

Record Number:

Author, Monographic: Deschênes, J./Villeneuve, J. P.

Author Role:

Title, Monographic: Étude au moyen du modèle couplé du système hydrologique du lac
Laflamme

Translated Title:

Reprint Status:

Edition:

Author, Subsidiary:

Author Role:

Place of Publication: Québec

Publisher Name: INRS-Eau

Date of Publication: 1983

Original Publication Date: Décembre 1983

Volume Identification:

Extent of Work: iv, 84

Packaging Method: pages incluant un annexe

Series Editor:

Series Editor Role:

Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche

Series Volume ID: 162

Location/URL:

ISBN: 2-89146-160-6

Notes: Rapport annuel 1983-1984

Abstract: 15.00\$

Call Number: R000162

Keywords: rapport/ ok/ dl

ÉTUDE AU MOYEN DU MODÈLE COUPLÉ
DU SYSTÈME HYDROLOGIQUE DU LAC LAFLAMME

Rapport scientifique no 162

par

J. Deschesnes et J.P. Villeneuve

Université du Québec
INRS-Eau
C.P. 7 500
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4C7

Décembre 1983

Rapport scientifique no 162

par

J. Deschesnes et J.P. Villeneuve

Université du Québec

INRS-Eau

C.P. 7 500

Sainte-Foy (Québec)

G1V 4C7

ÉTUDE AU MOYEN DU MODÈLE COUPLÉ
DU SYSTÈME HYDROLOGIQUE DU LAC LAFLAMME

Décembre 1983

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier la direction et le personnel d'Environnement Canada, Direction générale des Eaux intérieures, région de Québec, pour leur participation à la réalisation de ce document.

Leurs remerciements vont également à monsieur Emmanuel Ledoux, directeur adjoint du Centre d'Informatique géologique de Fontainebleau et à monsieur Georges Girard, directeur de recherche à l'O.R.S.T.O.M., pour leur judicieux conseils lors du montage et du calage du modèle couplé.

Ils remercient aussi l'équipe de monsieur Pierre Gélinas, directeur du Département de géologie de l'Université Laval, pour leur coopération apportée lors de la collecte des données hydrogéologiques et monsieur Gilles Lemieux du Département d'aménagement et de sylviculture de la Faculté de foresterie et de géodésie de l'Université Laval pour sa collaboration lors de la collection des données météorologiques.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
TABLE DES MATIÈRES	ii
LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
INTRODUCTION	1
Présentation générale des lieux: la forêt Montmorency	3
- Localisation	3
- Climatologie	3
- Physiographie	8
Description du bassin versant	12
- Géologie et géomorphologie	12
- Physiographie et topographie	18
- Météorologie	23
- Hydrologie	28
- Hydrogéologie	32
- Hypothèses sur l'écoulement	33
Modélisation des écoulements	37
- Les données disponibles	37
- Modélisation du bassin versant	40
. La couche de surface	40
. La couche souterraine	42
- Le calage du modèle	43
- Résultats et discussion	44
CONCLUSION	53
BIBLIOGRAPHIE	54
ANNEXE	A.1

LISTE DES FIGURES

1	Localisation de la forêt Montmorency	4
2	Localisation du lac Laflamme au sein de la forêt Montmorency	5
3	Graphique des températures moyennes à la station principale de la forêt Montmorency (1966-1980)	10
4	Graphiques illustrant la répartition temporelle des précipitations moyennes (1966-1980)	11
5	Carte géologique	14
6	Types géomorphologiques rencontrés sur le bassin versant	15
7	Épaisseurs moyennes des dépôts meubles	17
8	Carte topographique du bassin versant	19
9	Profil du bassin versant	20
10	Carte de peuplement	21
11	Symboles cartographiques pour la carte de peuplements	22
12	Ruisseaux et résurgences sur le pourtour du lac Laflamme	26
13	Graphique des précipitations et des débits mensuels à l'exutoire au lac Laflamme (1981-1982)	27
14	Classes de Drainage des sols	30
15	Bathymétrie du lac Laflamme	31
16	Limite approximative de la zone recharge - décharge par voie souterraine	34
17	Zones de contact surface - souterrain	36
18	Chronogramme des observations utilisé pour le calage	39
19	Maillage de la couche de surface	41
20	Hydrogrammes calculés et observés	47
21	Proportions des précipitations affectées aux composantes de l'écoulement	48
22	Comparaison des piézométries calculées et observées	50

LISTE DES TABLEAUX

1	Le climat de la forêt Montmorency (1966-1980)	6
2	Moyennes mensuelles de quelques valeurs climatologiques à la station principale de la forêt Montmorency (1966-1980)	9
3	Répartition de la contenance à la forêt Montmorency	13
4	Équations degré-jour adaptées au bassin du lac Laflamme	25
5	Valeurs des paramètres des fonctions production	45

INTRODUCTION

Le programme d'étude fédéral sur le transport des polluants atmosphériques sur de grandes distances inclut l'étude de trois bassins versants lacustres dans le but de mieux connaître l'impact des polluants atmosphériques sur les écosystèmes aquatiques de l'est du Canada. Ailleurs qu'au Québec, des programmes sont en cours en Ontario et en Nouvelle-Écosse.

Au Québec, on étudie l'effet de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes aquatiques de la forêt boréale. On traite particulièrement de l'impact des pluies acides sur les composantes de l'écosystème aquatique et forestier.

Le bassin versant retenu est celui du lac Laflamme, un des lacs de la forêt expérimentale Montmorency. Une des caractéristiques de ce lac est sa résistance apparente à l'acidification en dépit de l'acidité élevée des précipitations qu'il reçoit. Aussi, les différentes études entreprises jusqu'à maintenant tentent-elles d'élucider les mécanismes par lesquels le lac et son bassin conservent un pouvoir tampon élevé. Pour atteindre cet objectif, des études portant sur les conditions chimiques du bassin et sur la détermination du bilan ionique du lac ont été mises de l'avant.

L'application du modèle couplé eau de surface - eau souterraine sur le bassin versant vise deux objectifs : établir un bilan hydrique global essentiel à la détermination d'un bilan ionique et cerner le cheminement de

l'eau, ce qui ajoutera à la compréhension de l'évolution chimique de l'eau qui circule au travers du bassin.

Ce document présente le cadre physique général de l'étude, décrit la physionomie du bassin versant et expose les étapes et les résultats de l'application du modèle couplé. Les principes et la structure du modèle sont donnés en annexe.

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES LIEUX : LA FORÊT MONTMORENCY

1.1. Localisation

Le bassin versant du lac Laflamme est situé au sein de la forêt Montmorency de l'Université Laval. Il y occupe une partie du compartiment vingt-quatre (24).

Cette forêt expérimentale se situe à quelque quatre-vingts kilomètres au nord-est de la ville de Québec. La figure 1 situe la forêt Montmorency et la figure 2 montre l'emplacement du lac Laflamme à l'intérieur de celle-ci.

La forêt Montmorency fait partie du Parc des Laurentides reconnu pour ses fortes précipitations et son climat froid et humide. Cette région repose sur le massif du bouclier canadien formé de roches cristallines et datant de l'époque précambrienne.

1.2. Climatologie

Le climat de la forêt Montmorency est rigoureux avec des conditions particulièrement humides et fraîches; la température moyenne est de 0,2° C et la précipitation moyenne annuelle de 1,43 m.

Le tableau 1 donne une description détaillée du climat de la forêt pour une période d'observation s'étendant sur quatorze années (1966-1980).

