s et m_{sa} étant les pourcentages respectives de la fraction de l'argile, du silt et du sable:

$$d_g = \exp [m_a \ln (0,001) + m_s \ln (0,026) + m_{sa} \ln (1,025)]$$

$$\sigma_g = \exp [m_a \ln (0,001)^2 + m_s \ln (0,026)^2 + m_{sa} \ln (1,025)^2]$$

Ces pourcentages ont été estimés lors de prélèvement des d'échantillons du sol pour les analyses gravimétriques. Le tableau VIII présente les résultats du calcul des paramètres empiriques, ainsi que le tableau IX montre la comparaison des teneurs en eau théoriques avec celles mesurées. En moyenne on observe pour les températures de -0,3 et -1,5°C des faibles différences entre les valeurs mesurées et observées (0,3 % et 3%). Par contre, pour chaque cas, les écarts sont plus considérables. Elles se situent entre -8 et 7%. Il est également à noter une relative sensibilité du modèle. À titre indicatif, la diminution de la température de -0,2 à -0,3°C se traduit par le changement de θ_L de 2% et une augmentation de la porosité de 10% par une réponse de 3%.

Tableau VIII Caractéristiques du sol.

Argile [%]	Silt [%]	Sable [%]	d_g [mm]	ψ_{es} [J/kg]	σ_g [mm]	σ_b [g/cm ³]	b	ψ_e [m]
20	45	35	0,049	-2,26	0,01	0,60	4,5	-0,08

Tableau IX Comparaison de la teneur en eau calculée et mesurée sur différents sous-sites.

Sous-site	Profondeur [cm]	Porosité [%]	θ_L à $-0,3^\circ\text{C}$ (calculée) [%]	θ_L à $-1,5^\circ\text{C}$ (calculée) [%]	θ_L à $-0,3^\circ\text{C}$ (mesurée) [%]	θ_L à $-1,5^\circ\text{C}$ (mesurée) [%]	Différence à $-0,3^\circ\text{C}$ (c-m)	Différence à $-1,5^\circ\text{C}$ (c-m)
SE	30	75	19	13	20	n.d.	-1	n.d.
SS	30	75	19	13	12	n.d.	7	n.d.
DY	44	85	21	15	16	8	5	7
DY	34	75	19	13	24	11	-5	2
DU	51	87	22	15	22	13	0	2
DU	45	85	21	15	29	14	-8	1
Moyenne							-0,3	3,0

La **conductivité thermique apparente** pour les sites dominés par les différentes couvertures mortes est montrée à la figure 22. Les sites HYP et SPH montrent les valeurs de ce paramètre assez constante. Elles atteignent environ 0,5 et 0,3 W/m^{°K} respectivement sur le site HYP et SPH. Par contre, le site DEBR présente l'évolution hystérèsique. Comment expliquer cette relation non unique pour le gel et dégel? On sait que la conductivité thermique apparente est environ quatre (4) fois plus élevée pour la glace que pour l'eau liquide. Au début de l'hiver, quant les températures sont près de 0°C, la teneur en eau liquide est relativement importante. Ceci se traduit par une conductivité thermique apparente modérée. Par la suite, au fur et à mesure que les températures diminuent, le rapport entre la glace et l'eau liquide augmente. Donc, la conductivité augmente. Selon les prévisions, lors du processus inversé, la conductivité devrait diminuer dans la même proportion. En concordance avec la théorie, la figure 22 montre une augmentation de la conductivité jusqu'à la température de $-1,5^\circ\text{C}$. Dans ce point la conductivité atteint son maximum de 1,2 W/m^{°K}. Par la suite, même si la température du sol diminue encore, la conductivité plafonne et subitement diminue. Puisque la quantité de glace dans le sol a encore augmenté on ne peut pas expliquer ce phénomène par le rapport eau-glace. Malheureusement, on ne peut pas éclairer ce comportement à l'aide des instrument employés durant cette étude. Deux solutions sont possibles: les imprécisions causées par l'évaluation de la conductivité tel que élaborée au chapitre 3.2.2.7 ou la présence d'autres processus non mesurables par la méthodologie employée.

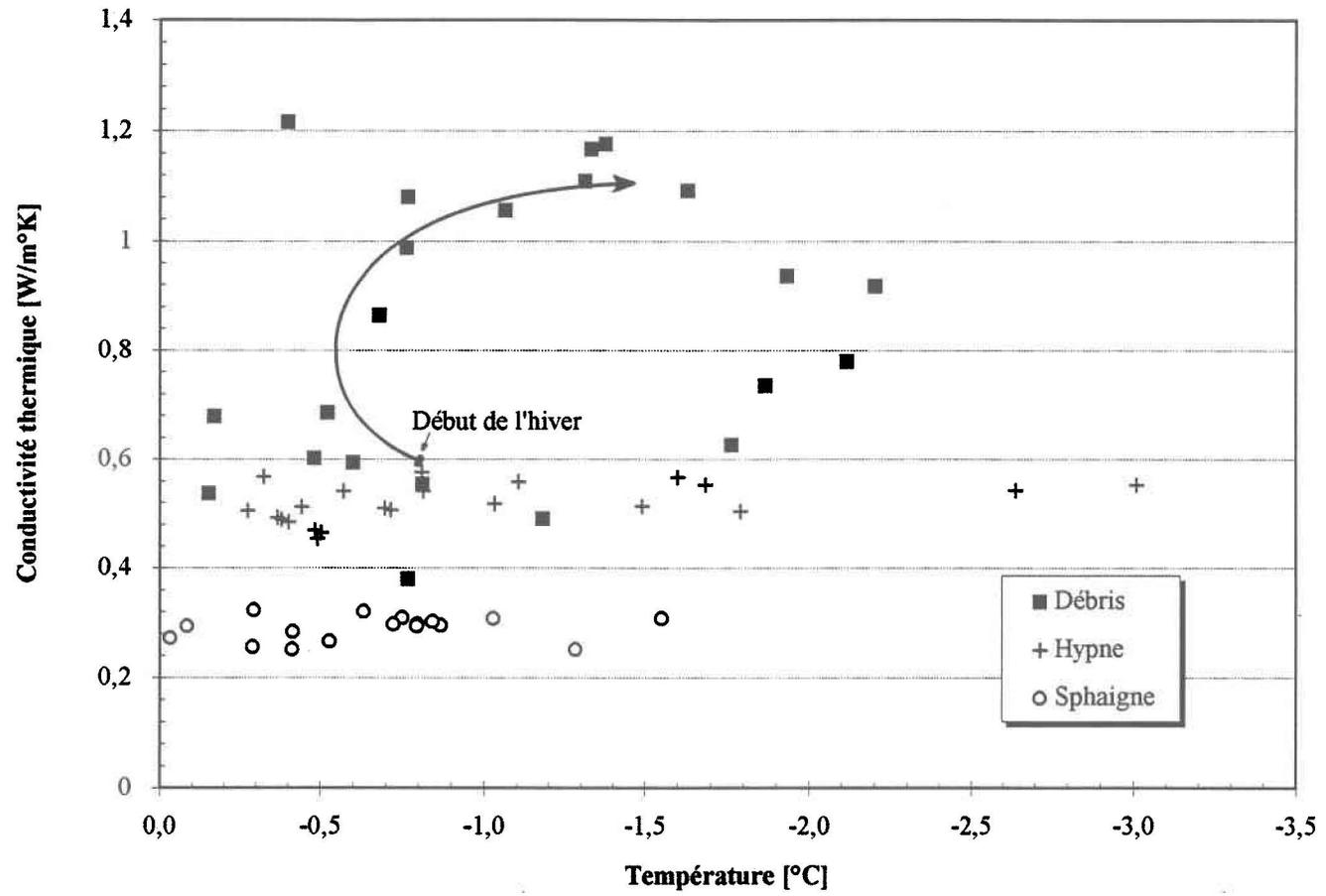


Figure 22. Relation entre la conductivité thermique de différentes couvertures mortes et la température du sol.

À cause du manque d'instruments de mesure sur la **surface du sol**, il n'est pas possible de tirer des conclusions claires sur les processus hydrologiques et thermiques sur la surface du sol. Les thermistors qui sont situés dans la matière organique entre 6 et 11 cm de profondeur, n'indiquent que des variations non-significatives de températures (de $-0,05^{\circ}\text{C}$ à $+0,05^{\circ}\text{C}$) pour la période de fonte (figure 13). Il va de même pour les flux de chaleur (figure 14). L'homogénéité des valeurs indique que dans les premières couches de la matière organique, l'eau a été présente dans les deux états simultanément durant la majeure partie de la fonte. Rappelons que la chaleur latente de l'eau est relativement élevée et par conséquent, *la matière organique saturée et partiellement gelée réagit comme un amortisseur thermique très efficace*. Selon les observations visuelles effectuées le 28 avril 1993, la présence d'une couche de glace de 5 cm environ a été constatée dans les parties inférieures du bassin, à proximité du lac. En conclusion; les observations effectuées durant la période d'étude ne donnent pas de réponse claire à l'hypothèse soulevée dans le paragraphe précédent.

Un paramètre d'entrée important dans les modèles hydrologiques du bassin versant est la **capacité d'infiltration du sol**. Un des objectifs de cette étude a été d'examiner cette variable par rapport aux couvertures mortes. Comme mentionné précédemment, les sites couverts par la sphaigne sont de nature plus humide que ceux dominés par les mousses hypnacées ou les débris végétaux. Étant donné que la nappe phréatique est plus près de la surface du sol sur la sphaigne, il est probable que l'eau provenant de la fonte ou de pluie va saturer le sol plus rapidement sur ce type de couverture. De plus, à cause des exigences pour les sites plus humides, les sites dominés par la sphaigne ont en général une pente plus faible que les autres couvertures. Les dépressions locales permettent la rétention temporelle de l'eau de surface et même si la capacité d'infiltration est plus faible, la génération de ruissellement sur la sphaigne peut être inférieure aux autres couvertures mortes. Il est à souligner une *grande hétérogénéité du parterre forestier*. Encore un fois, nous ne pouvons donner les réponses claires sur ce sujet. Les infiltromètres utilisés se sont avérés plus ou moins efficaces, principalement à cause de l'impossibilité d'évaluation de la capacité d'infiltration du sol sur les parcelles représentatives. Rappelons finalement que l'infiltromètre à double anneau exige un terrain assez uniforme pour son implantation.

5. CONCLUSION

Les résultats obtenus lors de l'étude indiquent *que la sphaigne, les mousses hypnacées et le sol couvert par les débris végétaux sont des couvertures mortes ayant des propriétés thermiques, physiques et hydrologiques différentes.* Par conséquent, ces trois couvertures mortes ont un impact différent sur le cycle dynamique du gel-dégel et sur la génération du ruissellement de surface durant la fonte printanière dans la forêt boréale.

L'hiver 1992-93 est caractérisé par *la mise en place d'une couverture neigeuse tardive et d'une fonte avancée* par rapport à la moyenne. Pour cette période, aucun redoux et pluie n'a été observé entre le 14 décembre 92 et le 22 mars 93. La distribution spatiale de la neige sur le bassin montre la grande variabilité de son équivalent en eau et sa densité. Durant la période hivernale, la mesure des températures dans le profil de neige indique que les gradients thermiques atteignent en moyenne 0,2°C/cm. Cependant, au printemps le métamorphisme diminue ces valeurs jusqu'à l'égalisation des températures dans tout le profil.

Une quantité importante *de glace dans la matière organique est reliée aux événements automnaux.* Cette glace perdure dans le sol durant l'hiver sans des changements majeurs. La distribution et le type de gel sont reliés à plusieurs caractéristiques; le type de couverture morte, l'exposition du site et le couvert forestier sont les principales. Le gel de type compact est observé, sur une période plus longue, au-dessous des jeunes peuplements. Ce type de gel perdure également plus longtemps sur les versants exposés au nord. On observe également, que dans les *couvertures dominées par les débris, le gel est de type légèrement plus poreux et sa disparition est plus hâtive* que sur celles dominées par les mousses hypnacées et la sphaigne.

L'étude de profils thermiques du sol indique *que la profondeur et la vitesse de propagation du gel sont différentes pour chaque type de couverture morte.* La couverture morte dominée par la sphaigne montre une profondeur du front de gel faible (40 cm) et un avancement lent. Par contre, le sol couvert par les débris végétaux gèle rapidement dans tout le profil. Les conditions thermiques du sol ont

une influence directe sur son bilan hydrique. La teneur en eau liquide, faible dans les couches gelées du sol, augmente vivement lors de la fonte printanière. La teneur en glace est plus forte dans la sphaigne (60 %) suivi par des mousses hypnacées (45 %) et le sol couvert par les débris végétaux (35 %).

Lors de la fonte, l'écoulement de surface se produit sur des parcelles localisées. Cependant, à cause de l'hétérogénéité du parterre forestier, on observe peu de ruissellement de surface à la grandeur du bassin. Cela indique que de façon globale, pour le printemps 1993, les apports d'eau à la base du couvert de neige s'infiltrent dans le sol.

Dans le but d'augmenter la valeur scientifique des recherches ultérieures mentionnons finalement quelques erreurs qui ont été commises par l'auteur. Nous nous permettons également de soulever quelques suggestions qui pourront être utiles pour la planification d'études ultérieures de la dynamique de formation de la glace du sol dans la forêt boréale:

- pour cette étude, la prise de données a commencé trop tard (début de décembre). Le gel du sol était passablement avancé et, par conséquent, il a été impossible de suivre les processus hydrologiques qui accompagnent cette période. Pour la même raison, la relation entre la teneur en eau liquide et la température du sol pour les différentes couvertures mortes n'a pas pu être déterminée de façon précise;
- l'évaluation du type de gel dans les couvertures mortes telle que utilisée durant la période d'étude 1992-93 ne donne pas, à notre avis, une bonne représentation de la capacité d'infiltration du sol, ce qui avait été supposée. L'hypothèse que la capacité d'infiltration dépend de la résistance mécanique du sol devrait être révisée. De plus, la subjectivité de la méthode est considérable. Il sera donc préférable, pour les recherches ultérieures, d'utiliser ou de développer une technique plus objective;
- l'utilisation du système gamma qui a servi pour l'évaluation de la teneur en eau totale est difficile durant les basses températures et, pour les

températures de -15°C , pratiquement impossible. Une certaine expérience est également nécessaire à l'opérateur;

- les dispositifs pour mesurer la capacité d'infiltration du sol qui ont été utilisés permettent de mesurer ce paramètre que sur une superficie très restreinte. De plus, la localisation du dispositif est souvent déterminée par la nature du parterre forestier. Par exemple, les infiltromètres ne peuvent pas être placés à côté des arbres, dans les zones d'accumulation de débris non décomposés, sur une pente forte, etc. Ultérieurement, il sera donc souhaitable d'utiliser les techniques qui sont plus représentatives pour l'ensemble du bassin versant;
- étant donné la forte hétérogénéité du parterre forestier, l'évaluation de la température pour chaque couche du sol à l'aide d'un seul thermistor est insuffisante. De plus, afin de faciliter l'installation du dispositif de mesure, ces thermistors ont été placés à l'extérieur du volume du sol considéré par le dispositif gamma et TDR. Également, la précision d'évaluation de la température théorique ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) ne peut être considérée comme la précision de mesure atteinte "in situ". Dorénavant, il sera donc préférable pour ce type de dispositif, de munir chaque couche de sol de plusieurs senseurs de température. Cependant, une augmentation considérable du nombre de senseurs se traduira par des dispositifs d'acquisition des données plus importants et par le traitement de données plus fastidieux.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Barry, R., Plamondon, A.P. et Stein, J., "Hydrologic soil properties and application of a soil moisture model in a balsam fir forest", Can. J. For. Res. **18**, 1988 pp. 427 - 434.
- Barry, R., Prévost, M., Stein, J. et Plamondon, A.P., "Simulation of snowmelt runoff pathways on the Lac Laflamme watershed", Journal of Hydrology, Vol. 113, 1990, pp. 103 - 121.
- Campbell, G.S., "Soil physics with basic: transport models for soil-plant systems", Elsevier Science Publishing Co., Amsterdam, 1985, 150 pages.
- Flerchinger, G.N, "Simultaneous heat and water model of a snow-residue-soil system", Thèse de doctorat, Washington State Univ., Pullman, 1987, 138 pages.
- Gray, D., "Manuel des principes d'hydrologie", Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, 1972, 722 pages.
- Kane, D.L. et Stein, J., "Plot measurements of plot Snowmelt runoff for varying soil conditions", Geophysica 1984, Vol. 20, No. 2, pp. 123-135.
- Kane, D.L. et Stein, J., "Physics of snowmelt infiltration into seasonally frozen soils," Proceedings of the National conference on advance in infiltration, American society of agricultural engineers, December 12-13 1983a, Chicago, pp. 178-187.
- Kane, D.L. et Stein, J., "Field evidence of groundwater recharge in interior Alaska. Proceedings of the fourth international conference on permafrost. Fairbanks, Alaska. July 17-22, National Accademy Press. 1983b. pp 572-577.

- Kane, D.L. et Stein, J., "Water movement into seasonally frozen soils", Water Resources Research, Vol. 19, No 6, 1983c, pp. 1547 - 1557.
- Macdonald, L. H., "Forest harvest, snowmelt and streamflow in the central Sierra Nevada, IAHS, No. 167, 1987, pp. 273-283.
- Maulé, C.P. et Stein J., "Hydrologic flow path definition and partitioning of spring meltwater", Water Resources Research, Vol. 26, No 12, 1990, pp. 2959 - 2970.
- Pepin, S., Plamondon, A.P. et Stein, J., "Peat water content measurement using time domain reflectometry", Can. J. For. Res. 22, 1991, pp. 534 - 540.
- Plamondon, A.P., Prévost, M. et Naud, R.C., "Accumulation et fonte de la neige en milieux boisé et deboisé, géographique physique et Quartenaire", Vol. XXXVIII, 1984, pp. 27-35.
- Proulx, S., "Importance des événements météorologiques hivernaux sur la formation de la glace dans le sol", Thèse de maîtrise, Université Laval, 1992, 167 pages.
- Prévost, M., Barry, R., Stein, J. et Plamondon, A.P., "Snowmelt modeling in a balsam fir forest; comparison between an energy balance model and other simplified models", Can. J. For. Res. 21, 1991, pp. 1-10.
- Prévost, M., Barry, R., Stein, J. et Plamondon, A.P., "Snowmelt runoff modelling in a balsam fir forest with a variable source area simulator (VSAS2)", Water Resources Research, Vol. 26, No. 5, 1990, pp. 1067-1077.
- Prévost, M., Barry, R., Stein, J. et Plamondon, A.P., "Évolution du couvert de neige et des profil hydrique et thermique du sol dans un bassin de la sapinière laurentidienne", Journal of Hydrology, 107, 1989 pp. 347-366.

- Roberge, J. et Plamondon, A.P., "Snowmelt runoff pathways in boreal forest hillslope, the role of pipe throughflow", Journal of Hydrology, 95, 1987, pp. 39-54.
- Roberge, J., Jones, H.G. Stein, J. et Sochanska, W., "An integrated model of Snowmelt quality for boreal forest sites", Annual eastern snow conference, Montreal, June 6-7 1985, pp. 69-83.
- Roberge, J., Stein, J. et Plamondon, A.P., "Évaluation d'un modèle de fonte nivale en forêt boréale", Journal of Hydrology, 97, 1988, pp. 161 - 179.
- Stanké, A., Encyclopédie du Canada. Alain Stanké, Montréal, 1987, 2445 pages.
- Stein, J. et Kane, L.D., "Monitoring the unfrozen water content of soil and snow using time domain reflectometry", Water Resources Research, Vol. 19, No 6, 1983, pp. 1573-1584.
- Stein, J., Jones, H.G., Roberge, J. et Sochanska, W., "The prediction of both runoff quality and quantity by the use of an integrated snowmelt model", Proceedings of the Budapest Symposium, IAHS Publ. no 155, 1986, pp. 347-358.
- Stein, J., Proulx, S. et Lévesque, D., Forest floor frost dynamics during snowmelt in a boreal forested basin. Water Resources Research, 30, (4), 1994, pp. 995-1007.
- Sturm, M., "Snow distribution and heat flow in the taiga", Arctic and Alpine research, Vol. 24, No. 2, 1992.
- Sturm, M. et Johnson, J.B., "Natural convection in the natural snow cover" Journal of geophysical research, Vol. 96, No. B7, July 10, 1991, pp. 11657-11671.
- Topp, G.C., Davis, J.L. et Annan, A.P., "Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial Transmission lines", Water Resources Research, Vol. 16, No 3, 1980, pp. 574 - 582.

Williams, P.J., "Experimental determination of apparent specific heats of frozen soils", National Research Council, Ottawa, 1967, pp. 133-142.

7. ANNEXES

ANNEXE 1

Cédule de prise de mesures pour la période d'étude 1992-93.