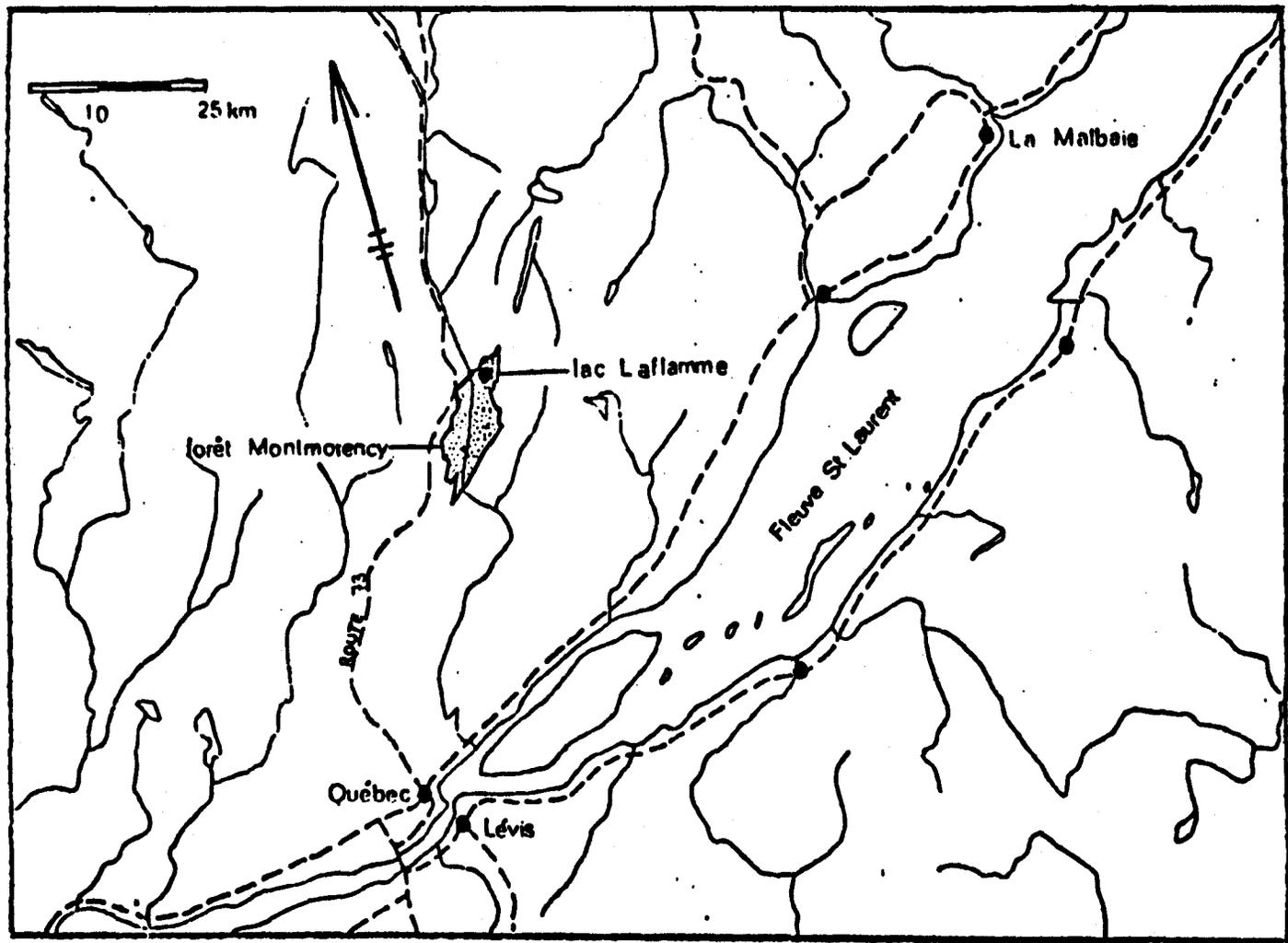


Figure 1: Localisation de la forêt Montmorency

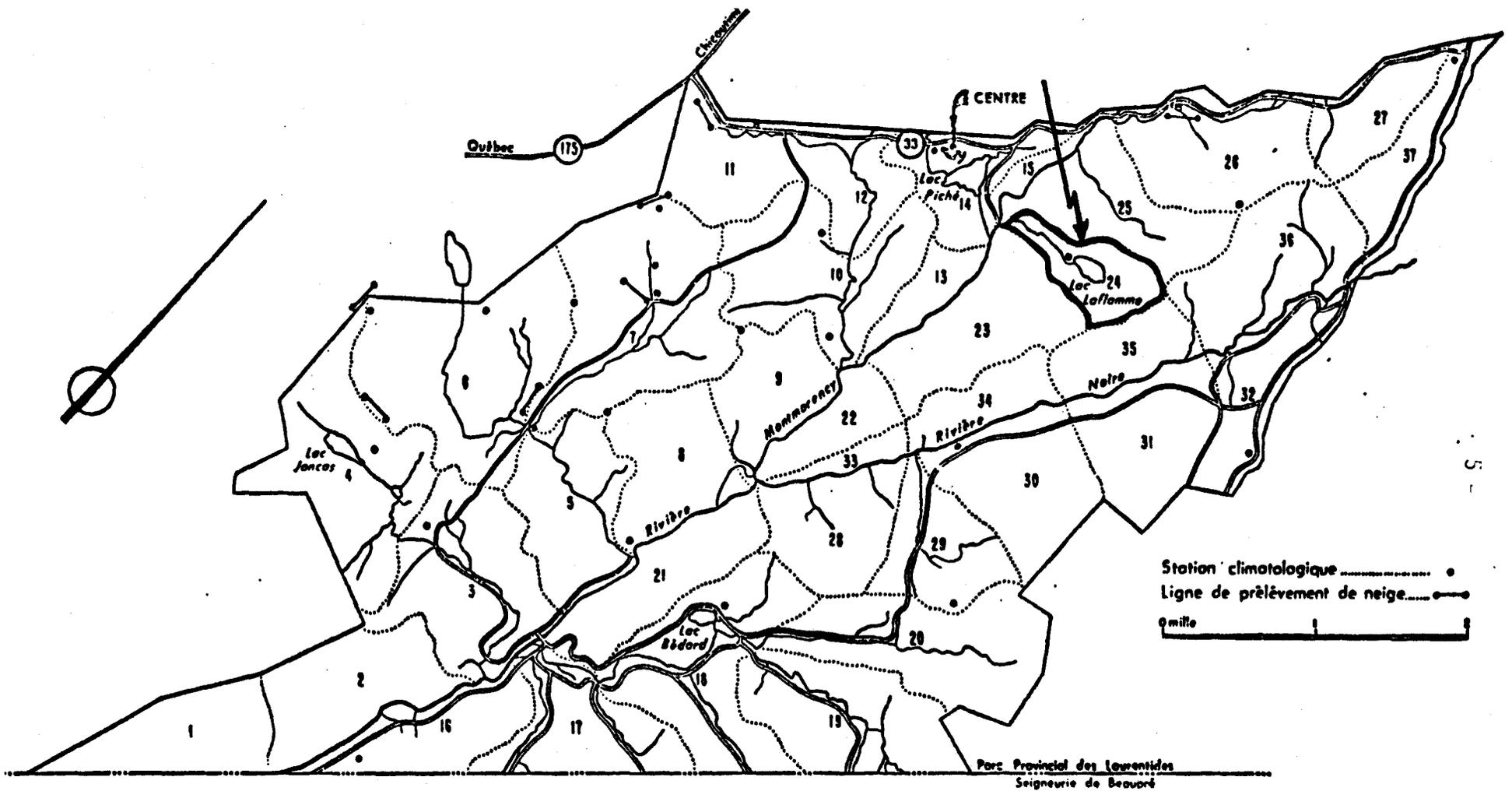


Figure 2 : Localisation du lac Laflamme
au sein de la Forêt Montmorency

TABLEAU 1LE CLIMAT DE LA FORET MONTMORENCY (1966-1980)