Cédule de prise de mesures

Lac Laflamme, hiver 1992-93

	Étude extensive		Étude intensive									
	Type de gel	Paramètres quantitatifs de la neige	Paramètres qualitatifs de la neige	Température de l'air	Température du sol	Température de la neige	Flux de chaleur du sol	Teneur en eau liquide	Teneur en eau totale	Profondeur de la nappe phréatique	Capacité d'infiltration du sol	Hauteur de la neige
28-nov								D,H,S				D,H,S
29-nov												
30-nov												
01-déc												
02-déc												
03-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
04-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
05-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
06-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
07-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
08-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
09-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
10-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
11-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
12-déc	Bas			D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				D,H,S
13-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
14-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
15-déc		Bas.		D,S	D,H,S	S	D,H,S					
16-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
17-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
18-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
19-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
20-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
21-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
22-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
23-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
24-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
25-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
26-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					D,H,S
27-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				
28-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
29-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
30-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
31-déc				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
01-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
02-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
03-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
04-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
05-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
06-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
07-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
08-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
09-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
10-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
11-jan			Bas.	D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				D,H,S
12-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
13-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
14-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
15-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
16-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
17-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
18-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
19-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
20-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
21-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
22-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
23-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
24-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
25-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
26-jan		Bas.	Bas.	D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				D,H,S
27-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
28-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
29-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
30-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
31-jan				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
01-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
02-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
03-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
04-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
05-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
06-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
07-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
08-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				
09-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					D,H,S
10-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
11-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					

Lac Laflamme, hiver 1992-93

	Étude extensive		Étude intensive									
	Type de gel	Paramètres quantitatifs de la neige	Paramètres qualitatifs de la neige	Température de l'air	Température du sol	Température de la neige	Flux de chaleur du sol	Teneur en eau liquide	Teneur en eau totale	Profondeur de la nappe phréatique	Capacité d'infiltration du sol	Hauteur de la neige
12-fév	Bas.			D,S	D,H,S	S	D,H,S					
13-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
14-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
15-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
16-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
17-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
18-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
19-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
20-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
21-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
22-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
23-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				D,H,S
24-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
25-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
26-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
27-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
28-fév				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
01-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
02-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
03-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
04-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
05-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
06-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
07-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
08-mar			Bas.	D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				D,H,S
09-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
10-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
11-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
12-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
13-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
14-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
15-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
16-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
17-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
18-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
19-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
20-mar		Bas.		D,S	D,H,S	S	D,H,S					
21-mar			Bas.	D,S	D,H,S	S	D,H,S					
22-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S				
23-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					D,H,S
24-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
25-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
26-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
27-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
28-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S		D,H,S		
29-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S		D		D	
30-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
31-mar				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
01-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
02-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
03-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
04-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
05-avr	Bas.		Bas.	D,S	D,H,S	S	D,H,S					
06-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S		D,H		D,H,S
07-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
08-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S		D,H,S			
09-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
10-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
11-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
12-avr		Bas.		D,S	D,H,S	S	D,H,S					
13-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S		D,H,S		D,H,S
14-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
15-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,H,S	D,H,S	S	D,H,S
16-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
17-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
18-avr		Bas.		D,S	D,H,S	S	D,H,S					
19-avr	Bas.			D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S		D,H,S		D,H,S
20-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
21-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
22-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
23-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
24-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
25-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
26-avr		Bas.		D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D		D	D,H,S
27-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
28-avr	Bas.			D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,H,S	D,H,S		
29-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					

Lac Laflamme, hiver 1992-93

	Étude extensive		Étude intensive									
	Type de gel	Paramètres quantitatifs de la neige	Paramètres qualitatifs de la neige	Température de l'air	Température du sol	Température de la neige	Flux de chaleur du sol	Teneur en eau liquide	Teneur en eau totale	Profondeur de la nappe phréatique	Capacité d'infiltration du sol	Hauteur de la neige
30-avr				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
01-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
02-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
03-mai		Bas.		D,S	D,H,S	S	D,H,S					
04-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,H,S	D,H,S		D,H,S
05-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
06-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,H,S	D,H,S		D,H,S
07-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
08-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
09-mai		Bas.		D,S	D,H,S	S	D,H,S					
10-mai	Bas.			D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,H,S	D,H,S		D,H,S
11-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
12-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
13-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D	D,H,S		
14-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
15-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
16-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
17-mai	Bas.			D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D	D,H,S		
18-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
19-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
20-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
21-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,H,S	D,H,S		
22-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
23-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
24-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
25-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,S	D,H,S		
26-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
27-mai	Bas.			D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	S	H,S		
28-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
29-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
30-mai				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
31-mai	Bas.			D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D,S			
01-jun				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
02-jun				D,S	D,H,S	S	D,H,S					
03-jun				D,S	D,H,S	S	D,H,S	D,H,S	D	D,H,S		
04-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
05-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
06-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
07-jun				D,S	D,H,S		D,H,S	D,H,S				
08-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
09-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
10-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
11-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
12-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
13-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
14-jun				D,S	D,H,S		D,H,S	D,H,S		D,H,S		
15-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					
16-jun				D,S	D,H,S		D,H,S					

Légende:

- Bas.** Prise de mesures extensives au niveau de tout le bassin versant du Lac Laflamme
- D** Prise de mesures intensives sur le site dominé par les débris végétaux
- H** Prise de mesures intensives sur le site dominé par les mousses hypnacées
- S** Prise de mesures intensives sur le site dominé par la sphaigne

ANNEXE 2

**Profils verticaux du sol pour les trois principales couvertures
mortes.**

DÉBRIS VÉGÉTAUX

		Surface du sol		Densité volumique [g/cm ³]
9 cm	O	Matière organique		0,11
6 cm	A ₂	Sol minéral, gris		0,78
3 cm	B ₂₁	Humus foncé		0,49
10 cm	B ₂₂	Sable brun		0,56
	C	Sable jaune + pierre		0,86 et plus

MOUSSES HYPNACÉES

		Surface du sol		
12 cm	O	Matière organique		0,10
7 cm	A ₂	Sol minéral, gris		0,79
4 cm	B ₂₁	Humus foncé		0,75
12 cm	B ₂₂	Sable brun		0,90
	C	Sable jaune + pierre		1,1 et plus

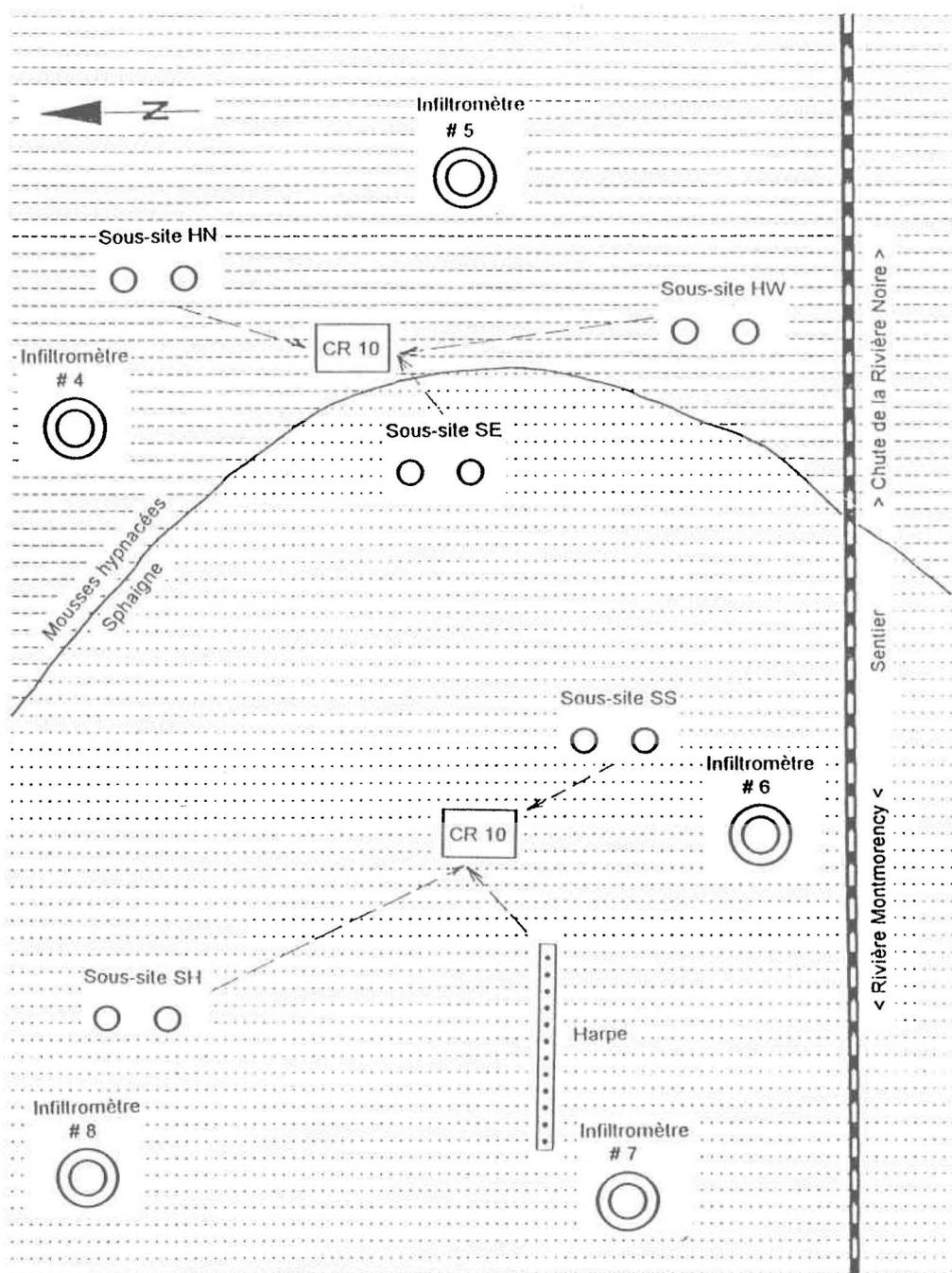
SPHAIGNE

		Surface du sol		
18 cm	O	Matière organique		0,08
4 cm	A ₂	Sol minéral, gris		0,90
3 cm	B ₂₁	Humus foncé		0,69
10 cm	B ₂₂	Sable brun		0,80
	C	Sable jaune + pierre		1,19 et plus

Selon Pritchett (1976)

ANNEXE 3

Carte schématique des sites HYP et SPH.

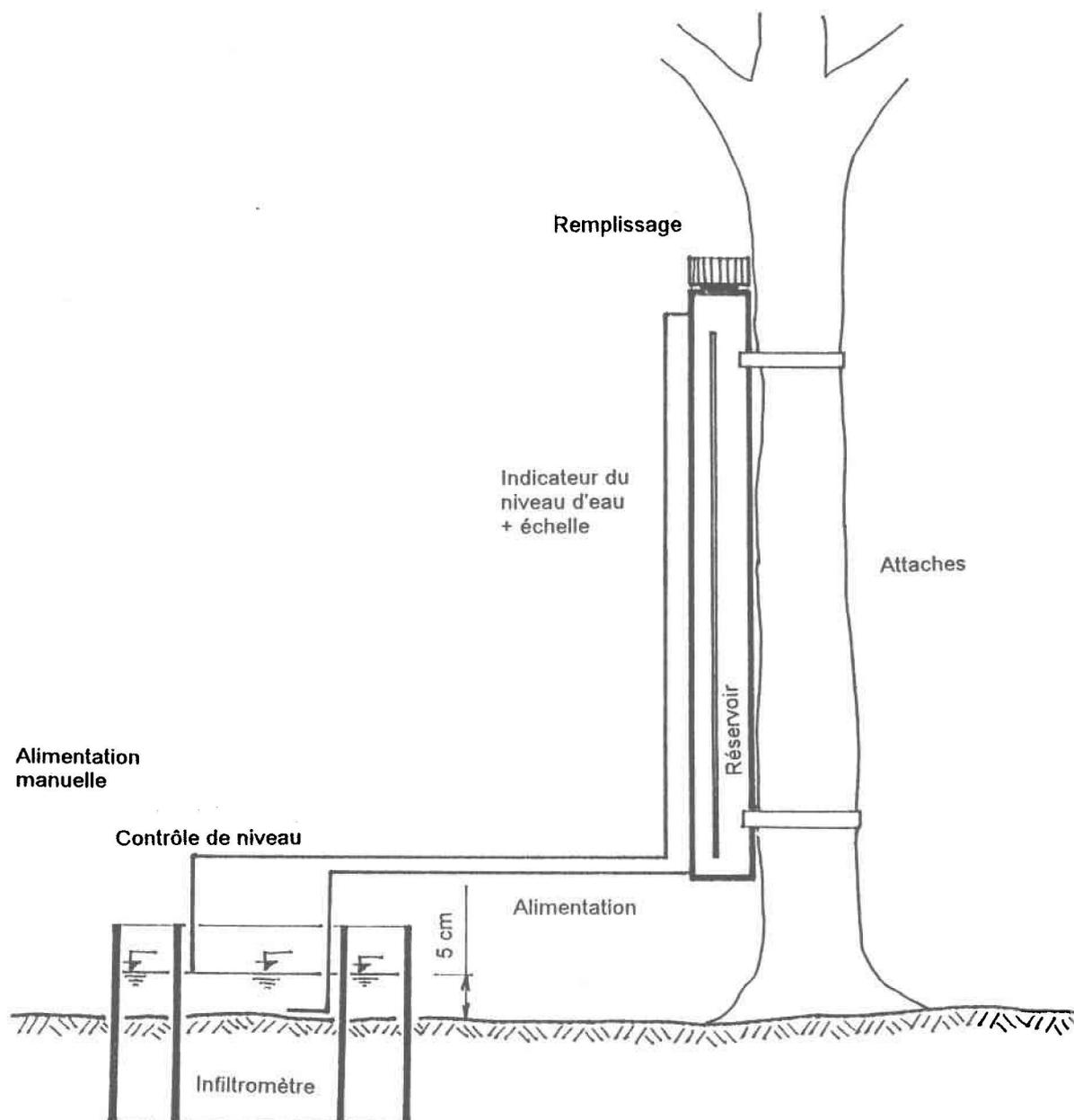


Échelle

1 : 100
(1cm = 1m)

ANNEXE 4

Plan du système d'alimentation en continue des infiltromètres.



ANNEXE 5

Accumulation de la neige sur chaque sous-site.

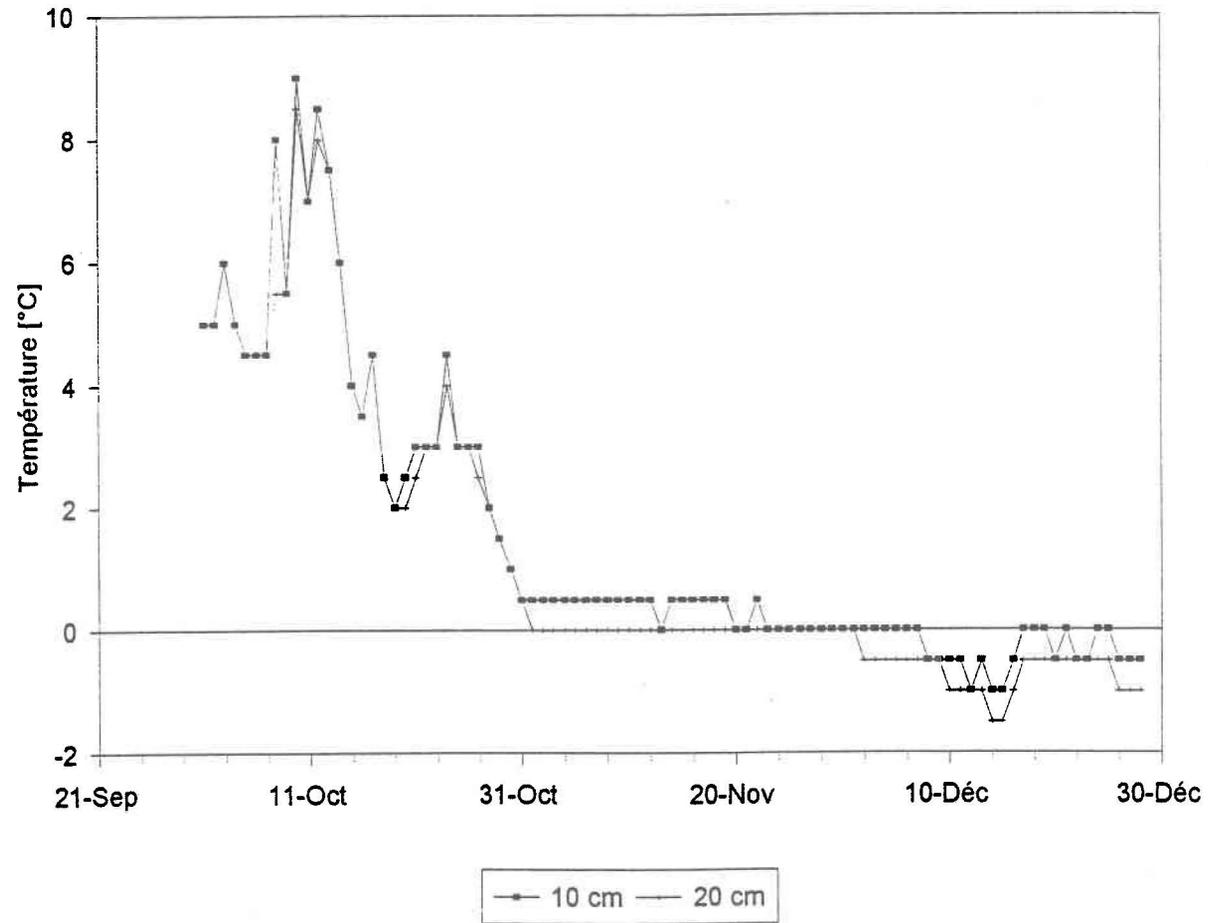
HAUTEUR DE LA NEIGE SUR LES SOUS-SITES
(accumulation de la neige mesurée directement sur les tubes de gamma)
(hauteurs sont en cm)

Lac Laflamme 1992-1993

DATE	DY [cm]	DU [cm]	HN [cm]	HW [cm]	SE [cm]	SH [cm]	SS [cm]
28-nov	0	0	0	0	0	0	0
12-déc	4	2	1	3	10	3	12
26-déc	28	39	28	35	39	32	35
11-jan	38	45	31	40	49	42	46
26-jan	46	50	44	47	58	48	50
09-fév	58	61	55	69	74	55	71
23-fév	76	78	65	82	92	73	85
08-mar	75	72	63	76	87	72	84
23-mar	98	97	85	92	110	103	112
06-avr	41	49	50	61	80	62	70
08-avr	33	43	46	56	75	58	68
13-avr	16	32	32	51	60	42	58
15-avr	10	33	30	45	55	40	50
19-avr	7	1	20	31	42	29	33
26-avr	5	5	25	45	38	35	30
04-mai	0	0	0	5	21	2	27
06-mai	0	0	0	0	0	0	4
10-mai	0	0	0	0	0	0	0

ANNEXE 6

**Températures du sol à 10 et 20 cm de profondeur à la Station
climatologique de la Forêt Montmorency pour les mois
d'octobre à décembre 1992.**



Températures du sol à 10 et 20 cm de profondeur à la Station climatologique de la Forêt Montmorency pour les mois d'octobre à décembre 1992.

ANNEXE 7

Type de gel; moyennes et écart-types.

Type de gel

(1 gel poreux, 5 gel compact)

(Lac Laflamme, hiver 1992-93)

Selon couverture morte

	DÉBRIS		HYPNE		SPHAIGNE	
	Type de gel	Écart type	Type de gel	Écart type	Type de gel	Écart type
13-déc	4,0	0,4	4,0	0,4	4,0	0,3
12-fév	3,9	0,5	4,0	0,5	3,9	0,4
05-avr	3,8	0,4	4,0	0,3	4,0	0,3
19-avr	3,7	0,5	3,8	0,6	3,9	0,7
28-avr	3,9	0,6	3,6	0,6	3,6	0,5
10-mai	3,1	0,9	3,4	0,8	3,7	0,8
17-mai	1,5	0,6	2,0	0,9	2,4	0,9
27-mai	1,5	0,6	1,8	0,9	2,4	0,9
31-mai	1,3	0,4	1,3	0,5	1,6	0,6

Selon exposition

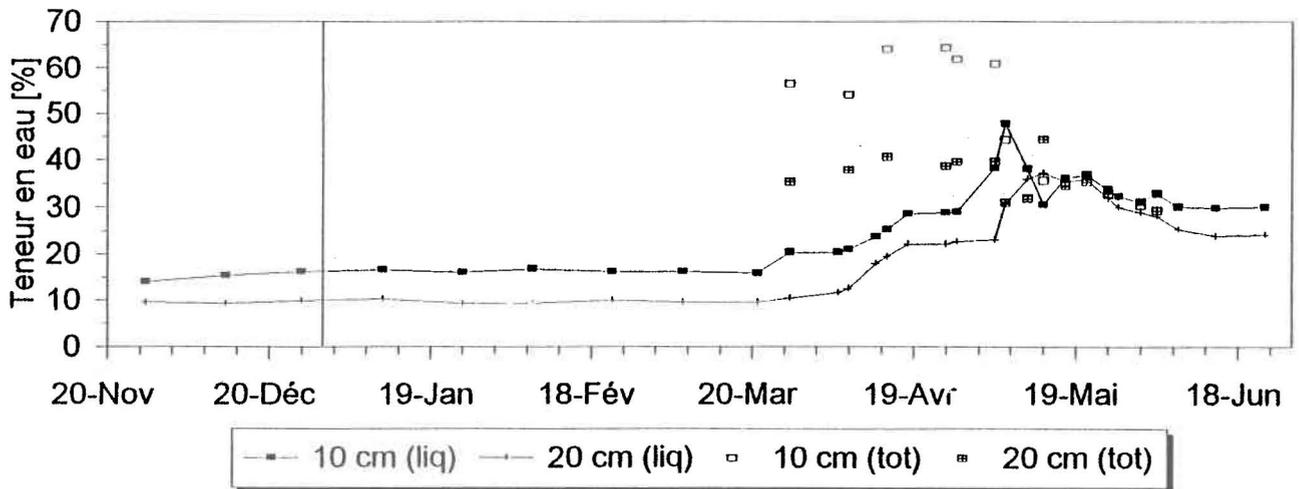
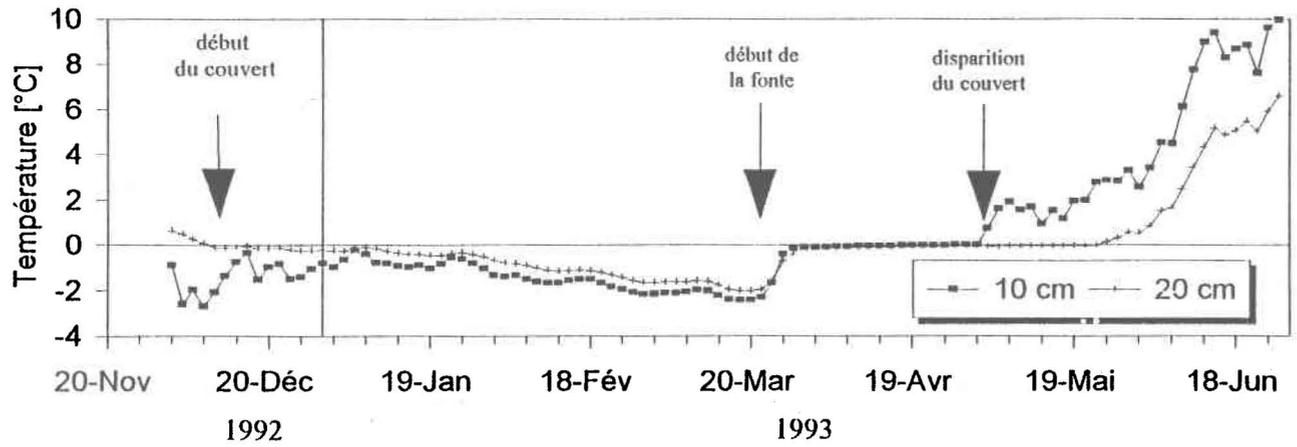
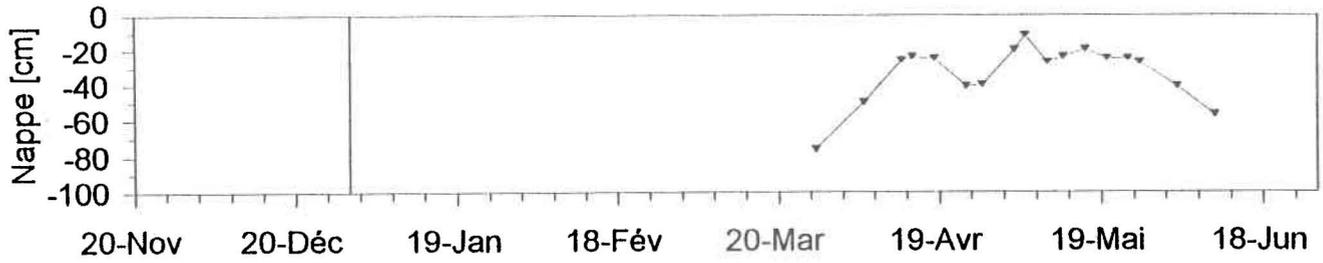
	EXPOSÉ AU SUD		EXPOSÉ AU NORD	
	Type de gel	Écart type	Type de gel	Écart type
13-déc	4,0	0,4	4,0	0,3
12-fév	4,0	0,5	4,0	0,5
05-avr	4,0	0,4	4,0	0,3
19-avr	3,7	0,5	3,9	0,7
28-avr	3,9	0,6	3,6	0,5
10-mai	2,8	1,0	3,8	0,8
17-mai	1,4	0,7	2,6	0,9
27-mai	1,2	0,6	2,7	0,9
31-mai	1,0	0,5	1,6	0,7