Lat.: 47° 19' Long.: 71° 09' Alt.: 670 m

Froid: T° moyenne: 0,2° C

Humide: Précipitation moyenne annuelle: 1,43 m

<u>Température (°Celsius)</u>	<u>Moyenne</u>	<u>Extrême</u>	<u>(Année)</u>
Maximum moyen	6,0	6,9	(1973)
Minimum moyen	-5,7	-7,3	(1972)
Moyenne annuelle	0,2		
Année la plus chaude: 1973	1,6		
Année la plus froide: 1972	-1,1		
Moyenne du mois le plus chaud: juillet	14,8	16,7	(1975)
Moyenne du mois le plus froid: janvier	-15,2	-18,8	(1970)
Température maximum absolue: 1 ^{er} août 1975	34,0		
Température minimum absolue: 23 février 1972	-41,0		
Nombre annuel moyen de jours de gel (T° min. ≤ 0.0° C)	234,3	250 213	(1972) (1974)
Durée annuelle de la période de croissance (mi-mai - début octobre)	142,9 jours	160 121	(1970) (1974)
<u>Précipitation</u>			
Moyenne annuelle sous forme de pluie	947,4 mm	1 164,3 726,9	(1973) (1978)
Moyenne annuelle sous forme de neige (equiv. eau)	482,0 mm		
Hauteur annuelle de la chute de neige	633,0 cm		
Moyenne annuelle de la précipitation totale	1 429,4 mm		
Hauteur saisonnière de la chute de neige	625,1 cm	889,8 369,6	(1976-77) (1967-68)
Année la plus humide: 1976	1 680,2 mm		
Année la plus sèche: 1968	1 157,2 mm		
Moyenne du mois le plus humide: août	162,8 mm	228,6	(1972)
Le mois le plus humide: décembre 1973	260,1 mm		
Moyenne du mois le plus sec: février	75,4 mm	10,9	(1978)
Le mois le plus sec: février 1978	10,9 mm		
Pluie maximum en une journée: 6 septembre 1979	92,3 mm		
Neige maximum en une journée: 4 avril 1975	49,3 cm		
Nombre annuel moyen de jours avec précipitation	215,8	252 194	(1976) (1967)

Autres éléments

Vitesse moyenne du vent (1968-80)	7,0 km/h	7,7 6,4	(1968) (1972)
Moyenne annuelle d'heures d'insolation	1 763,2 *(39,4%)	1 934,4 (43,3% - 1978) 1 618,7 (36,2% - 1973)	
Moyenne mensuelle du mois le plus ensoleillé (Juillet)	231,5 h *(48,2%)		
Le mois le plus ensoleillé: mai 1977	289,6 h *(61,8%)		
Evaporation moyenne de juin à septembre (1967-80) en mm	383,0	439,7 316,0	(1967) (1977)
Pourcentage évaporation p/r précipitation totale de juin à septembre	65,5 %	94,3% 52,8%	(1978) (1970)

* % p/r à la durée possible.

On y note que le mois le plus chaud est juillet et le plus froid est janvier (14,8° C et -15,2° C respectivement). On remarque plus particulièrement que le nombre annuel moyen de jours de gel et le nombre annuel moyen de jours avec précipitation sont, dans l'ordre, 234,8 et 215,8, ceci représentant 64 % et 59 % de l'année.

La forêt reçoit en moyenne 1,429 m d'eau par année dont 66,3 % sous forme de pluie et 33,7 % sous forme de neige. Le tableau 2 résume les valeurs moyennes mensuelles des températures et des précipitations tandis que les figures 3 et 4 illustrent schématiquement ces données.

La station météorologique principale de la forêt Montmorency porte le numéro 674 dans le répertoire des stations du Québec et le numéro 7042388 dans celui du réseau des stations canadiennes.

1.3. Physiographie

Le forêt Montmorency occupe une surface de 67 km² et son altitude se situe entre 600 et 1 000 mètres, la station principale étant à 670 m. Les coordonnées à la station principale sont les suivantes : latitude 47°19', longitude 71°09'.

La végétation occupe toute la forêt et est constituée principalement de sapin baumier (Abies balsamea (L.) Mill) avec un peu d'épinette (Picea spp) et de bouleau à papier (Betula papyrifera Marsh). Cette zone de végétation boréale appartient au domaine climacique de la sapinière à bouleau blanc.

Tableau 2: Moyennes mensuelles de quelques valeurs climatologiques à la station principale de la forêt Montmorency (1966-1980)

MOIS	TEMPERATURE MOYENNE (°C)	MAXIMUM		MINIMUM		PRECIPITATION TOTALE (mm)	PLUIE (mm)	NEIGE (mm)	H.NEIGE (cm)	NOMBRE DE JOURS AVEC PRECIPITATION
		MOYEN (°C)	ABSOLU (°C)	MOYEN (°C)	ABSOLU (°C)					
Janvier	-15,2	- 9,3	7,5	-21,2	-39,0	98,5	17,0	81,4	117,5	20,3
Février	-14,8	- 8,3	6,5	-21,3	-41,0	75,4	6,5	69,0	91,6	17,3
Mars	- 7,9	- 1,5	15,5	-14,4	-37,0	101,4	26,2	75,3	100,2	19,0
Avril	- 1,1	4,7	19,0	- 7,1	-28,0	82,2	40,0	42,2	57,6	14,5
Mai	6,1	12,8	29,0	- 0,6	-17,5	101,6	91,1	10,5	11,9	14,4
Juin	12,4	19,0	29,5	5,8	- 5,5	125,8	125,6	0,1	0,1	16,7
Juillet	14,8	21,1	29,5	8,4	- 1,5	153,7	153,7	< T	< T	17,3
Août	13,5	19,4	34,0	7,5	- 2,0	162,8	162,8	<0,1	<0,1	18,4
Septembre	8,6	14,0	28,5	3,1	-10,0	141,5	139,5	2,0	2,0	17,9
Octobre	2,6	7,0	24,5	- 1,7	-21,0	129,4	101,0	28,4	28,0	18,5
Novembre	- 4,2	- 0,1	14,5	- 8,2	-30,0	119,5	53,8	65,7	88,3	20,5
Décembre	-12,6	- 6,9	8,5	-18,3	-37,0	137,6	30,2	107,4	135,8	21,1
Valeurs annuelles	0,2	6,0	34,0	- 5,7	-41,0	1429,4	947,4	482,0	633,0	215,8

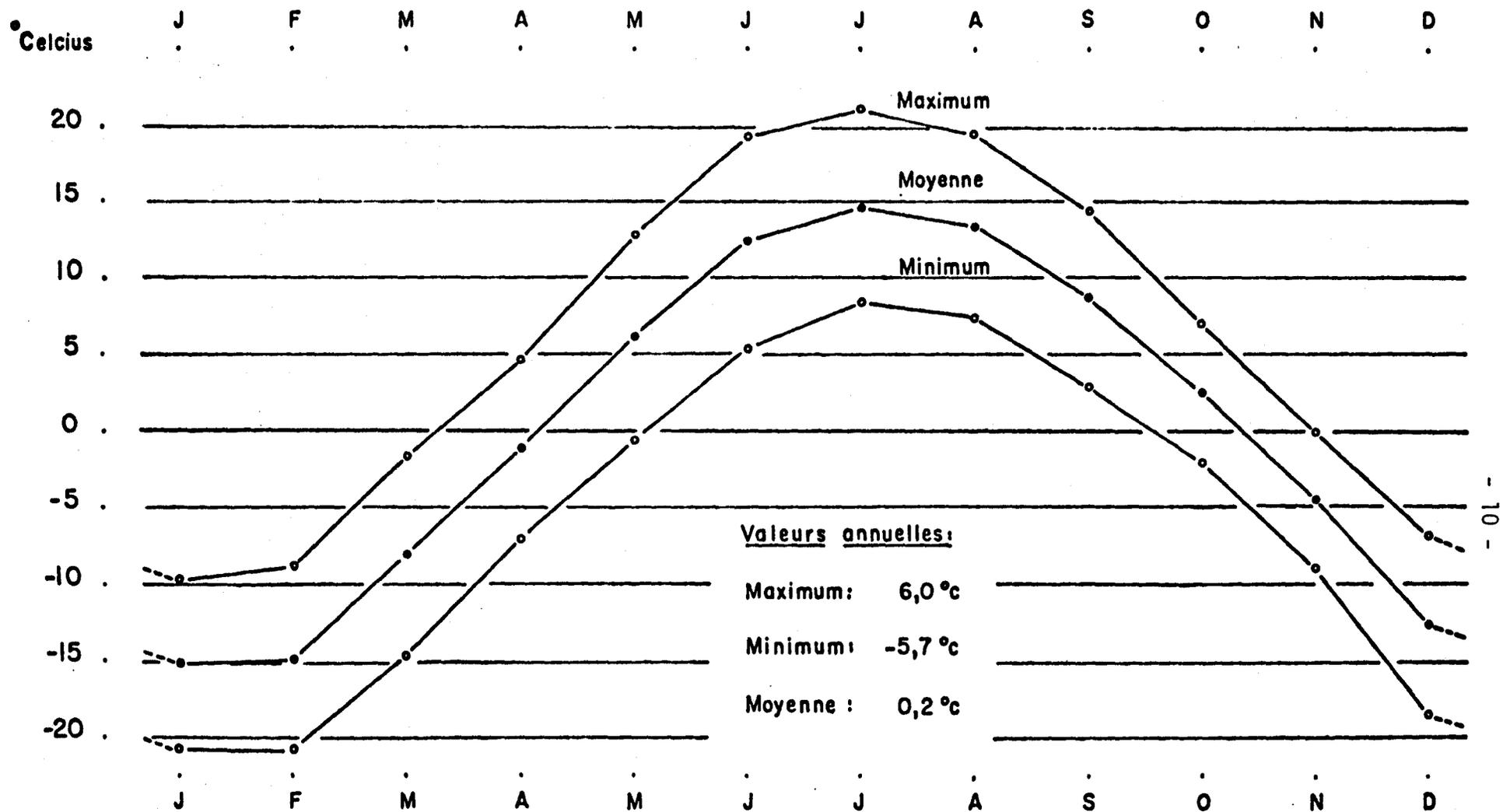


Figure 3: Graphique des températures moyennes à la station principale de la forêt Montmorency (1966-1980)

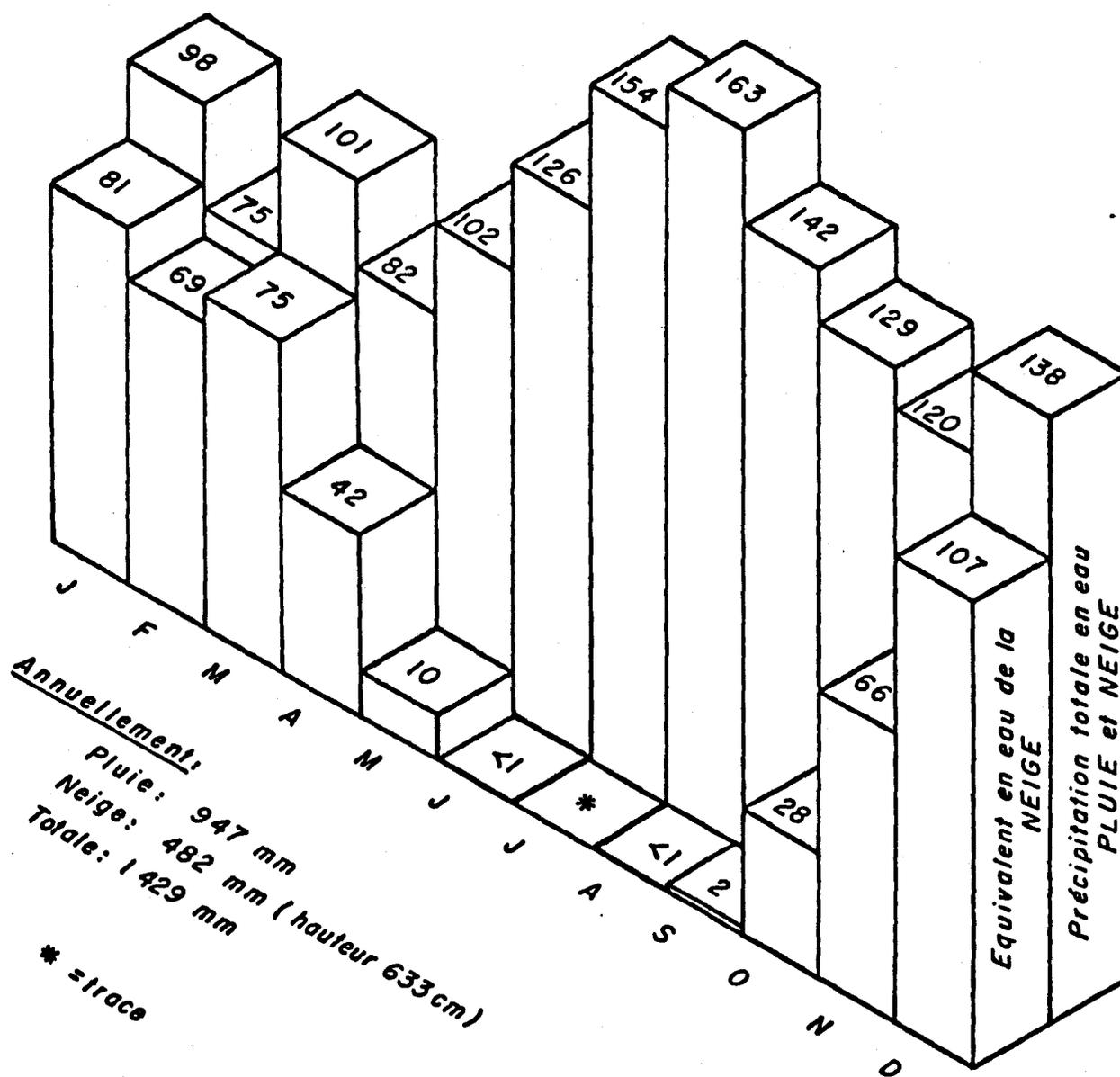


Figure 4: Graphique illustrant la répartition temporelle des précipitations moyennes (1966-1980)

Dans l'ensemble, les peuplements forestiers sont jeunes (40 ans). Le tableau 3 nous montre la répartition de la contenance à la forêt Montmorency.

L'eau représente environ 1 % de la superficie et on y compte quatre lacs. La forêt est aussi traversée par les rivières Montmorency et Noire (figure 2).

DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT

Géologie et géomorphologie

La région fait partie du bassin cristallin du bouclier canadien datant de l'époque précambrienne. L'assise rocheuse non fissurée et imperméable se compose de gneiss charnockitique et s'étend sous la totalité du bassin. Ce secteur est borné au nord par un massif de mangérite (figure 5).