Selon couverture forestière

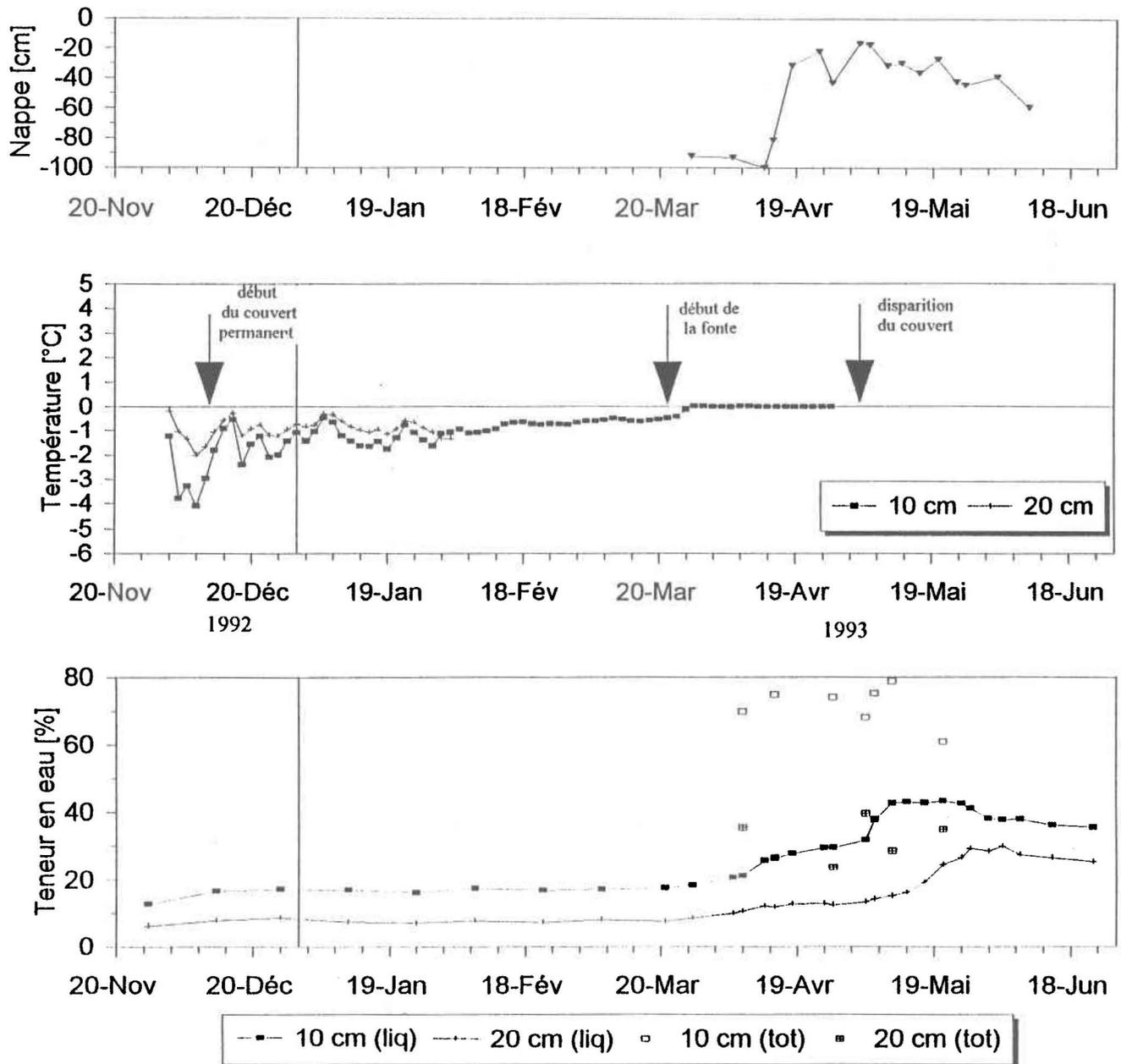
	JEUN. PEUPEMENT		FORÊT CLAIRE	
	Type de gel	Écart type	Type de gel	Écart type
13-déc	3,8	0,4	4,0	0,4
12-fév	3,7	0,5	4,0	0,5
05-avr	3,7	0,5	3,9	0,3
19-avr	3,4	0,7	3,8	0,6
28-avr	3,2	0,5	3,7	0,7
10-mai	3,5	0,8	3,3	0,8
17-mai	2,5	0,8	1,8	0,9
27-mai	2,9	0,8	1,6	0,9
31-mai	2,1	0,7	1,2	0,5

ANNEXE 8

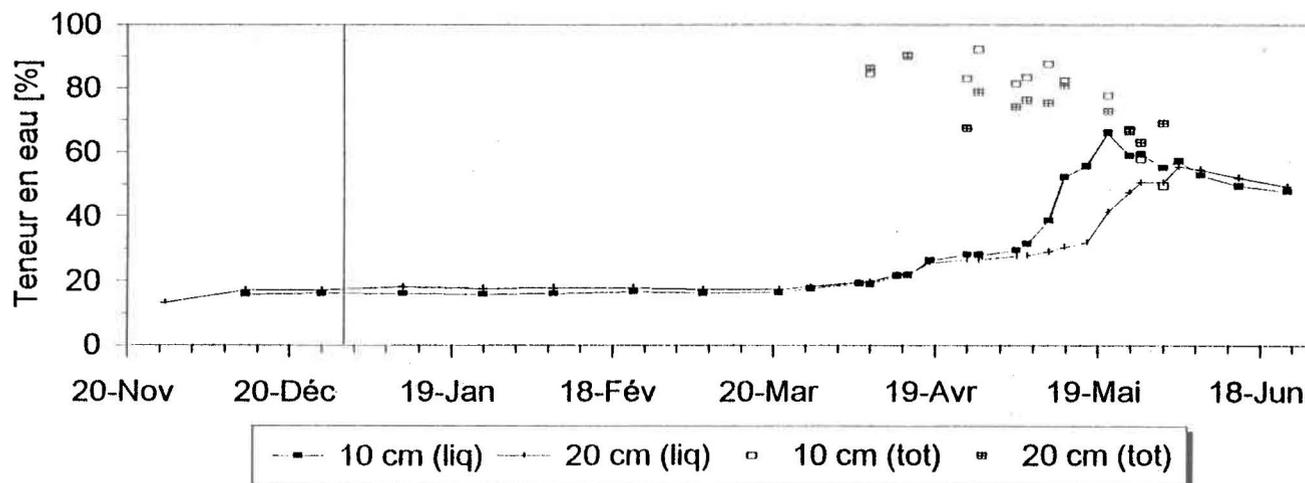
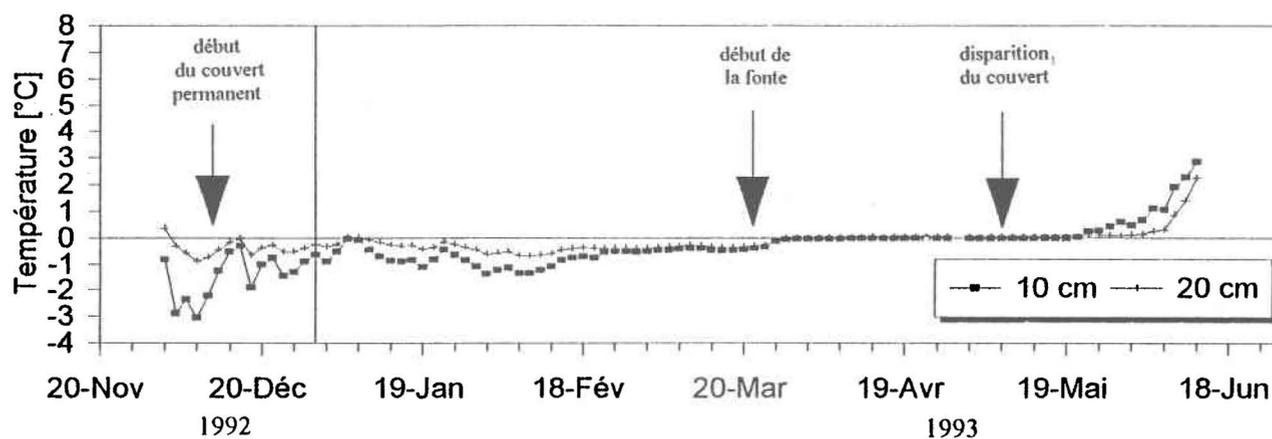
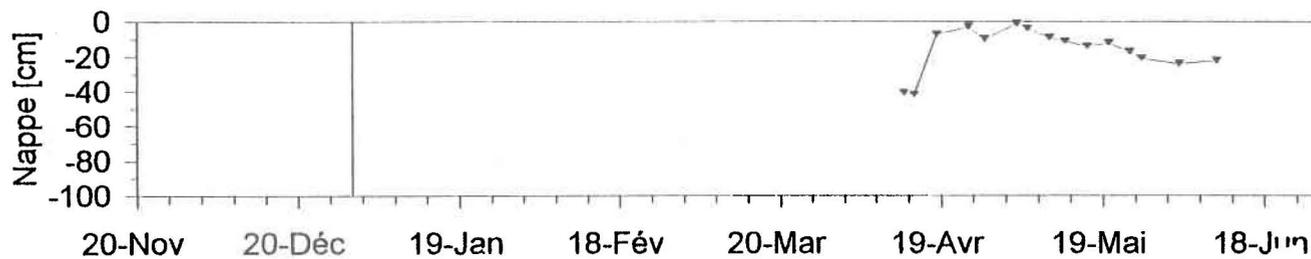
Niveau de la nappe phréatique, températures et teneurs en eau liquide et totale à 10 cm et 20 cm de profondeur pour chaque couverture morte.



Site DEBR (débris végétaux)



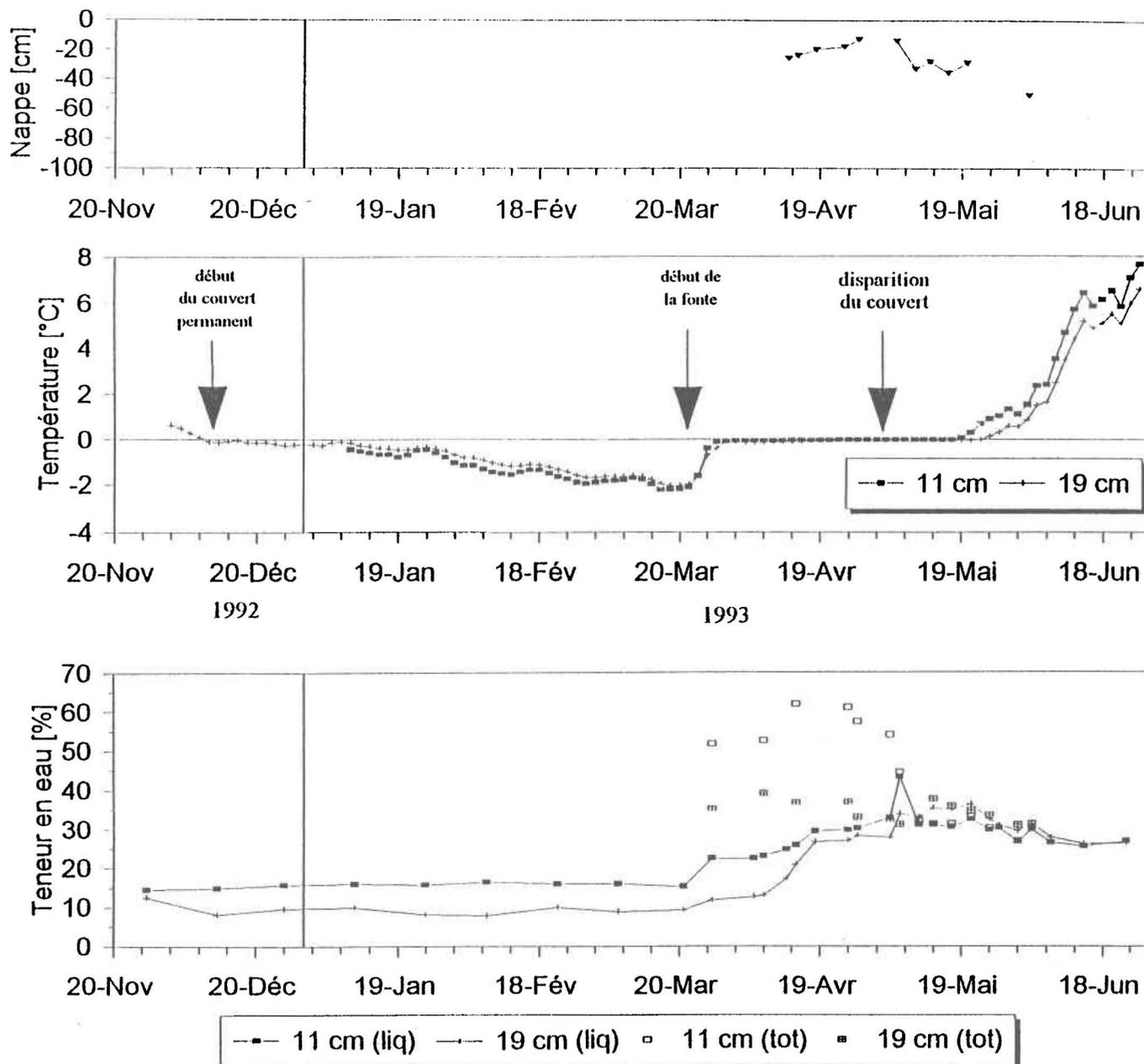
Site HYP (mousses hypnacées)



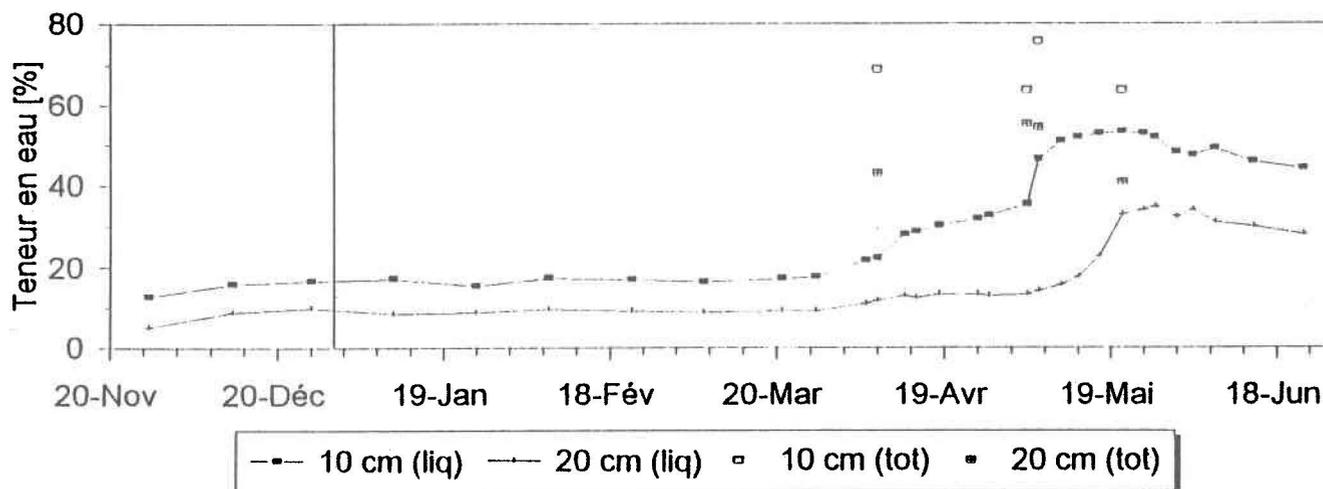
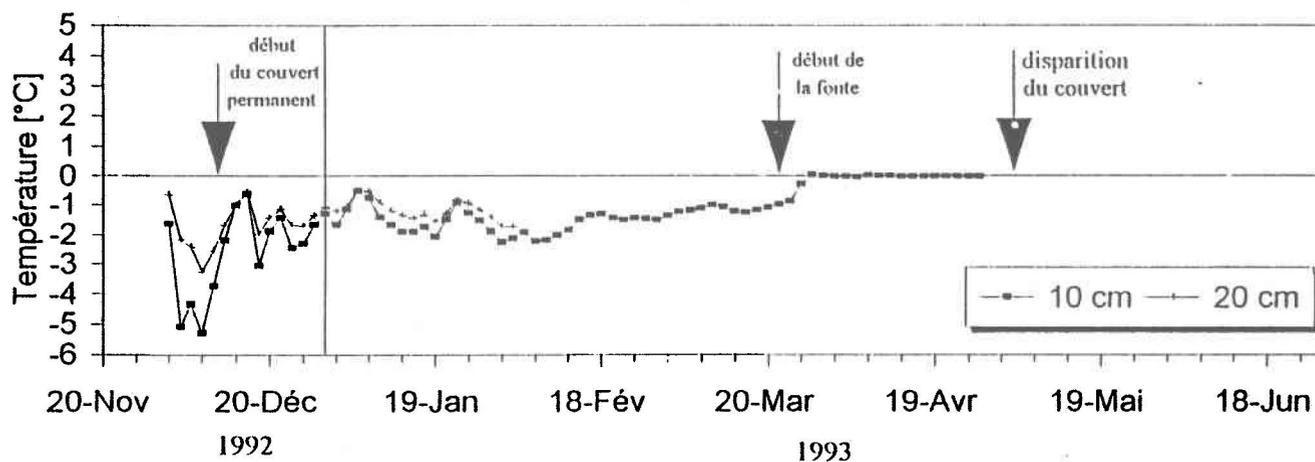
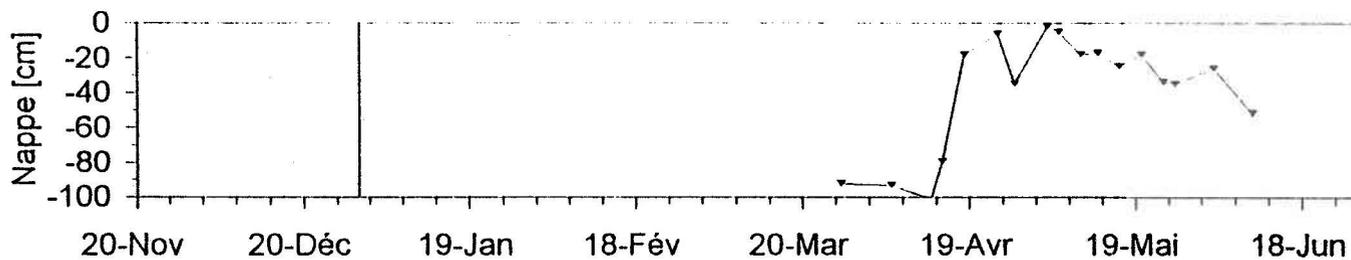
Site SPH (sphaigne)

ANNEXE 9

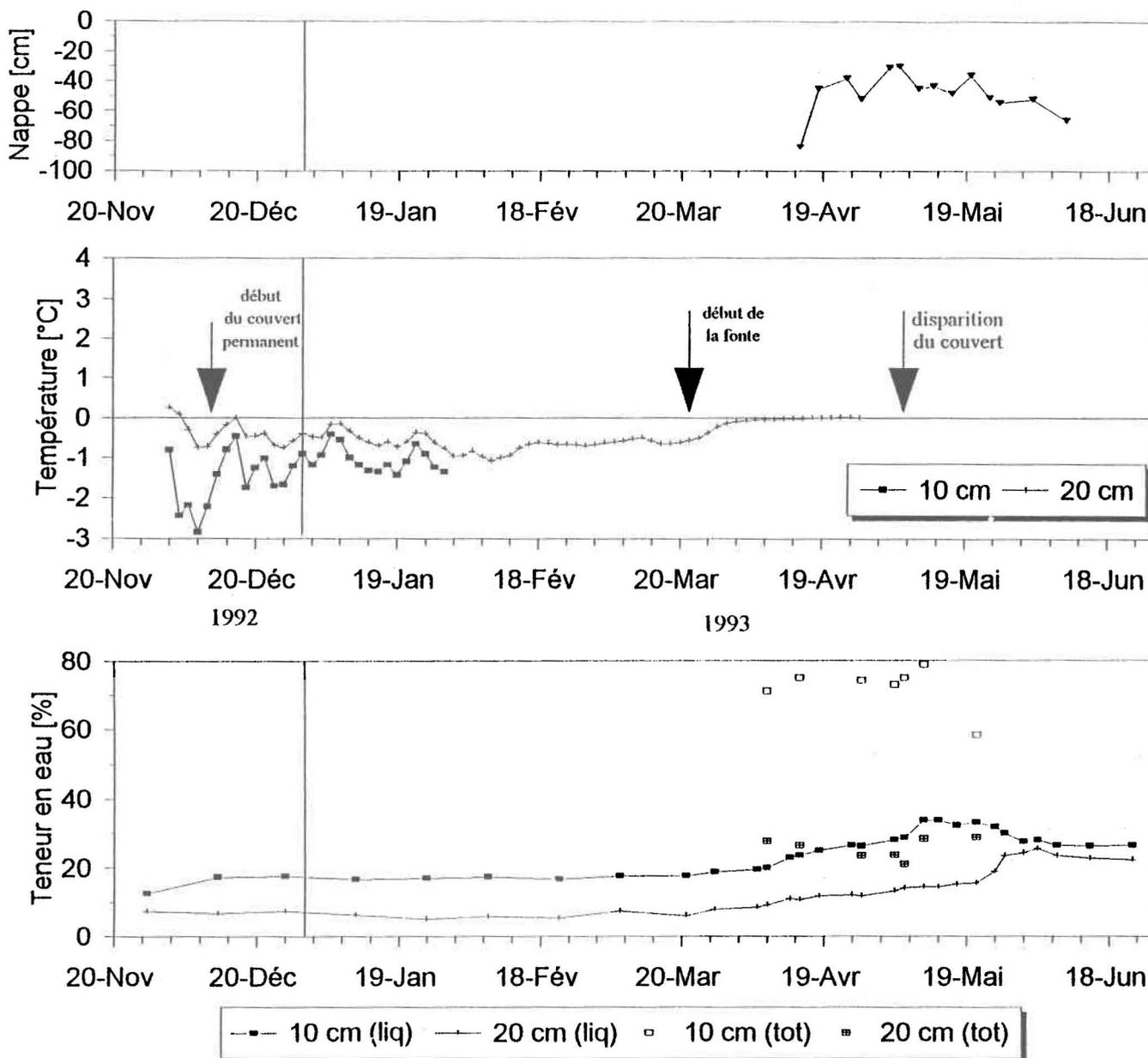
Niveau de la nappe phréatique, températures et teneurs en eau liquide et totale à 10 cm et 20 cm de profondeur pour chaque sous-site.