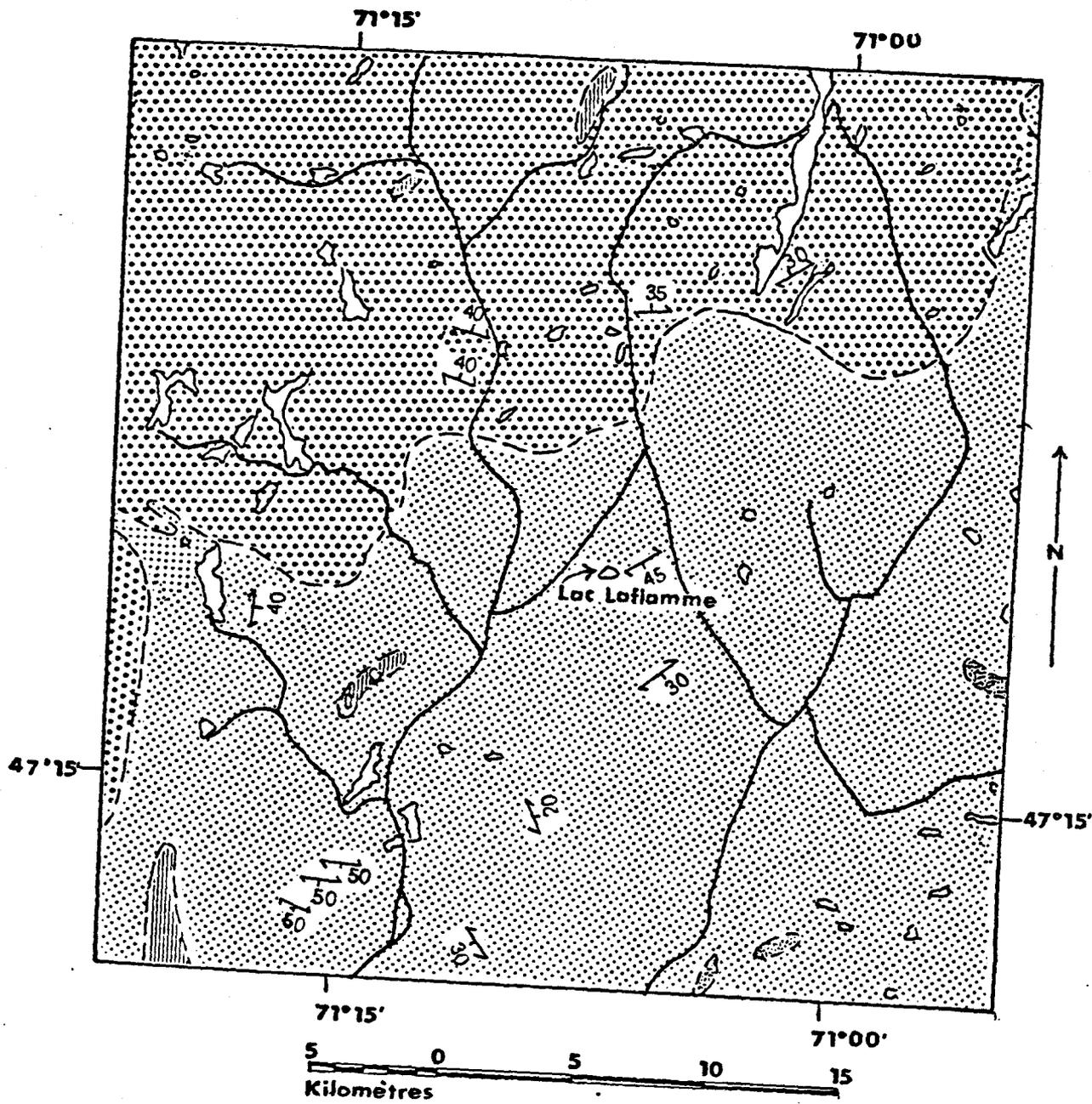
Cette roche en place est recouverte de till qui s'est déposé durant la fonte des glaciers qui recouvrirent la région lors de la période glaciaire du Pléistocène. La figure 6 montre la répartition spatiale des différents types géomorphologiques rencontrés sur le bassin et identifiés par Jurdant et Bernier (1965). Il s'agit :

- de la moraine de fond : till basal granitique sablo-limoneux, caillouteux, peu rocheux, profond et très compact;

TABLEAU 3
Répartition de la contenance
à la forêt Montmorency

	SUPERFICIES			
	ACRES	MILLES CARRÉS	HECTARES	%
TERRAINS FORESTIERS PRODUCTIFS	15 566	24,3	6 302	95
En voie de régénération	835	1,3	338	5
Régénération	1 494	2,3	605	9
Jeune	10 040	15,7	4 055	61
Mûr régulier	506	0,8	205	3
Mûr irrégulier	2 691	4,2	1 089	17
TERRAINS FORESTIERS IMPRODUCTIFS	328	0,5	133	2
TERRAINS NON-FORESTIERS	358	0,6	142	2
TOTAL TOUTS LES TERRAINS	16 252	25,4	6 577	99
Eau	217	0,3	88	1
TOTAL POUR LA FORÊT MONTMORENCY	16 469	25,7	6 665	100

Tiré de Bouliane et al (1976)



- | | | | |
|---|--------------------------------|---|--------------------------------------|
|  | Mangérite |  | lac |
|  | Gneiss charnockitiques |  | direction et pendage de la foliation |
|  | Granite avec pegmatite |  | Route toute saison |
|  | Amphibolite gneiss et schistes | | |

Figure 5: Carte géologique (dans Azzaria et al., 1982)

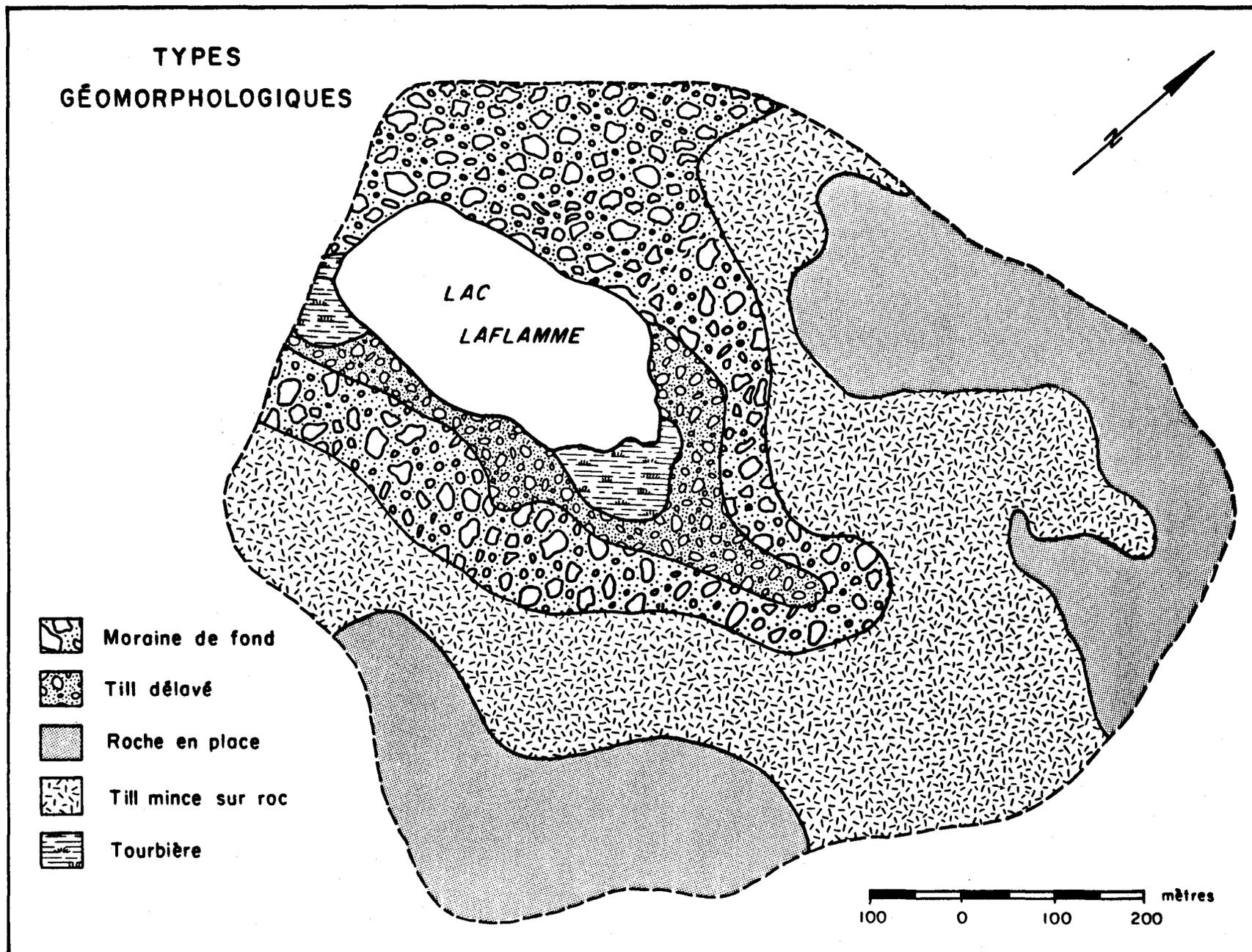


Figure 6: Types géomorphologiques rencontrés sur le bassin versant (d'après Jurdant et Bernier, 1965)

- du till délavé : appauvri en éléments fins par l'action fluviatile, sable graveleux et rocheux, homogénéité variable;
- du till mince sur roche en place : sable limoneux très caillouteux et rocheux, moins de 1 m d'épaisseur;
- de la roche en place : gneiss granitique

Leurs épaisseurs varient sur tout le bassin. Les études sismiques réalisées sur le bassin (Robitaille et Wilhelmy, 1981) et sous le lac (Bernier et Robitaille, 1982) indiquent que l'épaisseur maximale des dépôts se situe sous le lac et près de son exutoire. Ces résultats sont en accord avec ceux de Rochette (1971) qui, lors d'une étude hydrogéologique sur le bassin du Ruisseau des Eaux Volées situé à quelques kilomètres du lac Laflamme, indique des épaisseurs maximales dans le fond des vallées.

En général, on observe sur le bassin versant de faibles épaisseurs. L'épaisseur maximale est de trente-deux (32) mètres sous le lac. En moyenne, l'épaisseur des dépôts varie autour de 15 mètres sous le lac et à l'exutoire. Sur les versants, l'épaisseur diminue progressivement avec l'altitude. La figure 7 montre les épaisseurs moyennes des dépôts meubles. Cette carte fut déduite à partir des études sismiques et des cartes topographiques et géomorphologiques.

L'analyse granulométrique du till, réalisée par Azzaria et al. (1982), présente les dépôts comme étant composés principalement de sable et de gra-

ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES

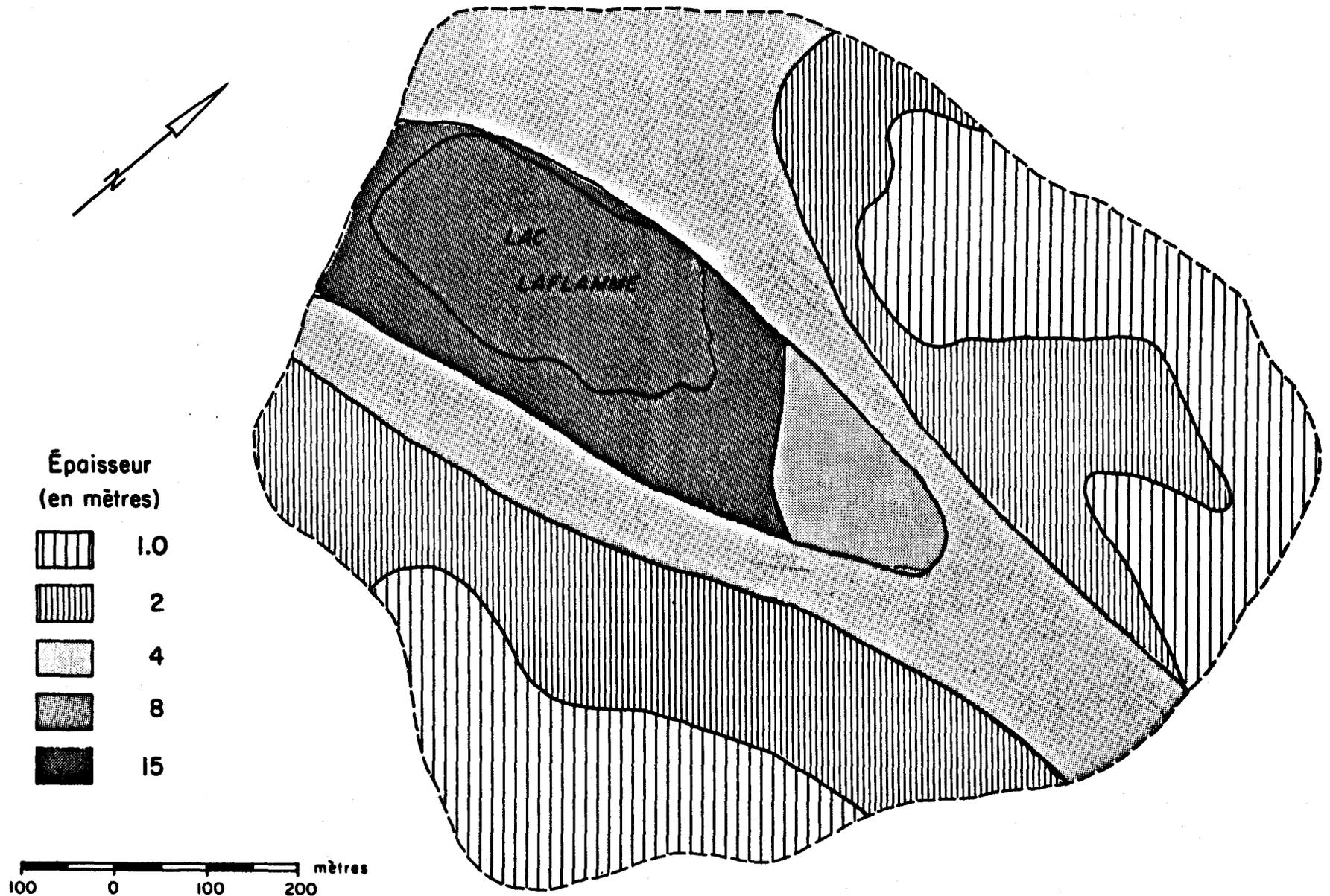


Figure 7: Épaisseur moyenne des dépôts meubles

vier. Les échantillons recueillis contiennent en moyenne 10 % de silt et d'argile.

Physiographie et topographie

Le bassin représente une dépression de surface restreinte de 68 hectares. Le lac y occupe près de 6 hectares, soit 8 % de la surface totale. La dénivelée maximale du bassin est de 107 m, correspondant à la différence entre le niveau du lac (777 m) et le point le plus haut (884 m) au nord-est. La pente maximale enregistrée est de 30 % tandis que la pente moyenne du terrain est de 9,3 %. La figure 8 définit les limites du bassin versant et montre sa topographie. On remarque la régularité du relief (figure 9) et on observe que le versant nord offre des élévations supérieures et des pentes plus fortes que le versant sud.

Cette région fait partie du domaine climacique de la sapinière à bouleau blanc. Comme le montre la carte de peuplements de la figure 10, le territoire est couvert en majorité par une sapinière jeune et dense. On note aussi sur le bassin la présence de tourbières à éricacées et une légère superficie occupée par la pessière noire à sphaignes et à lédum. Cette dernière est à l'intérieur de la tourbière qui est située à l'est du lac.