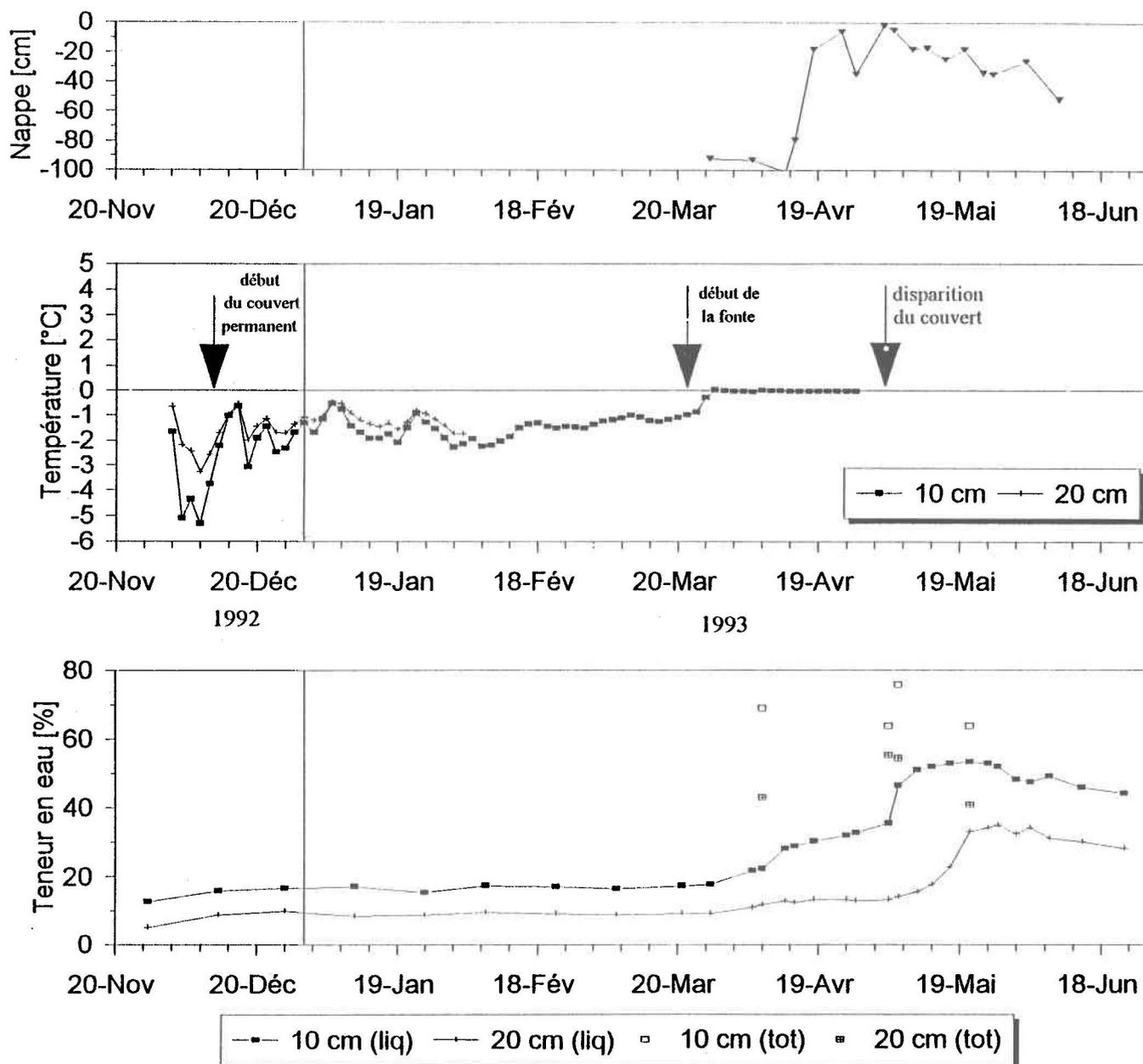
Sous-site DY (débris végétaux)



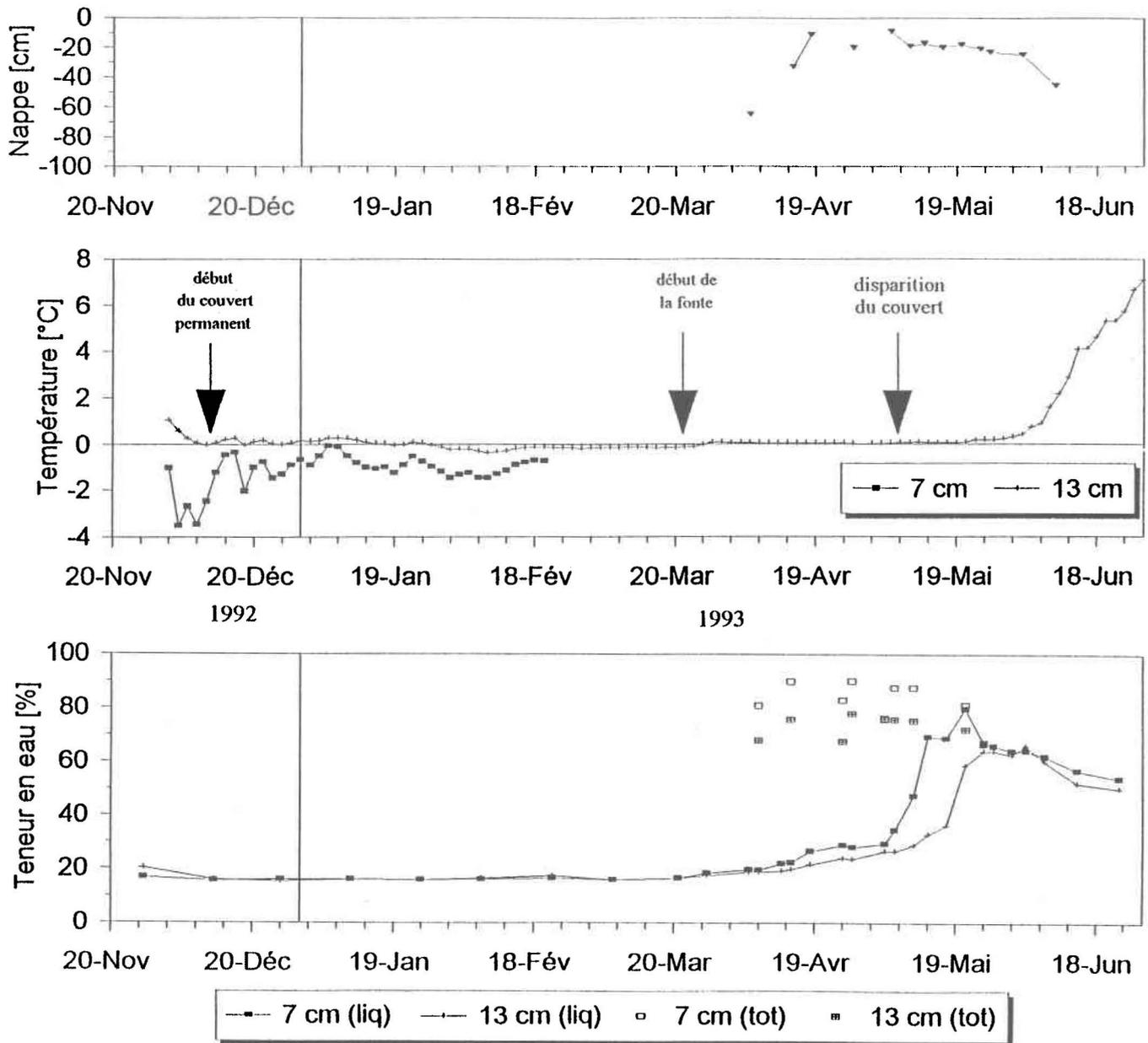
Sous-site HN (mousses hypnacées)



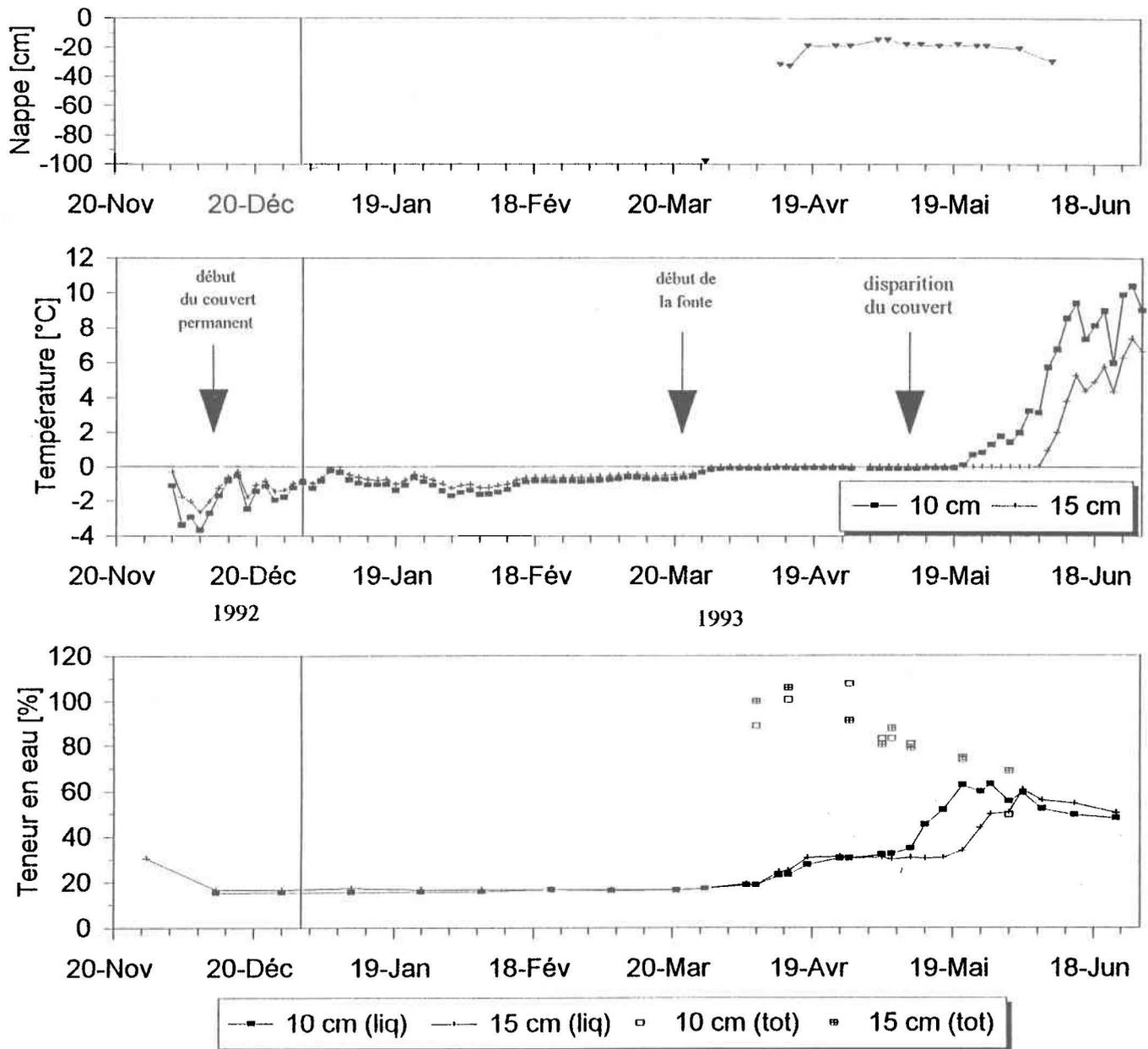
Sous-site HW (mouses hypnacées)



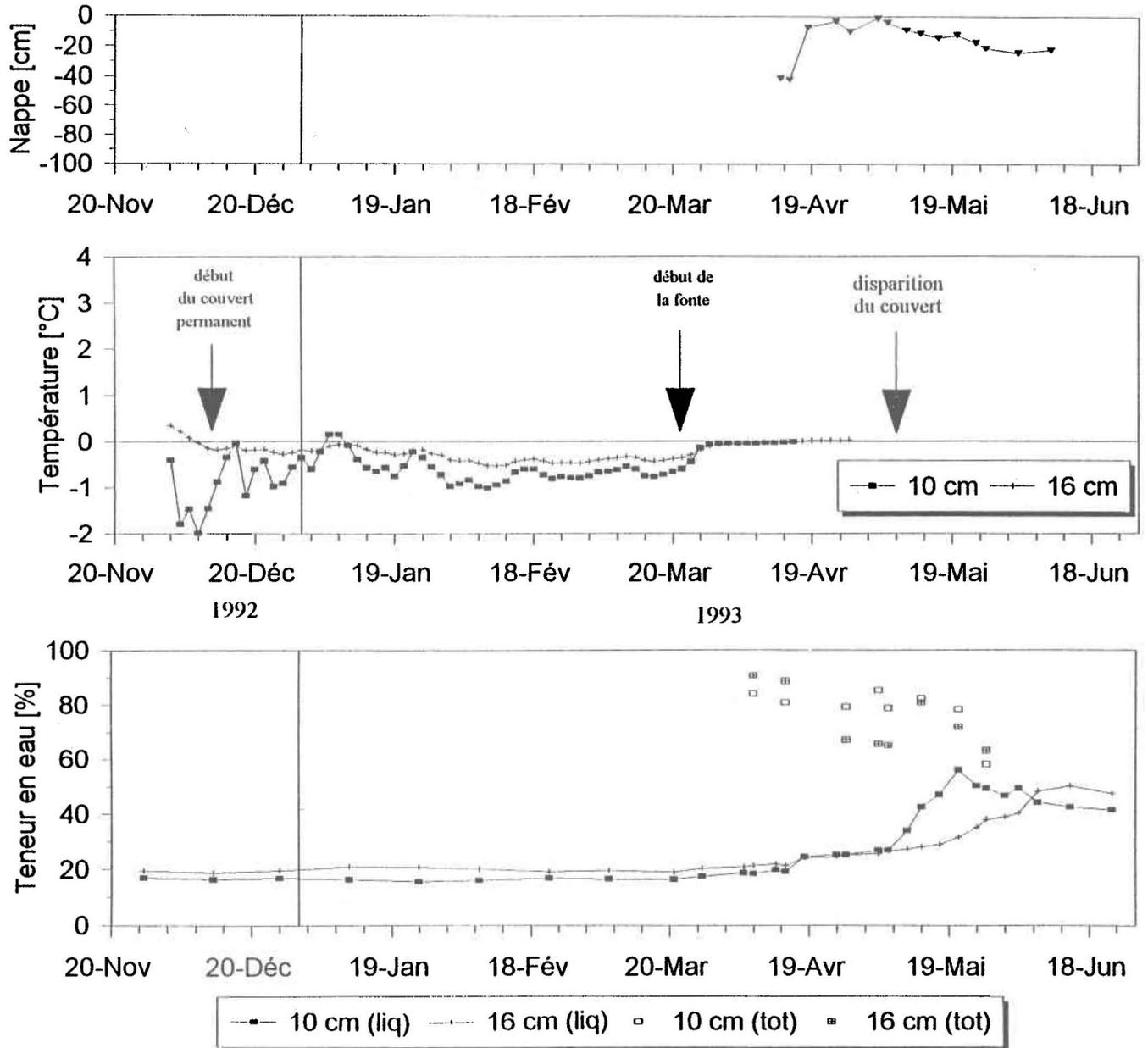
Sous-site HN (mousses hypnacées)



Sous-site SH (sphaigne)



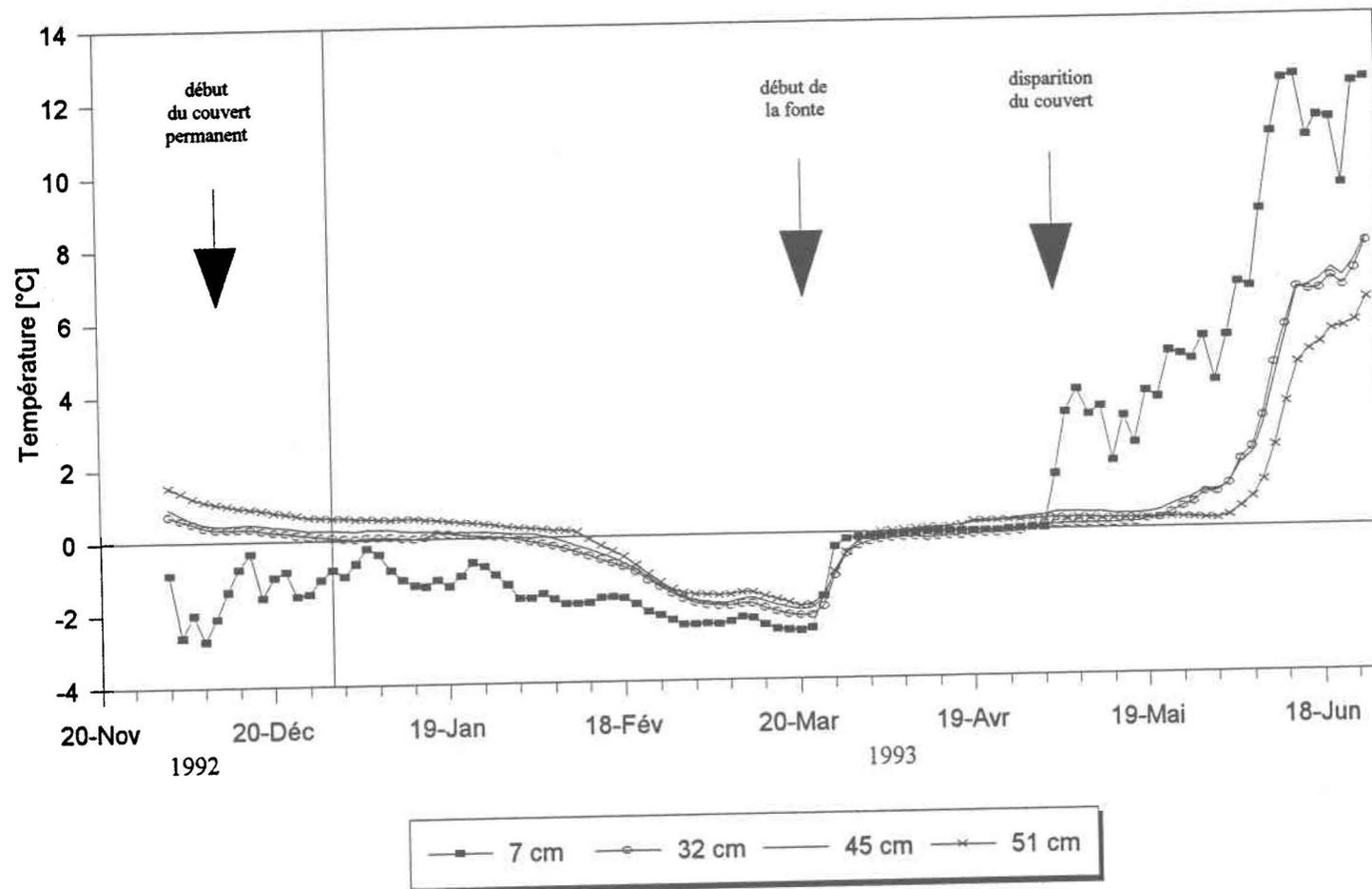
Sous-site SS (sphaigne)



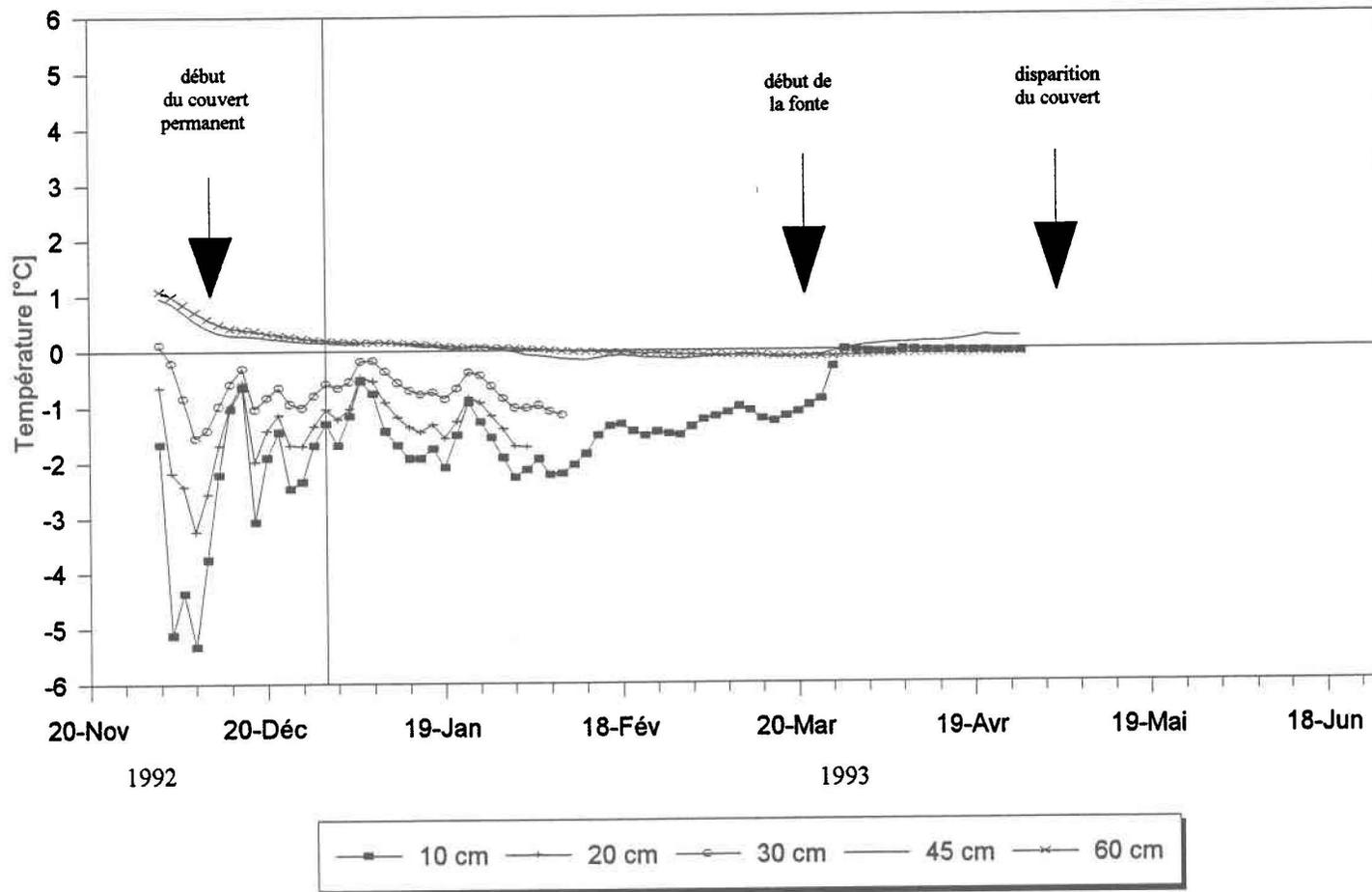
Sous-site SE (sphaigne)

ANNEXE 10

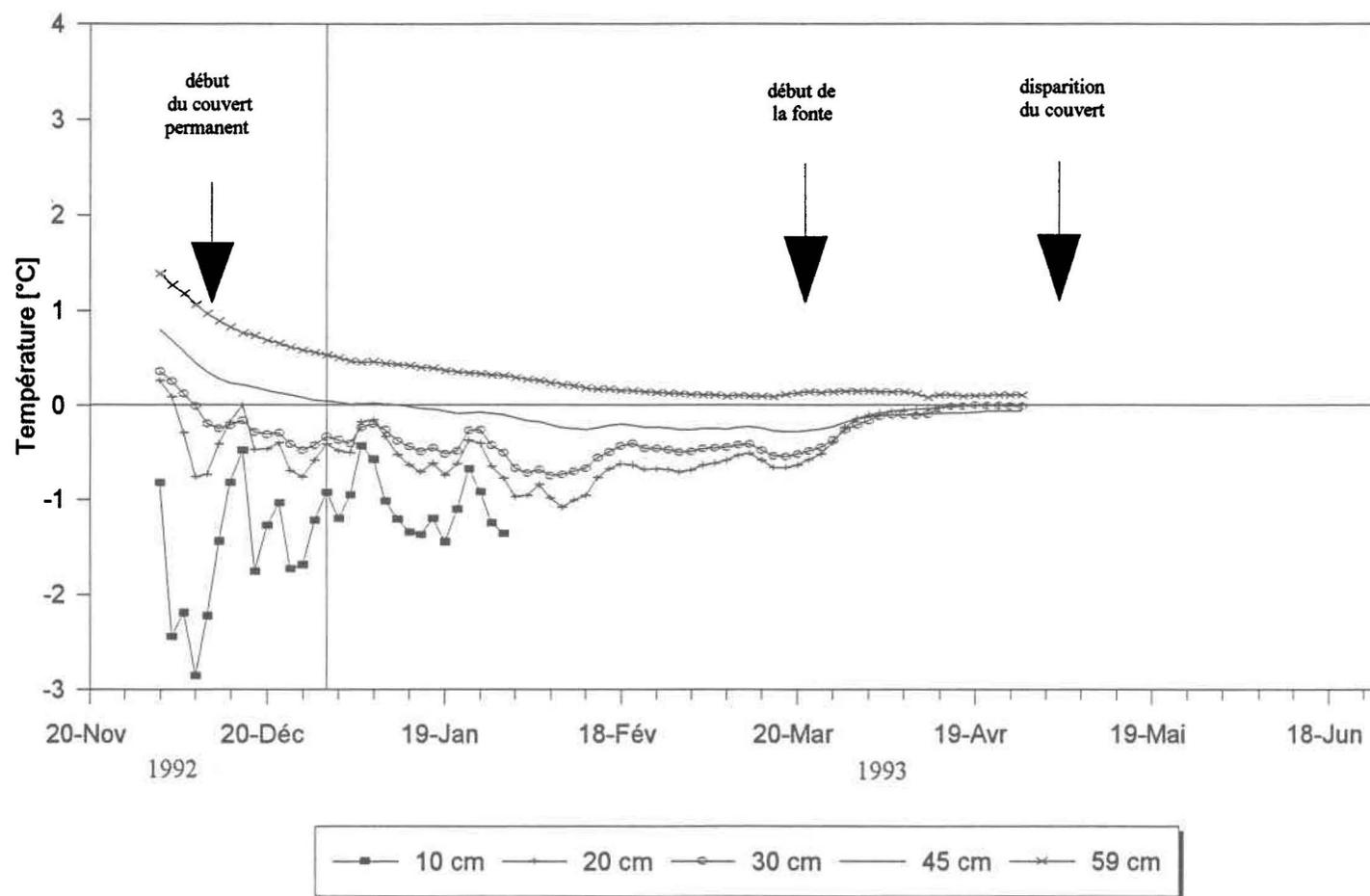
Températures du sol sur chaque sous-site pour l'hiver 1992-93.