À partir du critère de densité des peuplements, on peut séparer le bassin en deux sections; la partie nord comporte des peuplements de densité uniforme B tandis que les versants sud montrent une hétérogénéité marquée

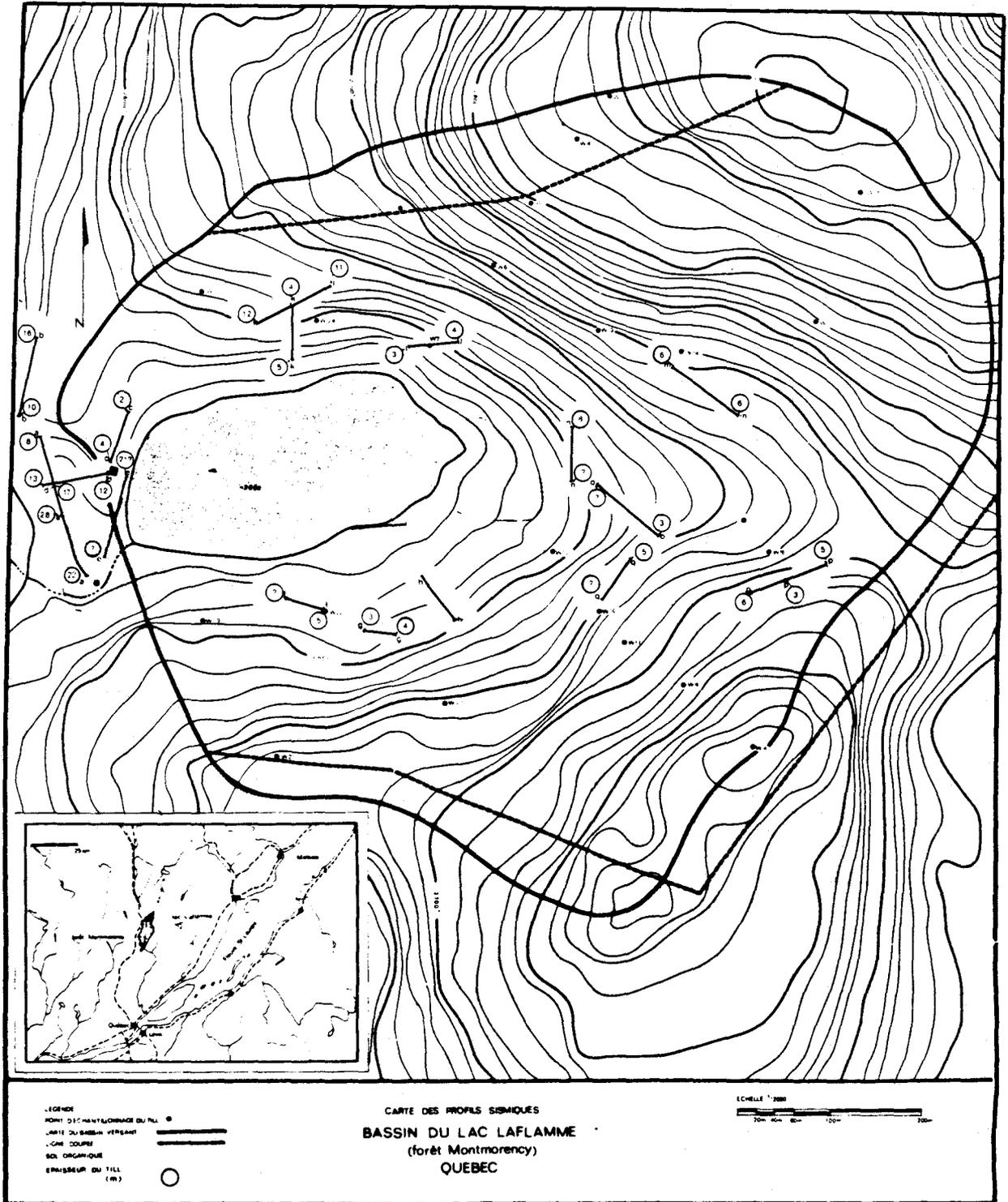


Figure 8: Carte topographique du bassin versant

PROFIL DU BASSIN VERSANT

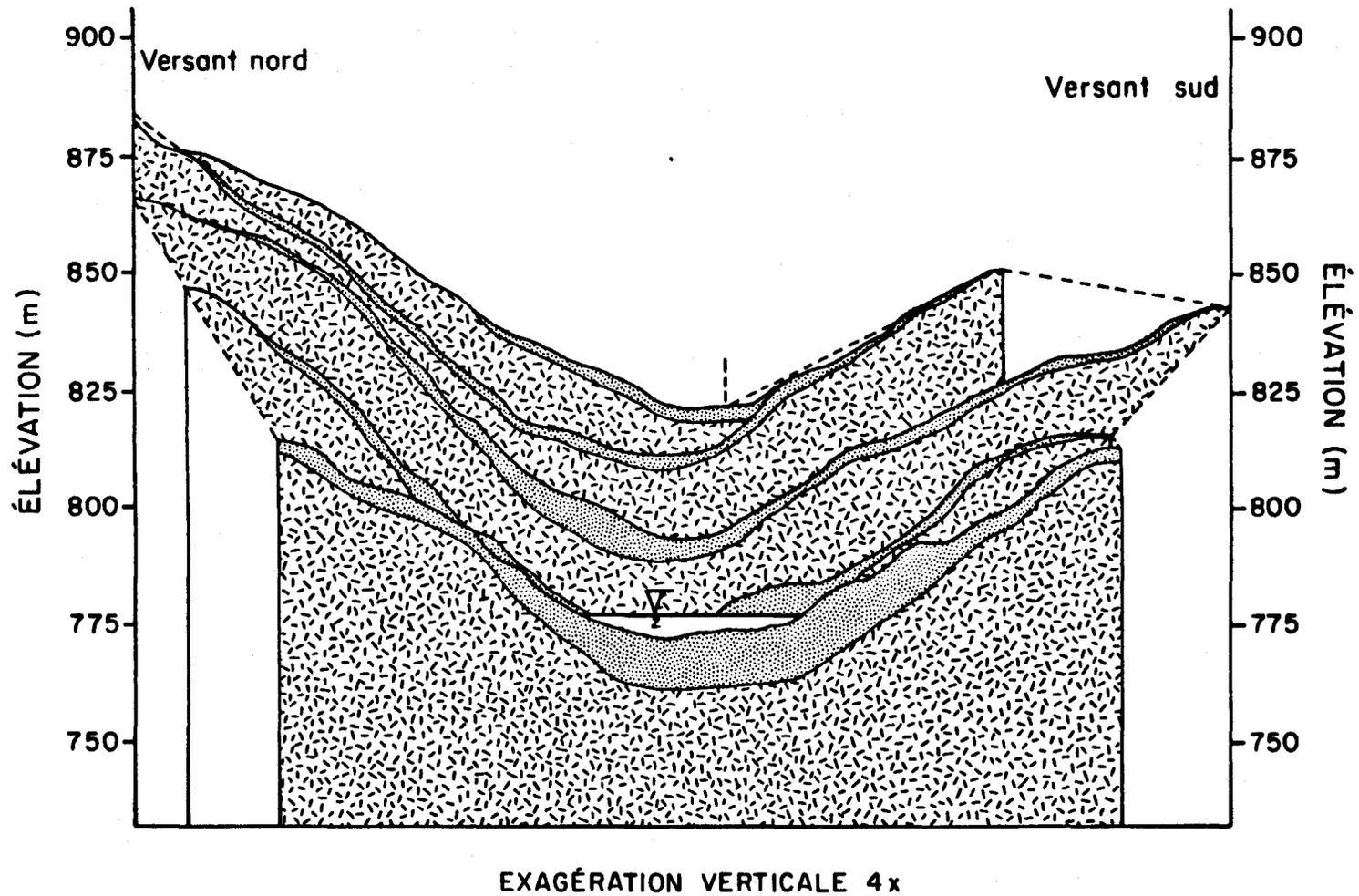


Figure 9: Profil du bassin versant

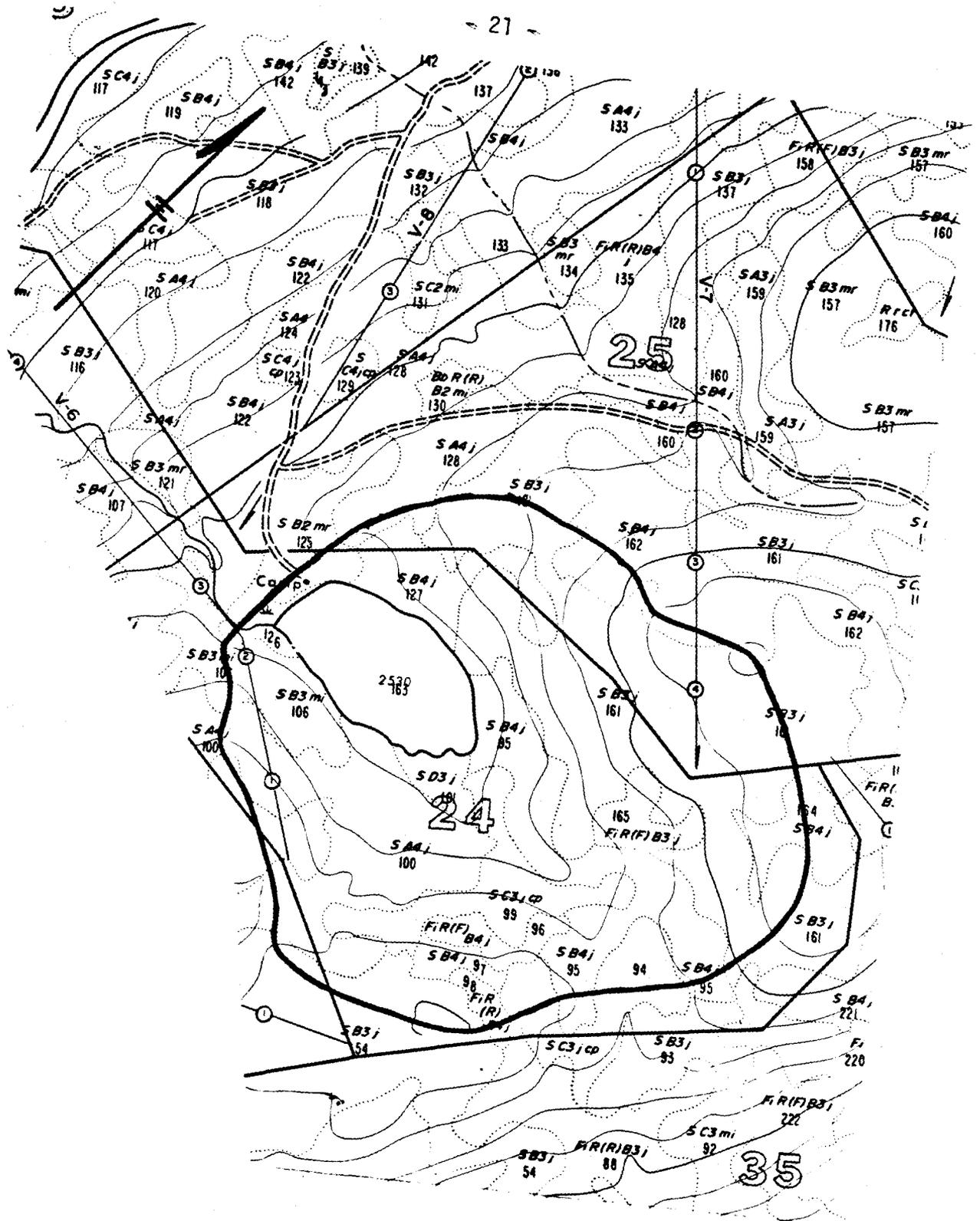


Figure 10: Carte de peuplements
Echelle 1 : 10 000

S : Sapinière

FIR (F): Feuillus d'essences intolérantes
avec résineux à dominance feuillue

FIR (R): Feuillus d'essences intolérantes
avec résineux à dominance résineuse

J : Jeune

mi : MOr irrégulier

cp : Coupe partielle

GRILLE DES INDICES DENSITÉ-HAUTEUR

Densité	Hauteur			
	70'	50'	30'	
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Densité "A" — 80%	A1	A2	A3	A4
Densité "B" — 60%	B1	B2	B3	B4
Densité "C" — 40%	C1	C2	C3	C4
Densité D — 25%	D1	D2	D3	D4

Figure 11 : Symboles cartographiques pour la carte de peuplement

puisqu'on retrouve des peuplements résineux et mélangés allant des densités A à D. À la figure 11, on retrouve les symboles cartographiques reliés à la carte de peuplements.

La végétation aquatique est luxuriante durant la saison de croissance. Elle occupe une bonne partie de la superficie du lac. La principale essence macrophyte est le Nuphar variegatum Engelm accompagnée souvent de Sagittaria graminea Michx.

Météorologie

La précipitation

La station principale de la forêt Montmorency fournit des relevés de quantité d'eau tombée durant l'année au pas de temps journalier. Comme l'indique la figure 4, la région reçoit en moyenne 1 429 mm d'eau annuellement sous toutes les formes dont 34 % sous forme de neige. Outre l'information météorologique disponible à la station principale, des études sur la pluie et sur la neige ont été effectuées plus spécifiquement sur le bassin versant.

Plamondon (1982) a mesuré la pluie à cinq stations réparties sur le bassin versant durant l'été 1981. Il en déduit que la pluie varie peu sur le bassin d'une station à l'autre. Toutefois, il a établi des relations entre les stations du bassin et la station 24, d'une part, et la station

principale, d'autre part. Ainsi, la précipitation moyenne sur le bassin peut-être estimée à l'aide des relations suivantes :