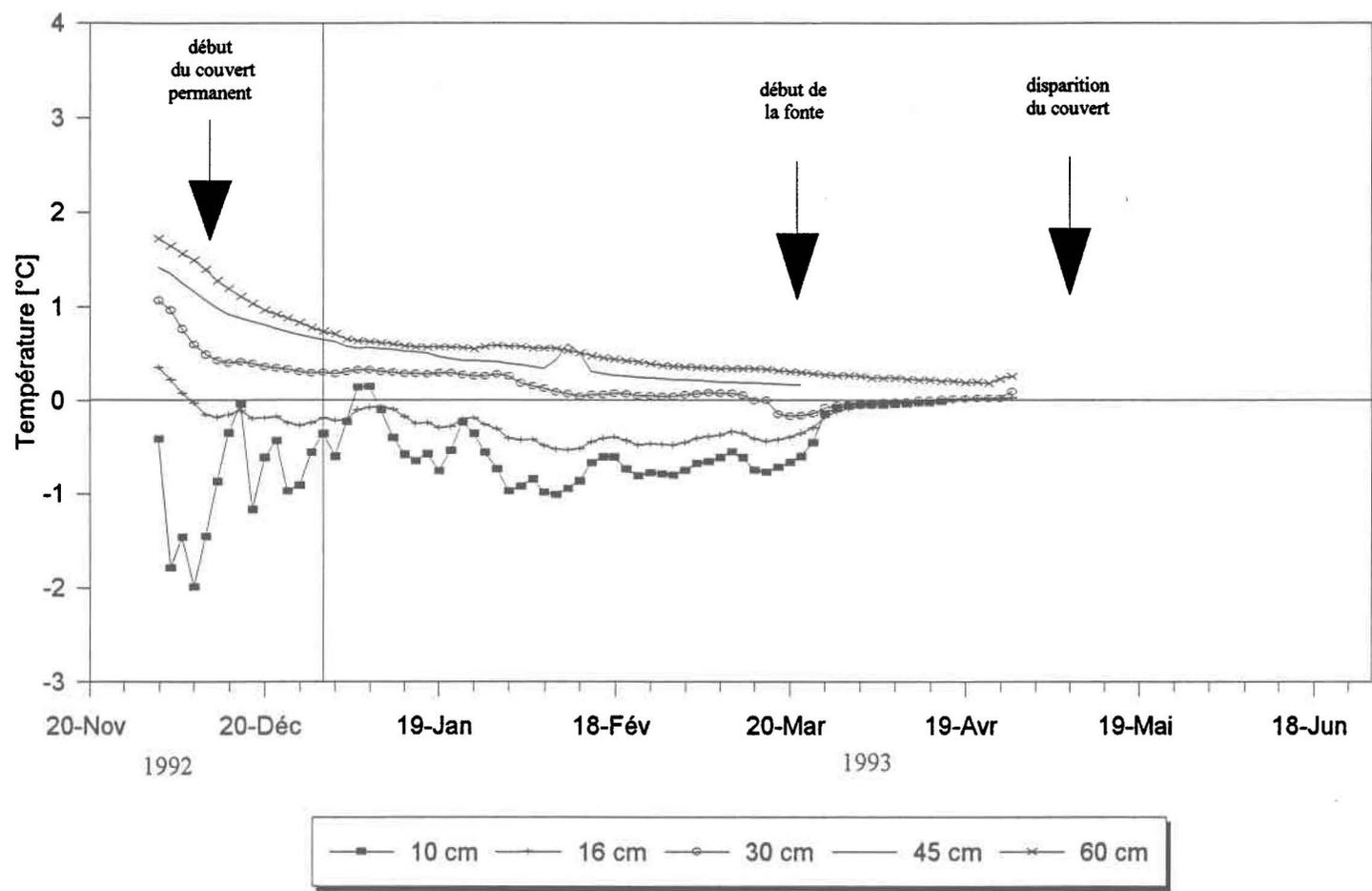
Sous-site DU



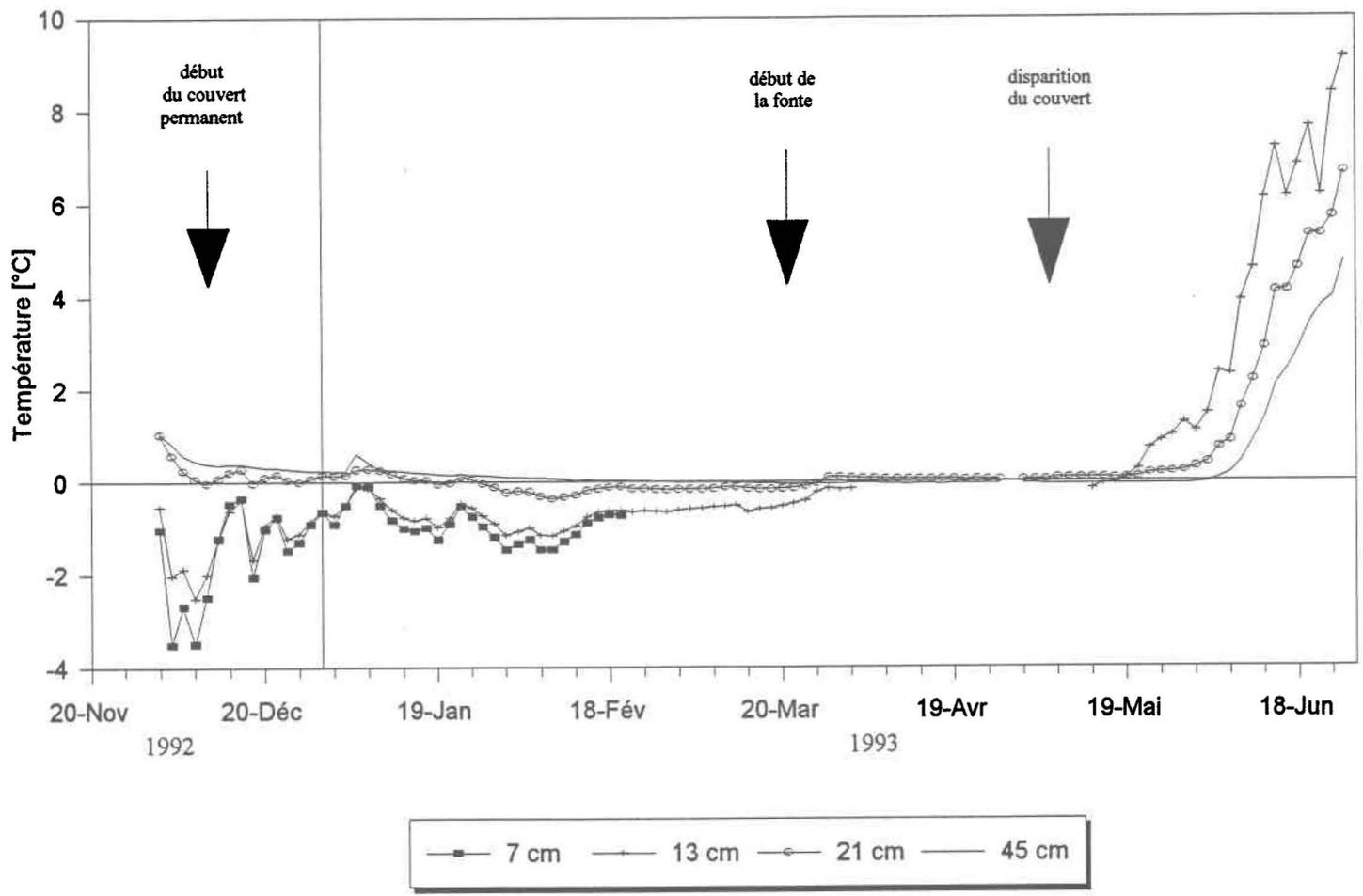
Sous-site HN



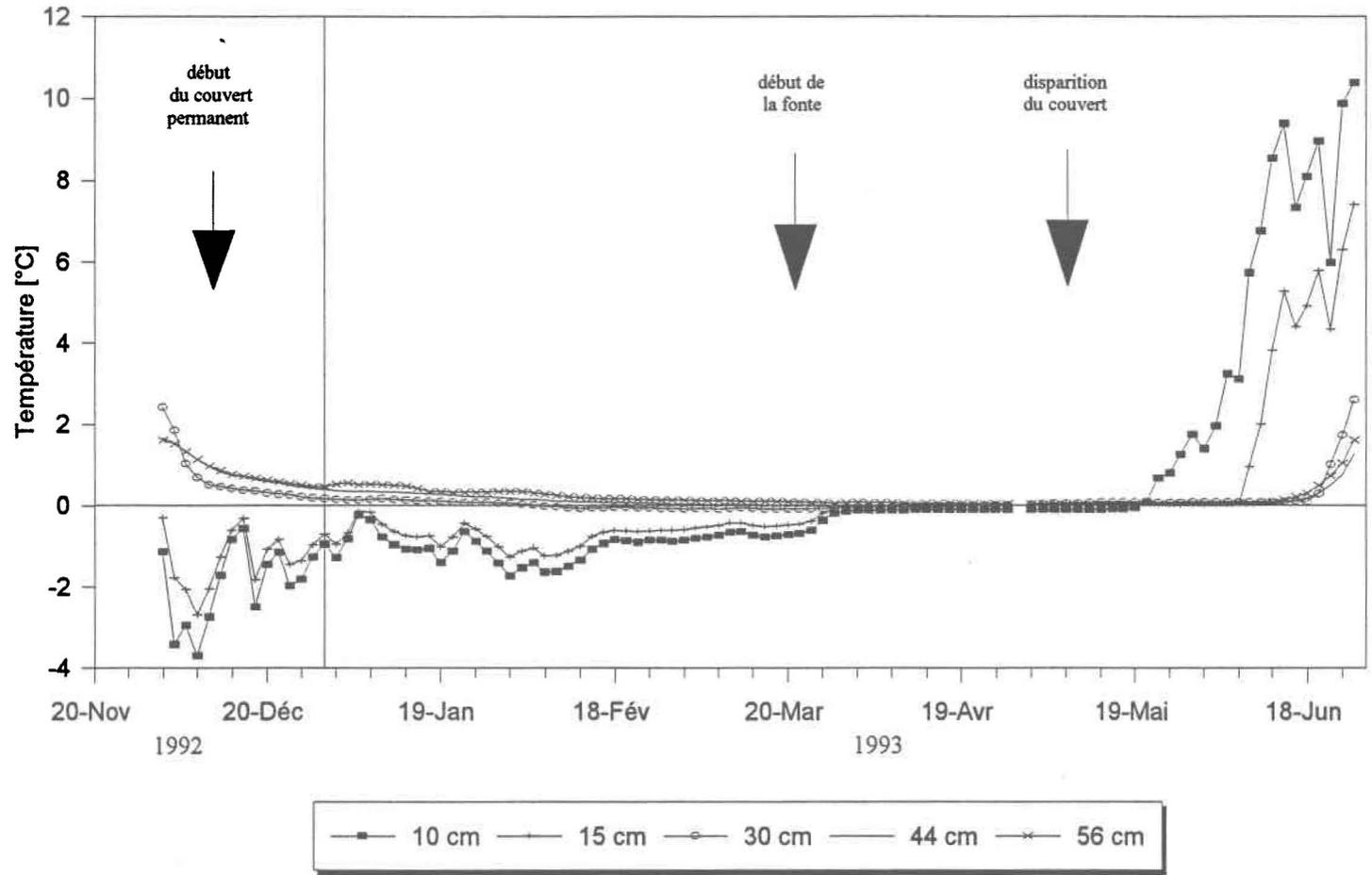
Sous-site HW



Sous-site SE



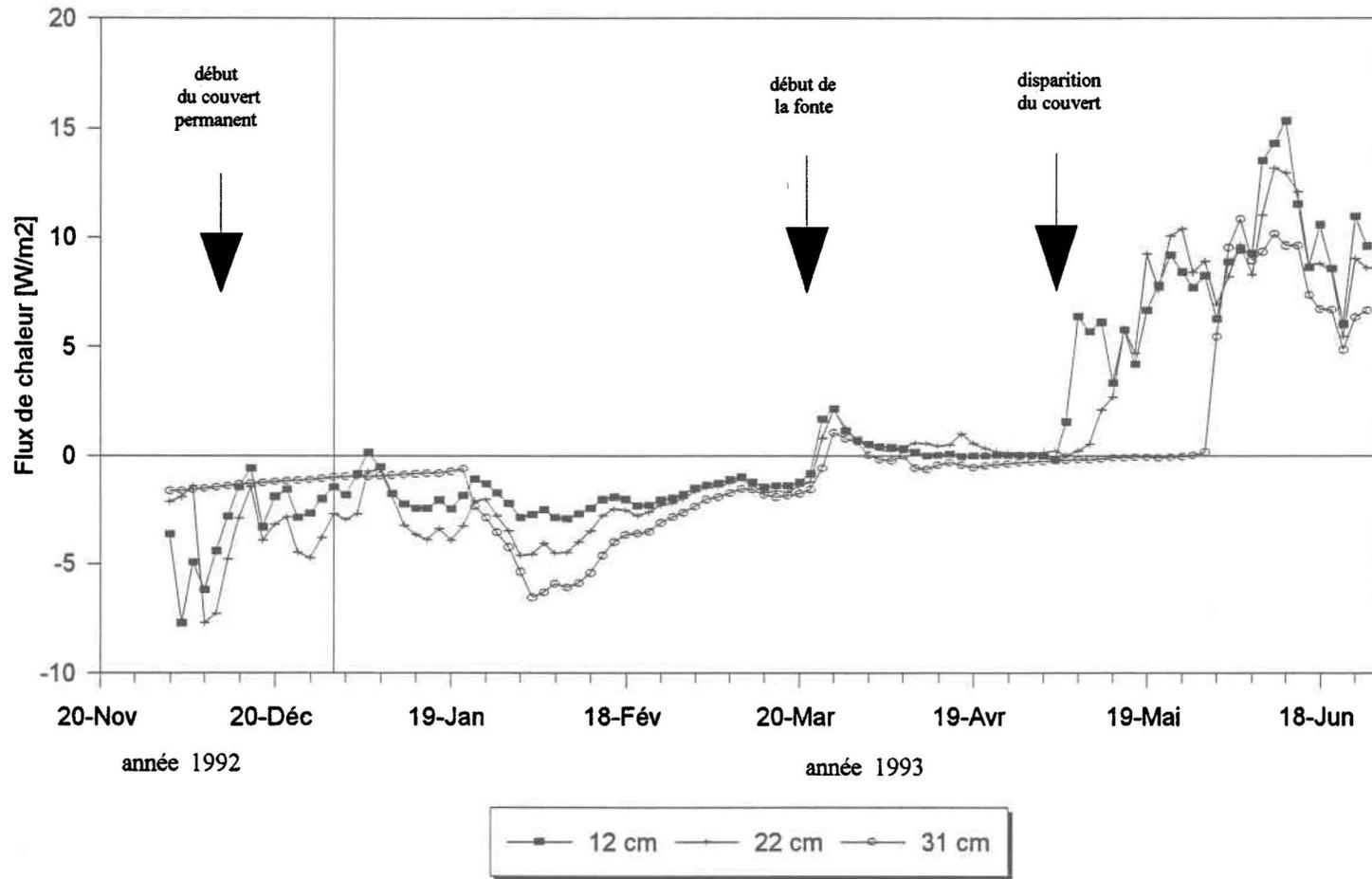
Sous-site SH



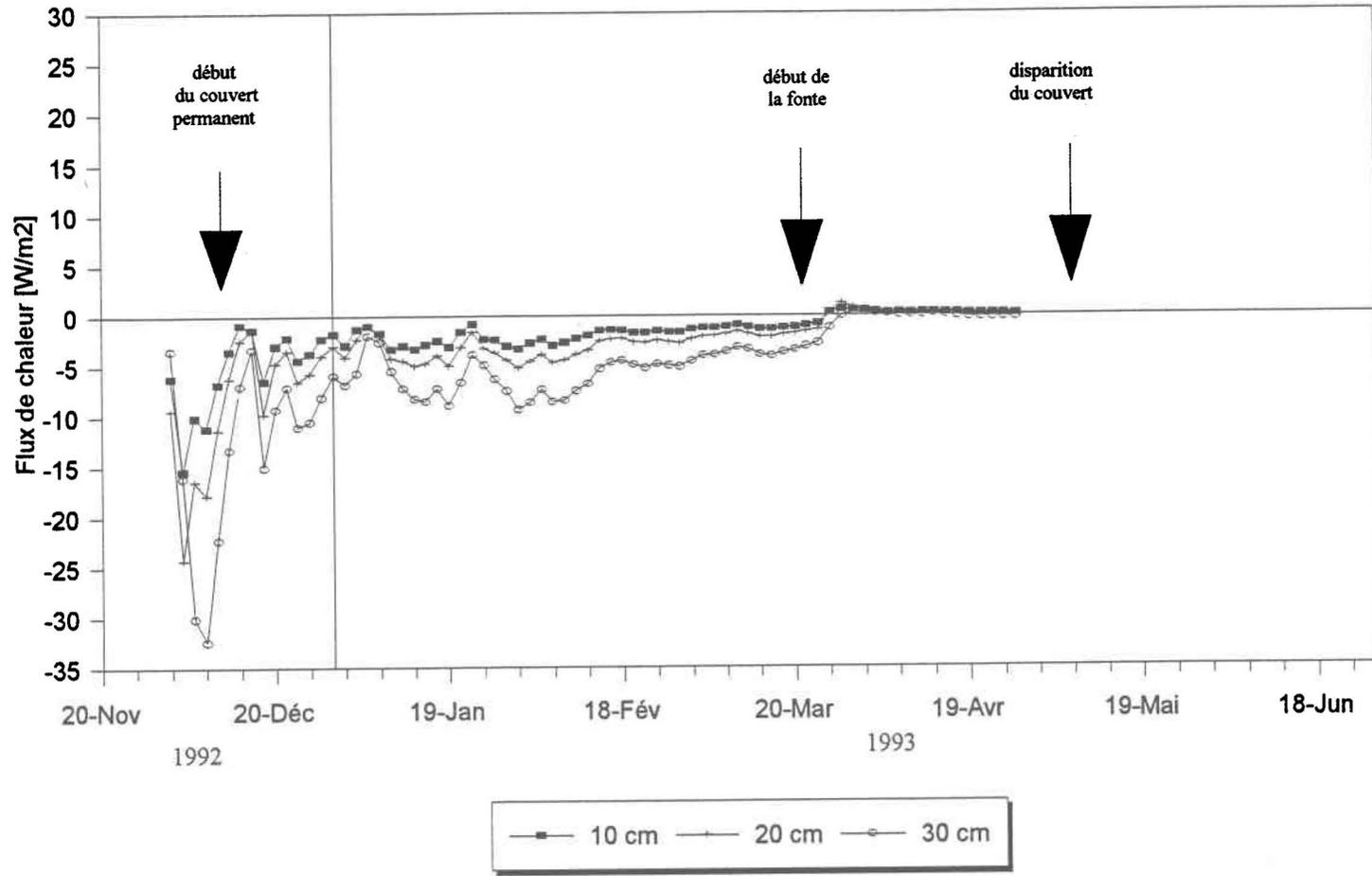
Sous-site SS

ANNEXE 11

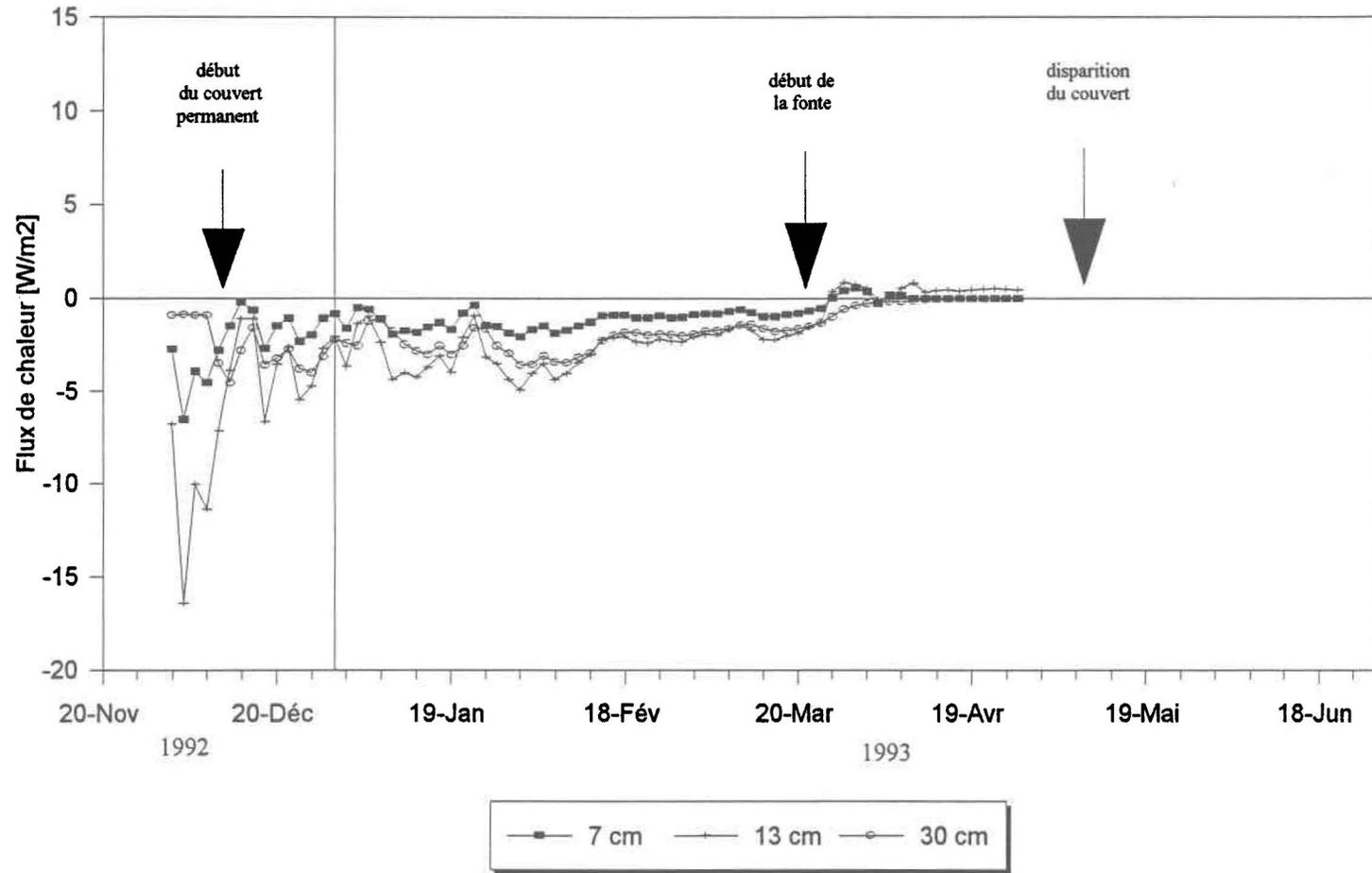
Flux de chaleurs sur chaque sous-site pour l'hiver 1992-93.



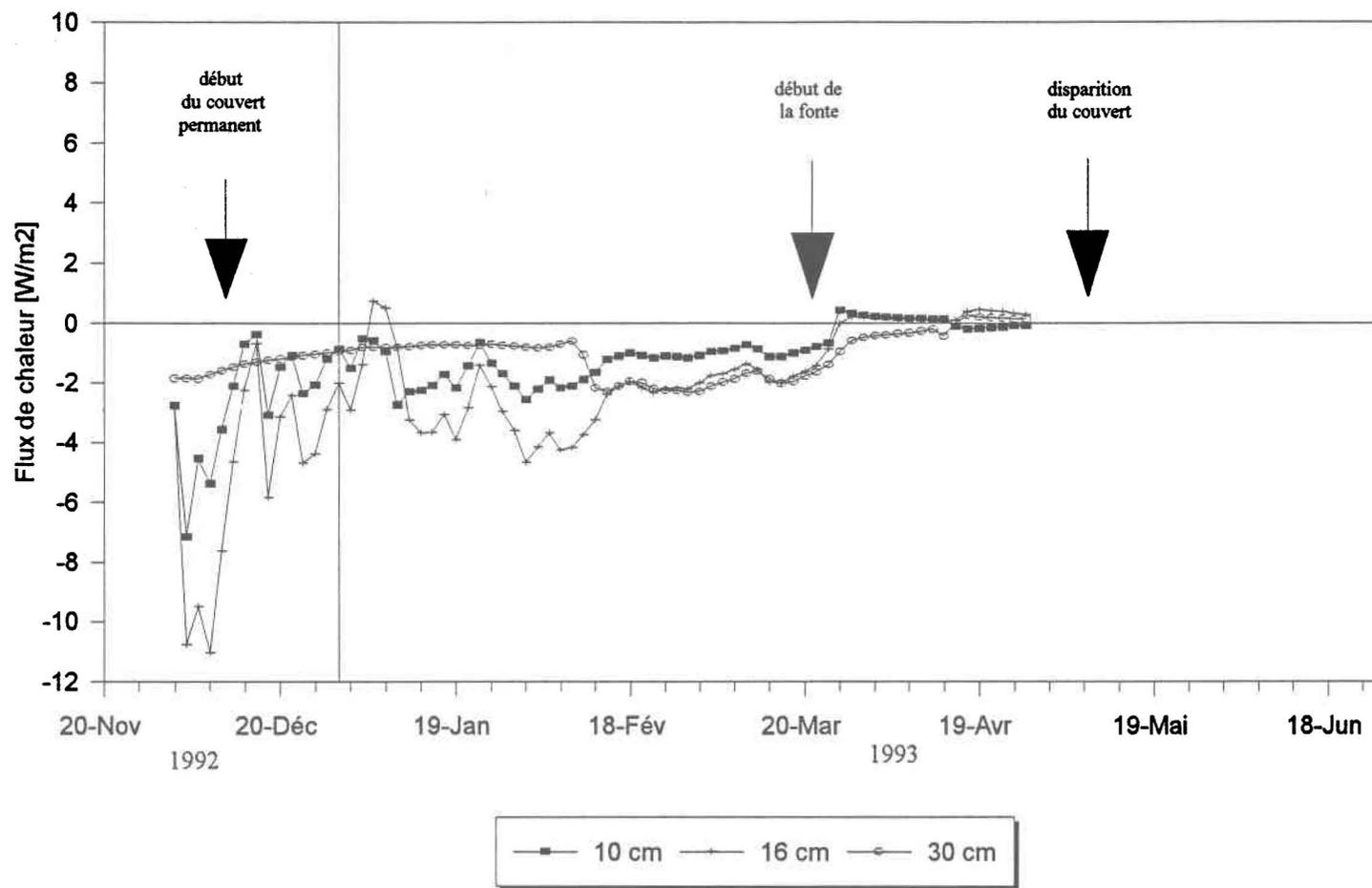
Sous-site DU



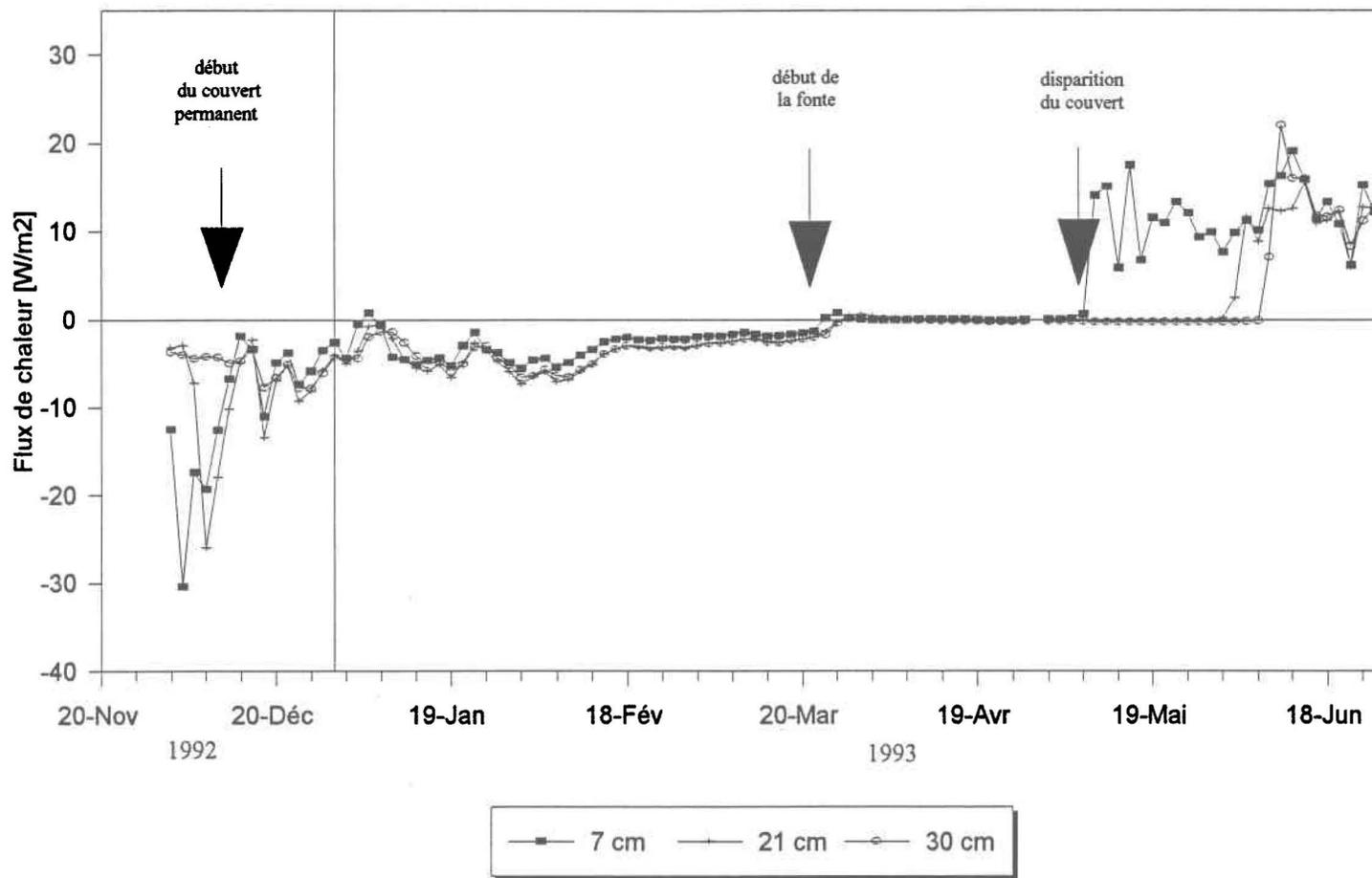
Sous-site HN



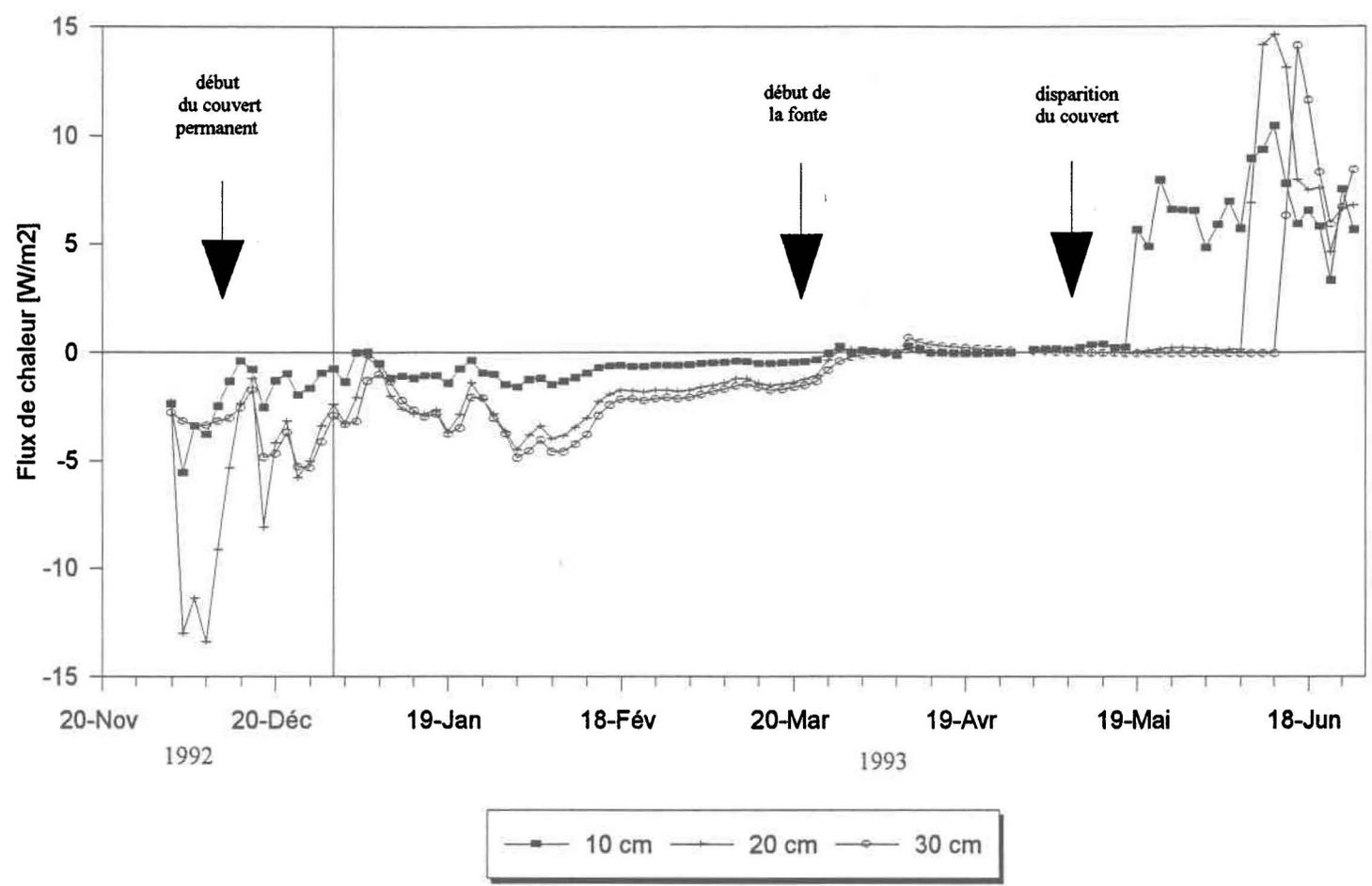
Sous-site HW



Sous-site SE



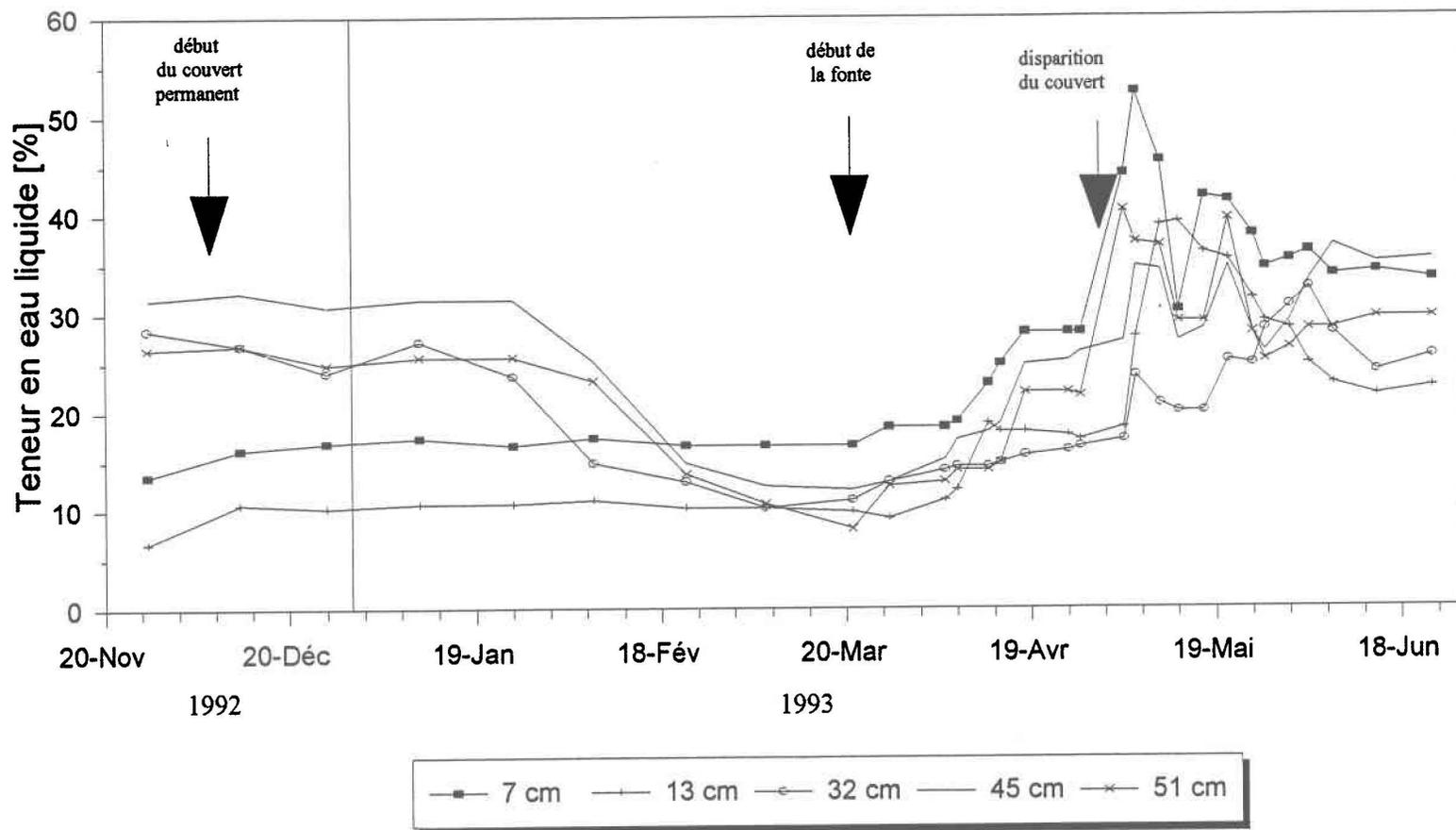
Sous-site SH



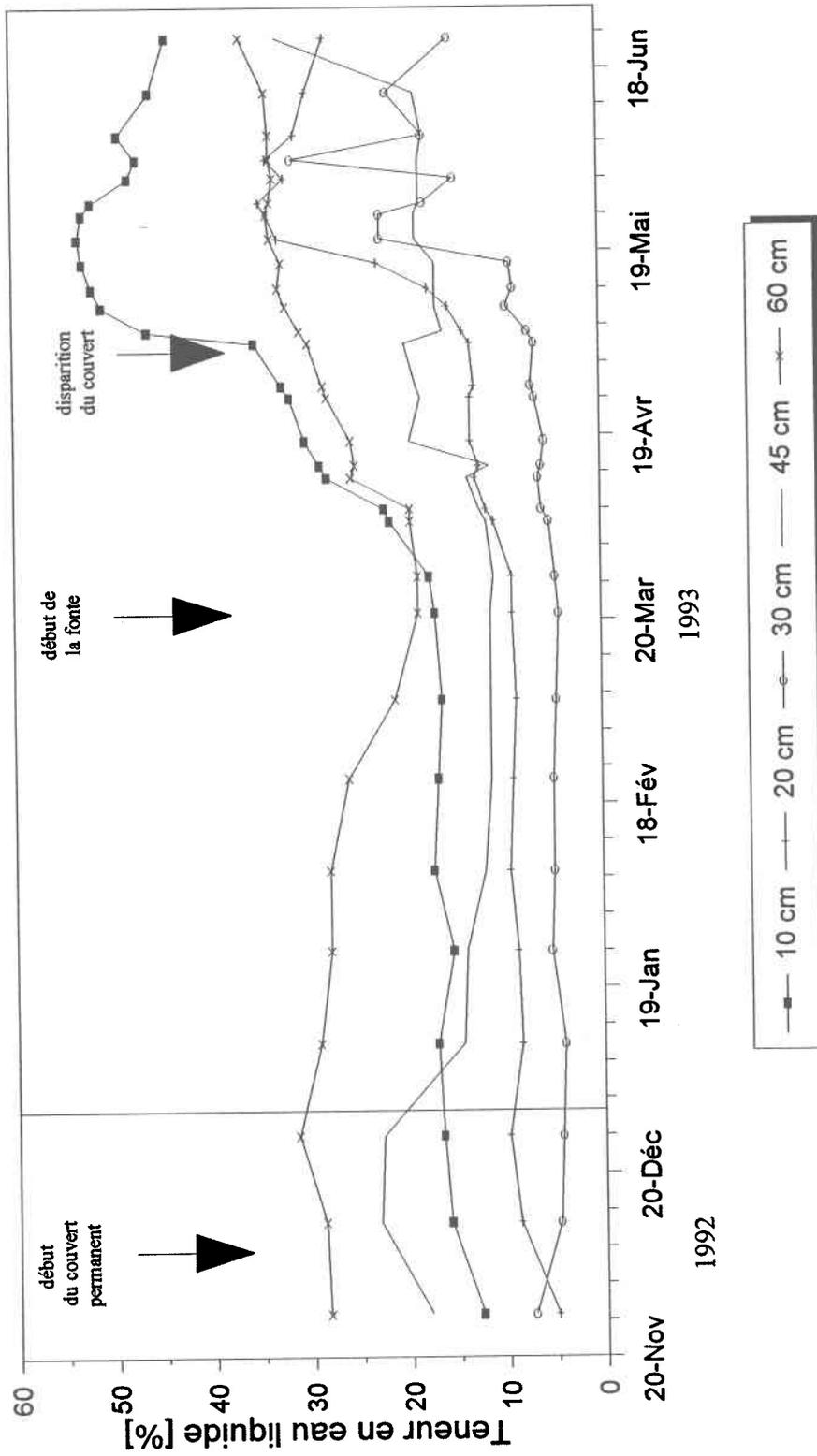
Sous-site SS

ANNEXE 12

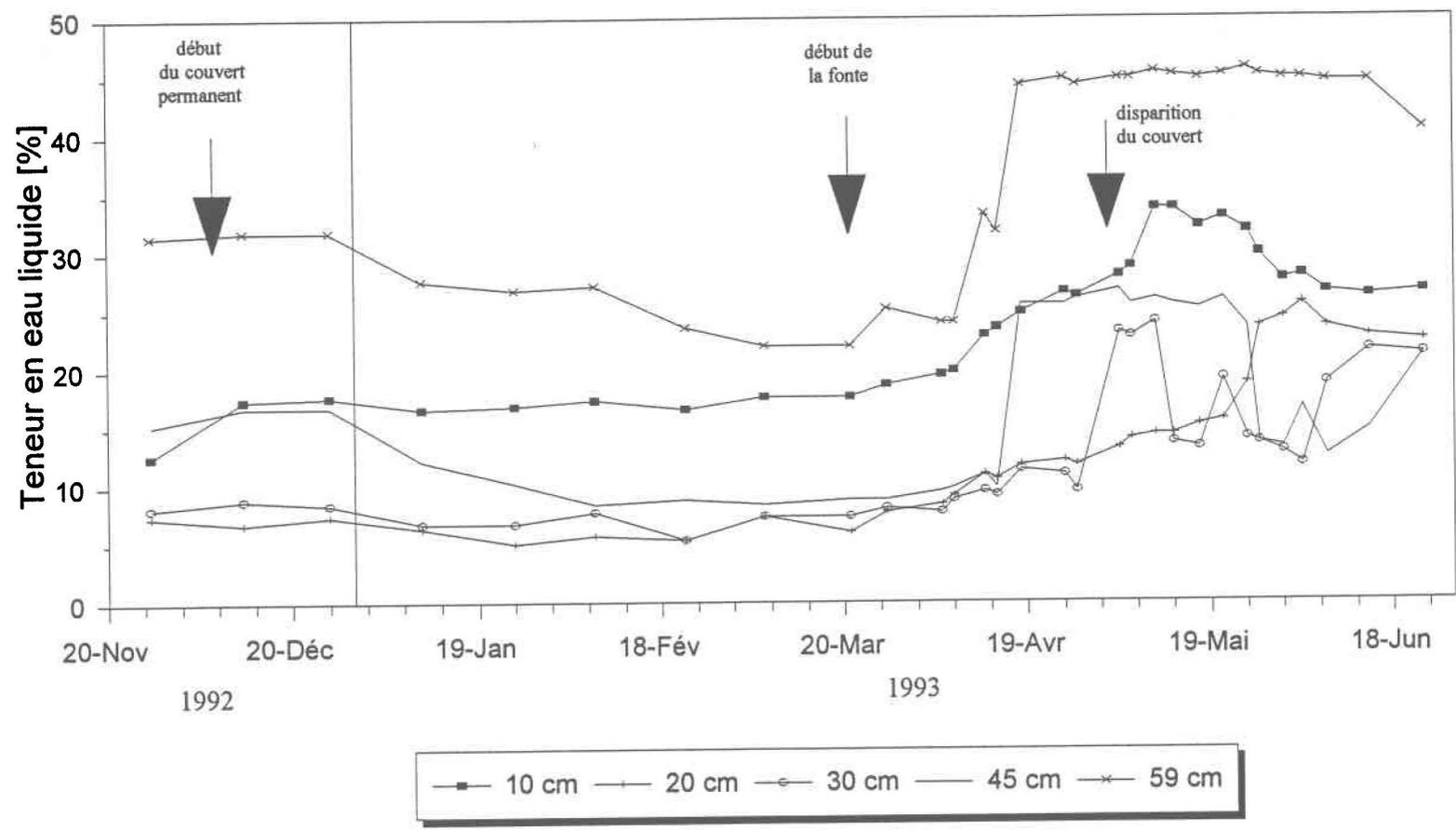
**Teneur en eau liquide sur chaque sous-site pour l'hiver
1992-93.**



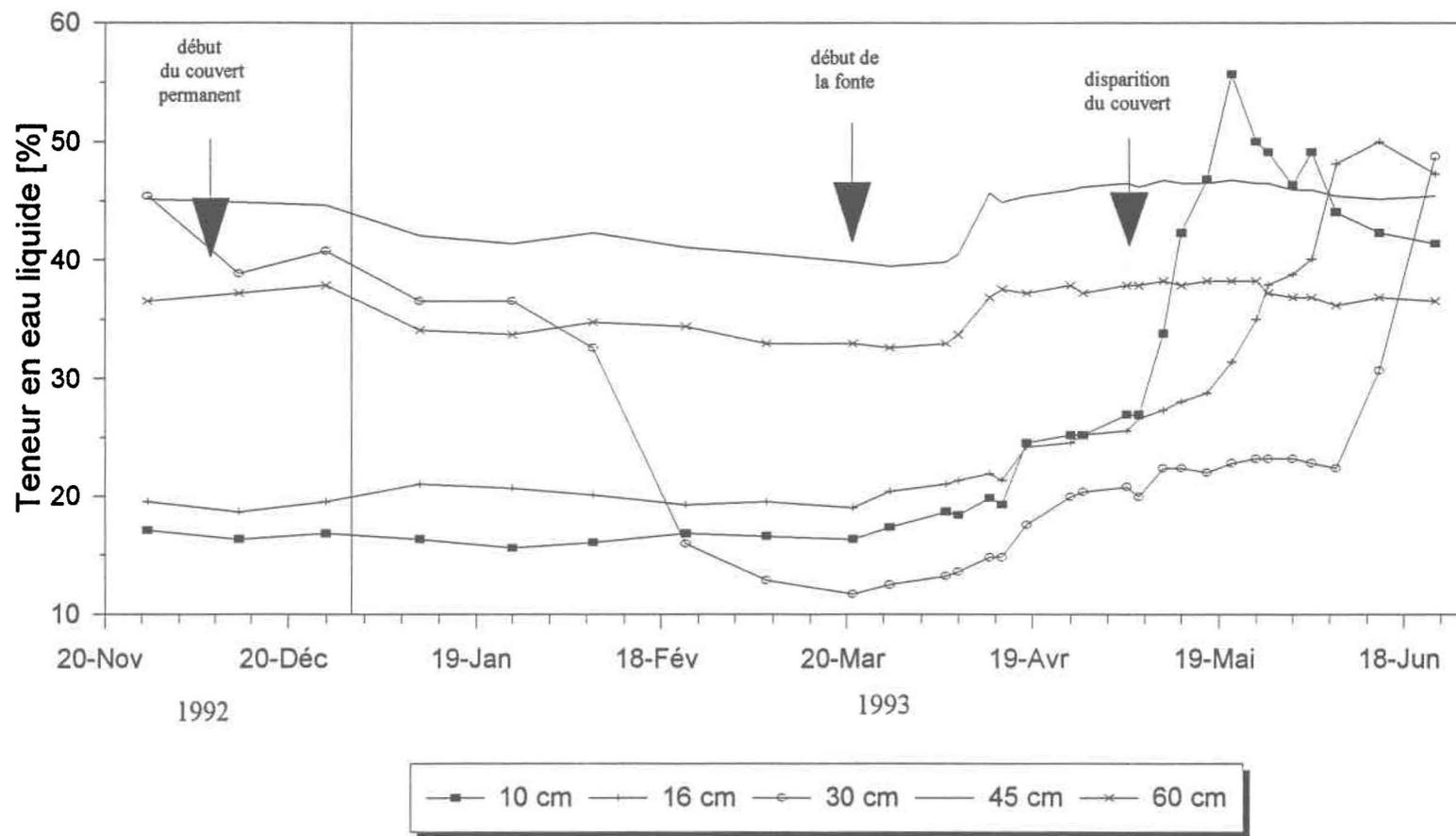
Sous-site DU



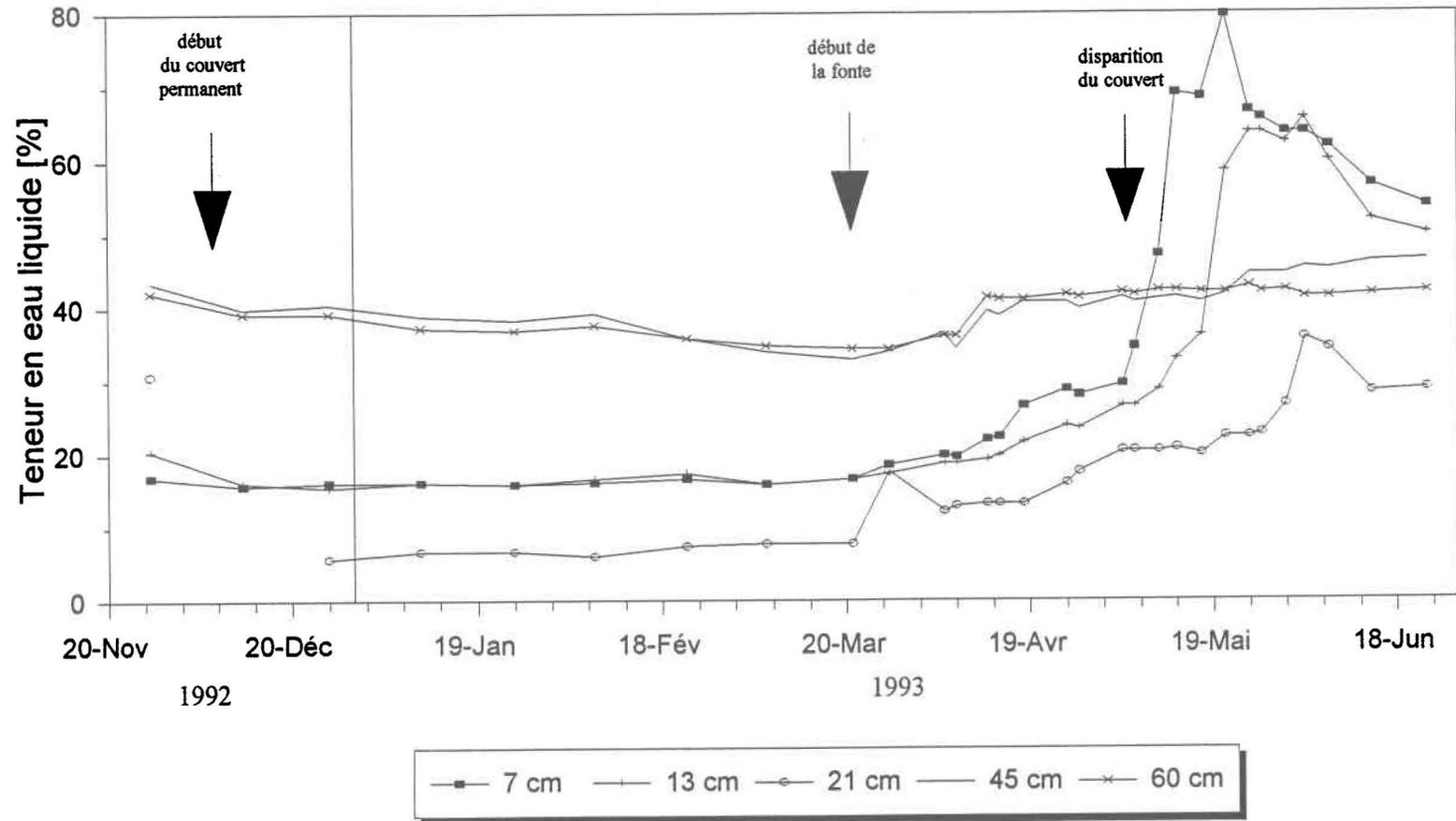
Sous-site HN



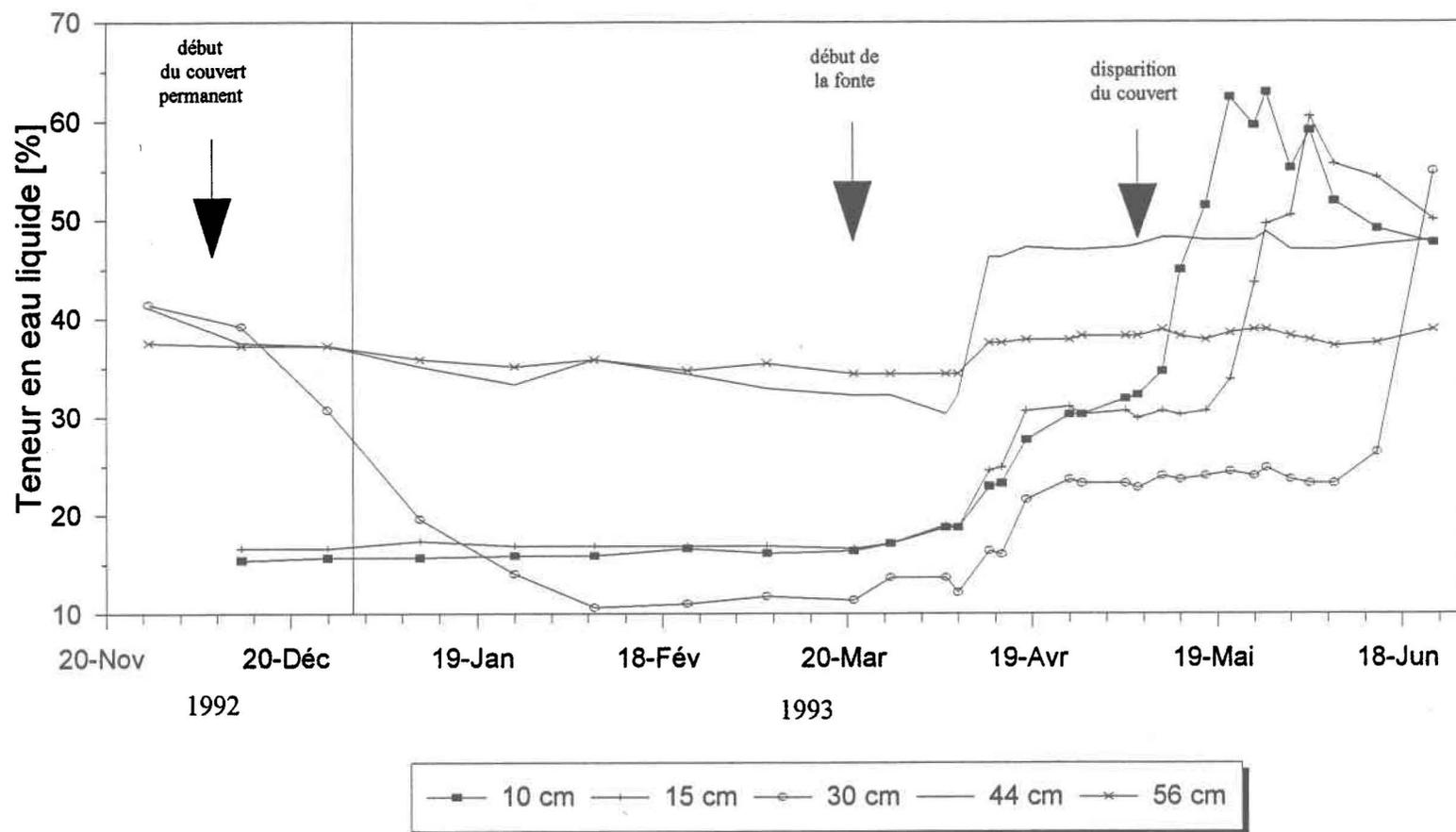
Sous-site HW



Sous-site SE



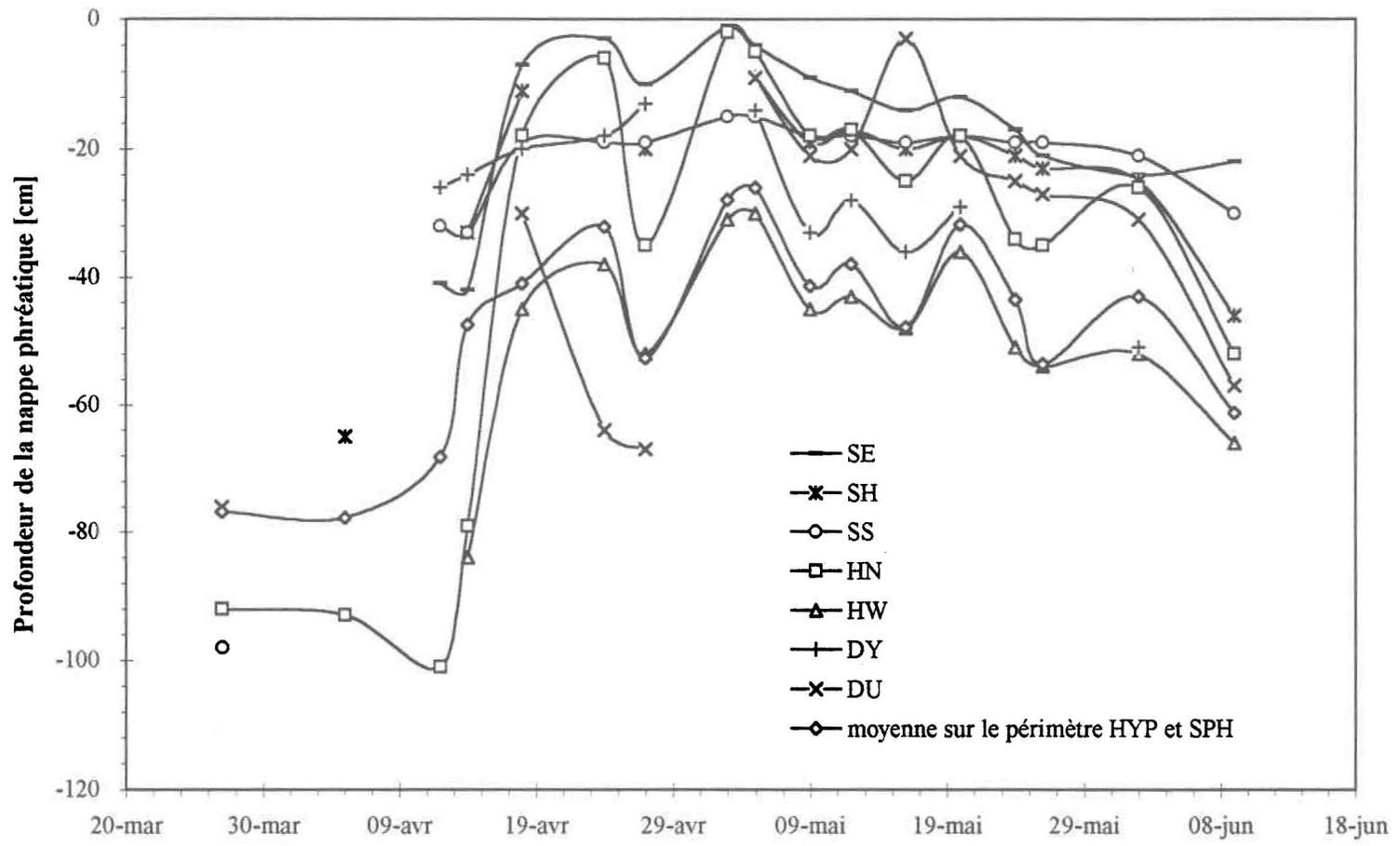
Sous-site SH



Sous-site SS

ANNEXE 13

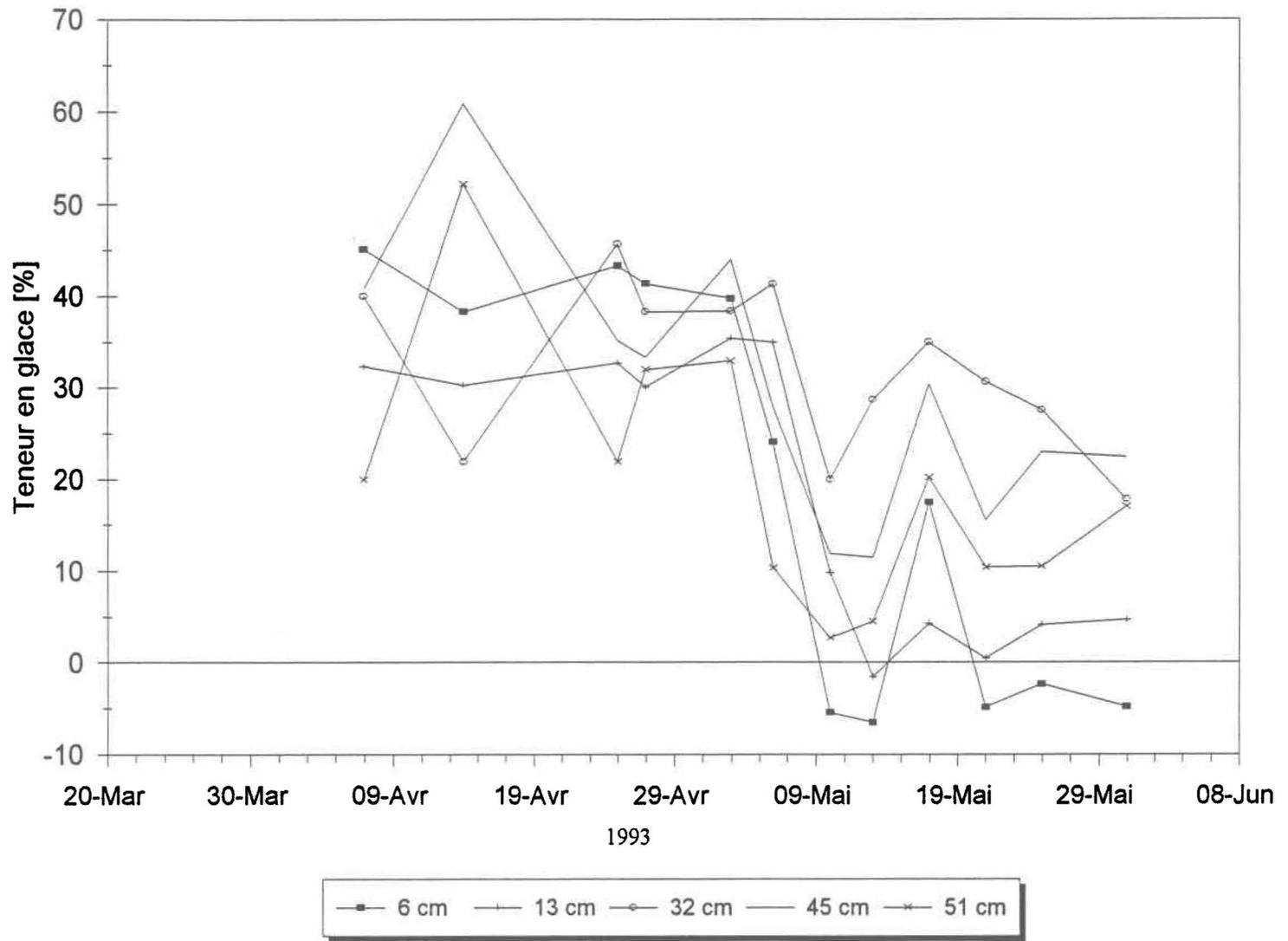
Position de la nappe phréatique pour l'hiver 1992-93.



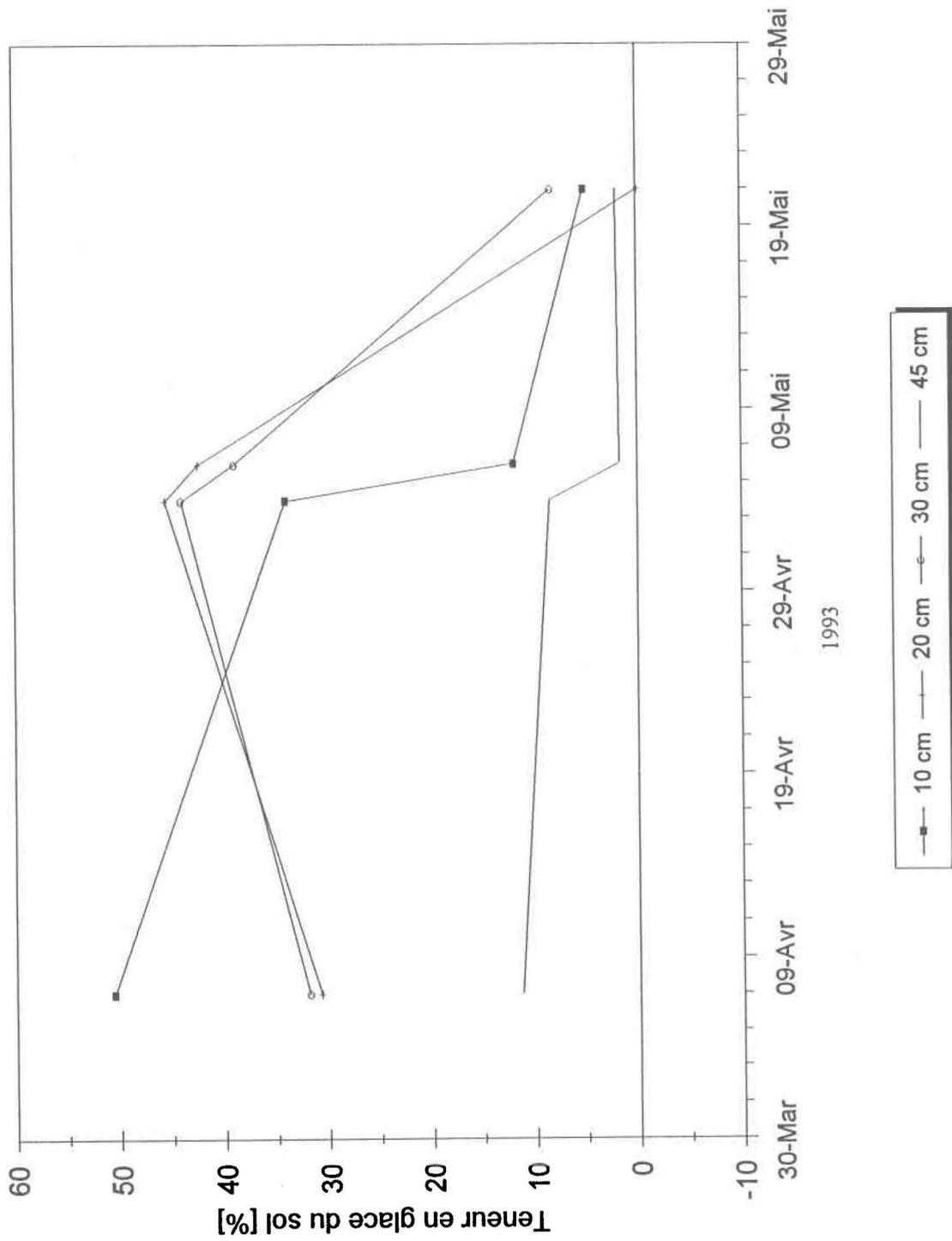
Position de la nappe phréatique pour l'hiver 1992-93.

ANNEXE 14

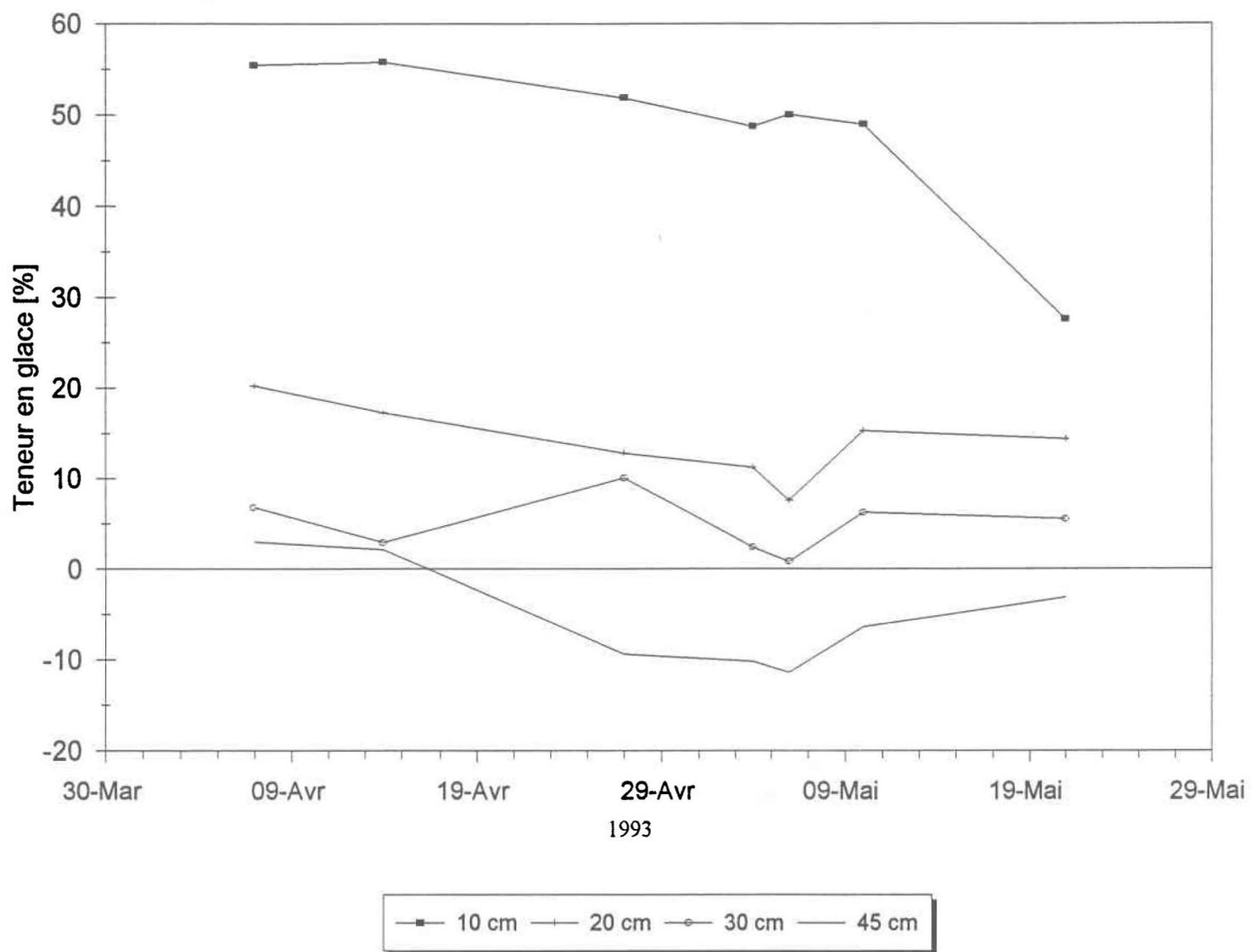
**Teneur en glace du sol sur chaque sous-site pour l'hiver
1992-93.**



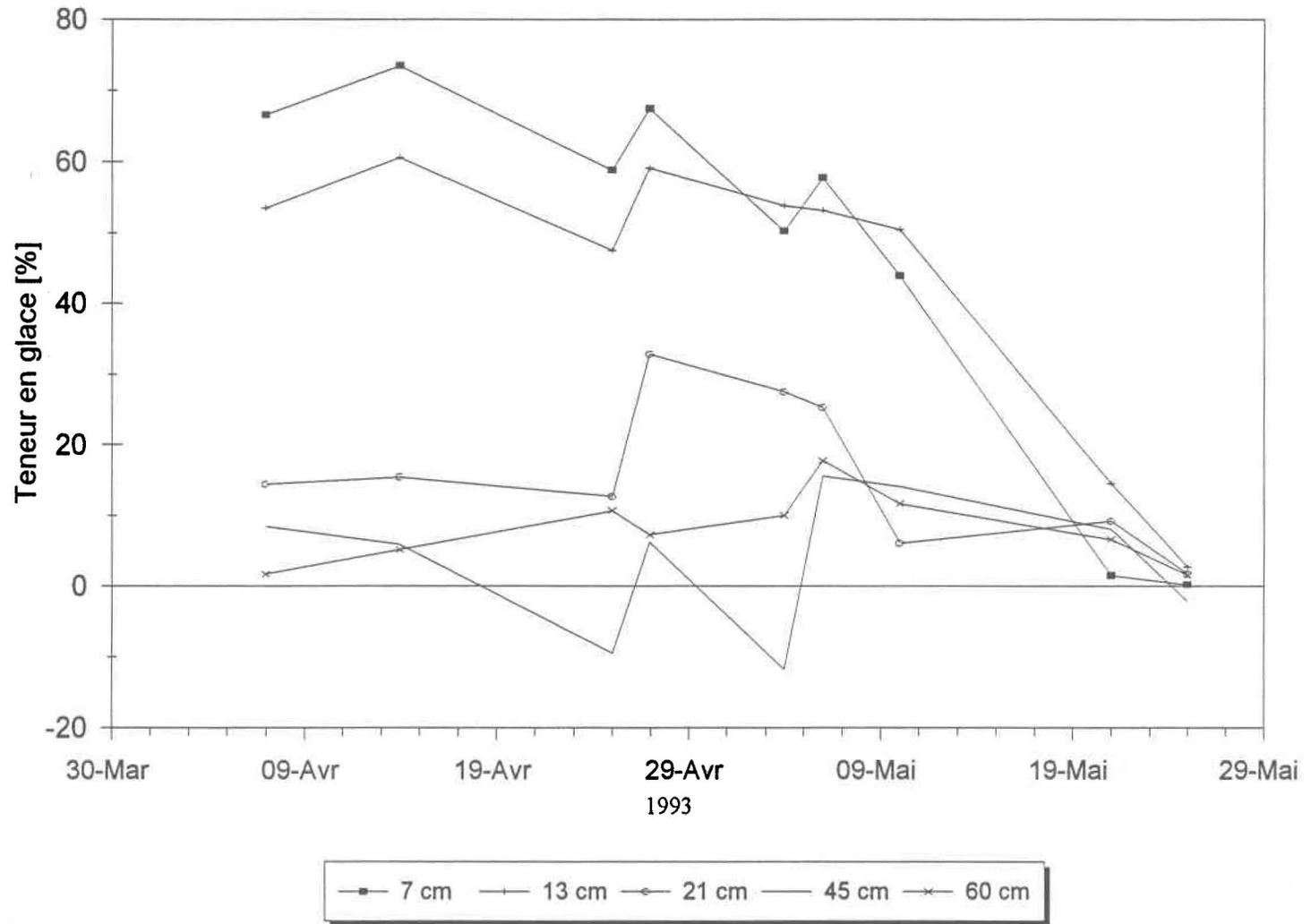
Sous-site DU



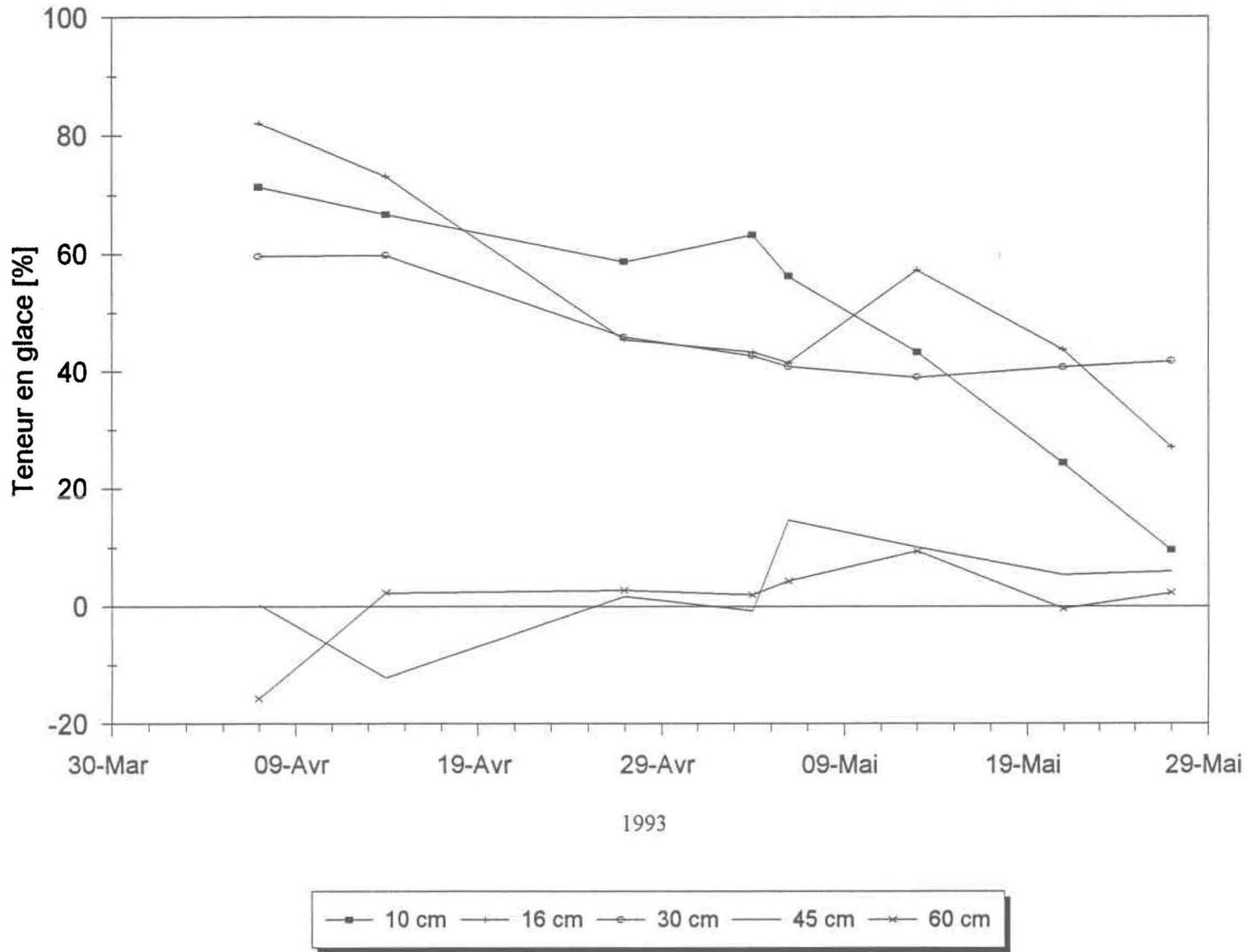
Sous-site HN



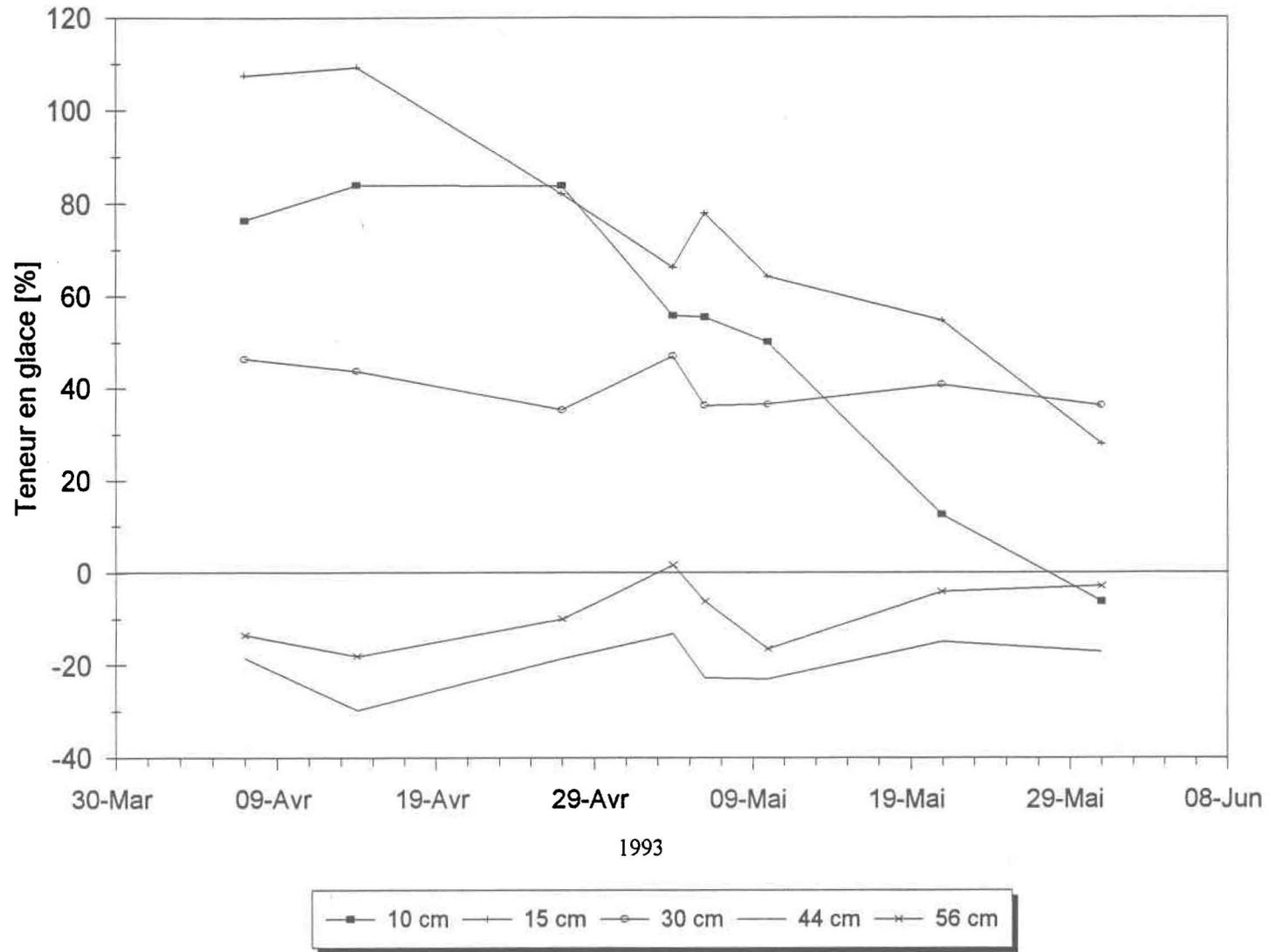
Sous-site HW



Sous-site SH



Sous-site SE



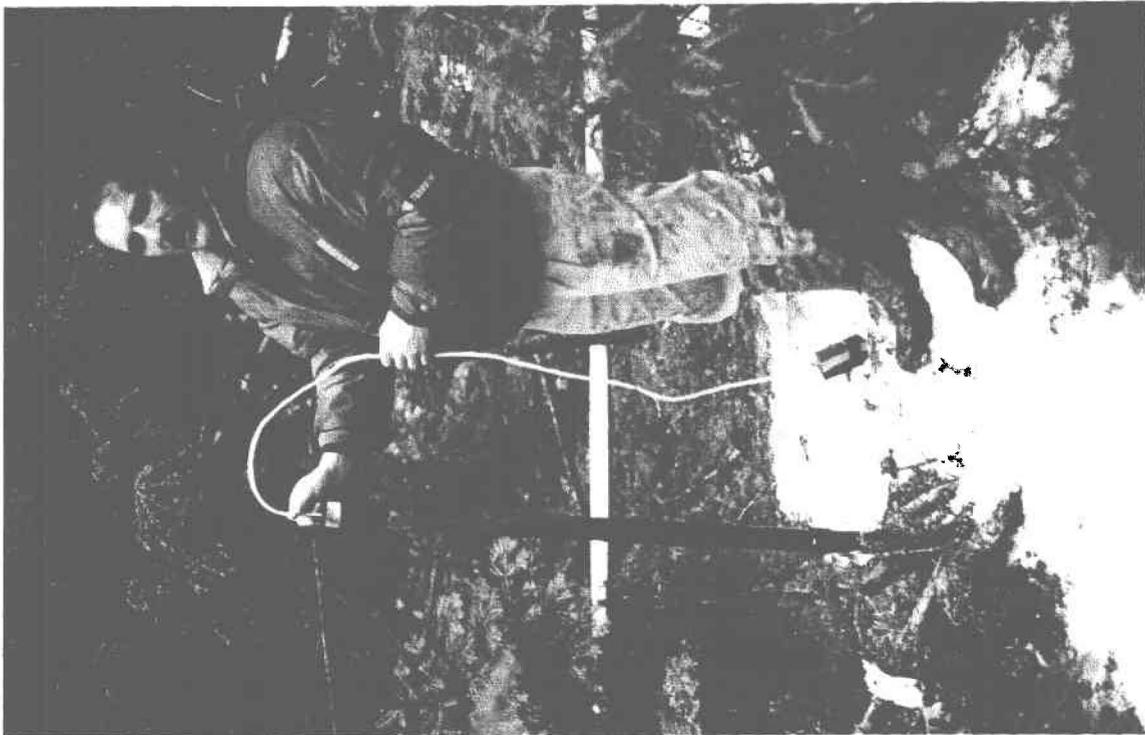
Sous-site SS

ANNEXE 15

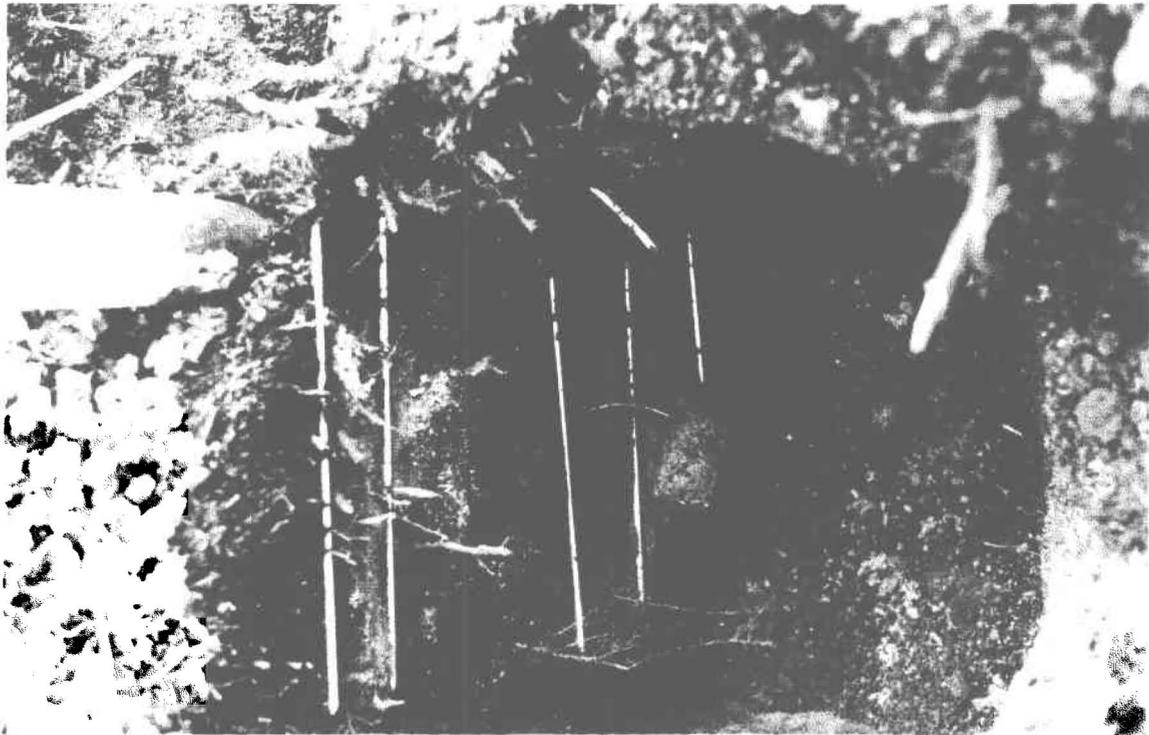
Documentation photographique.



Tige métallique servant à évaluation du type de gel.



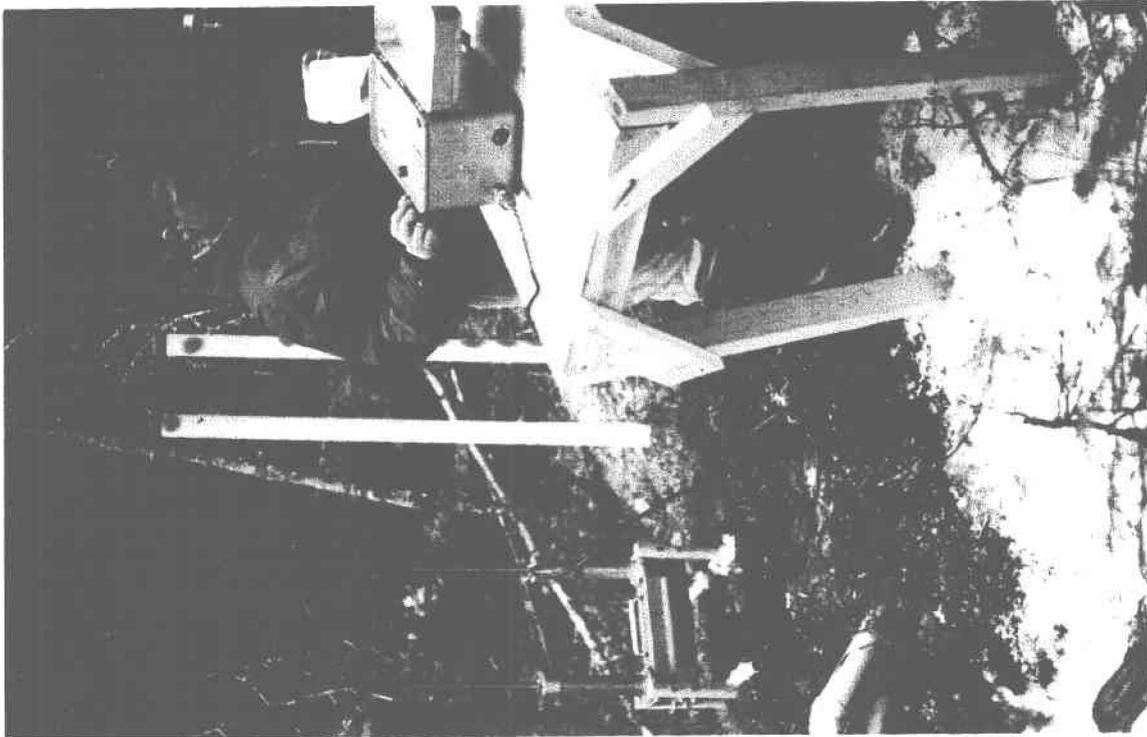
Mesure de la profondeur de la nappe phréatique sur le site SPH.



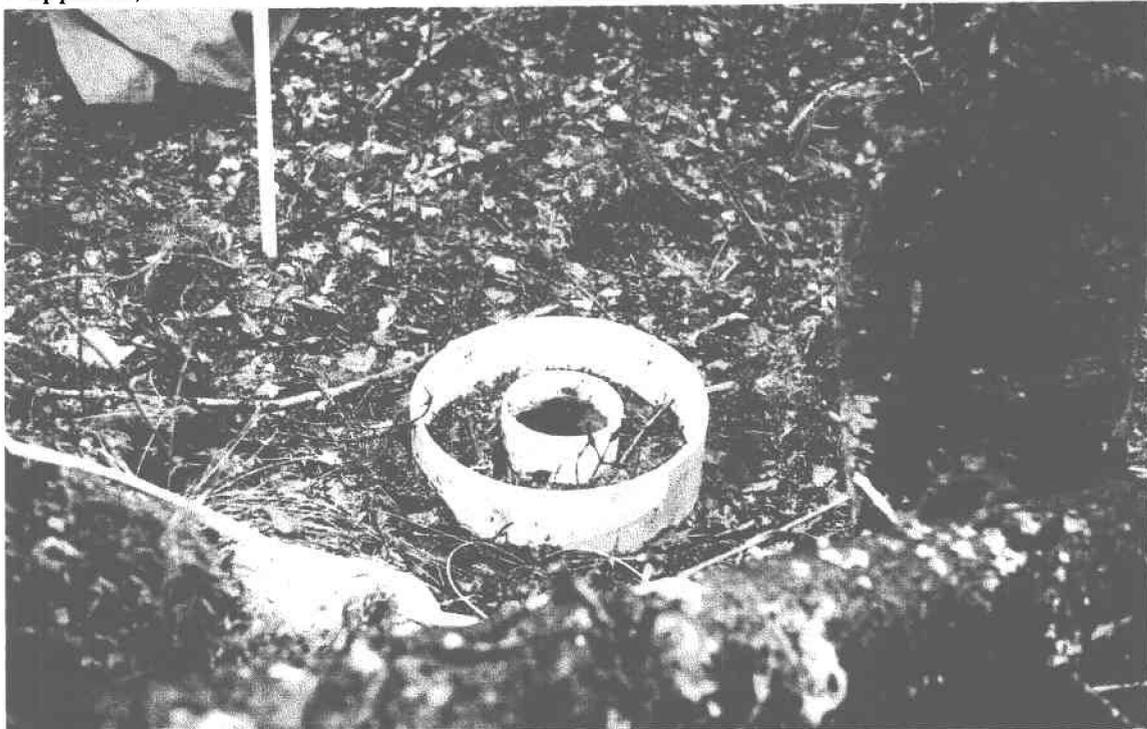
Profil vertical du sol sur le site DEBR. On remarque les différentes couches du sol, les tiges des sondes TDR et le tuyau du système gamma.



Prise des échantillons gravimétriques du sol sur le site DEBR.



Dispositif de mesure de la teneur en eau totale du sol sur le site HYP (calibration de l'appareil).



Infiltromètre à double anneau utilisé pour l'évaluation de la capacité d'infiltration du sol (site DEBR).