$$P = 0,97 P \text{ (station 24)}$$

$$P = 1,05 P \text{ (station principale)}$$

Plamondon et Prévost (1982c) ont évalué à 32 % des pluies brutes estivales l'interception de la pluie par les sapinières du bassin versant du lac Laflamme.

Plamondon et Prévost (1982a, 1982b) ont analysé la distribution spatiale de la neige sur le bassin versant. L'épaisseur, la densité et l'équivalent en eau du manteau nival ont été mesurés.

Il apparaît que l'altitude n'a pas d'influence sur la densité, l'équivalent en eau et l'épaisseur du manteau nival. Cependant, on remarque une variation dans ces paramètres selon l'âge des peuplements et l'exposition des versants. En effet, on note que l'accumulation de la neige est plus importante dans les jeunes peuplements. Aussi, l'épaisseur du manteau nival est supérieure dans les peuplements qui ont une exposition générale vers le nord. La densité moyenne tend à être supérieure dans les stations orientées au sud mais, à cause des faibles différences enregistrées, on peut la considérer homogène sur tout le bassin.

La fonte débute en avril et s'accroît avec le début du mois de mai. Puisqu'elle est plus rapide sur les versants exposés au sud, elle amène

l'élimination de la neige une à deux semaines plus tôt que sur les expositions nord.

En tenant compte de la densité de la neige, ces mêmes auteurs ont adapté un modèle de fonte de type degré-jour aux conditions du lac Laflamme. Le tableau 4 réunit les équations résultantes suivant les conditions rencontrées.

Tableau 4 : Équations degré-jour adaptées au bassin du lac Laflamme.

Exposition Type de neige	NORD	SUD
Neige jeune $\rho < 0,35 \text{ gr/cm}^3$	0,1953 Ta	0,2451 Ta
Neige vieille $\rho > 0,35 \text{ gr/cm}^3$	0,1305 Ta	0,1554 Ta

La précipitation totale sur le bassin, c'est-à-dire sous forme de pluie, de neige ou de grêle, a été enregistrée à la station 24 sur une base journalière depuis le début de l'année 1981. La figure 13 reproduit les variations mensuelles de précipitations pour les années 1981 et 1982.

L'évapotranspiration

L'évapotranspiration n'a pas été calculée d'une façon empirique sur le bassin versant. Cependant, pour en avoir une idée, on peut consulter avantageusement les données d'évaporation de bac classe A de la station princi-

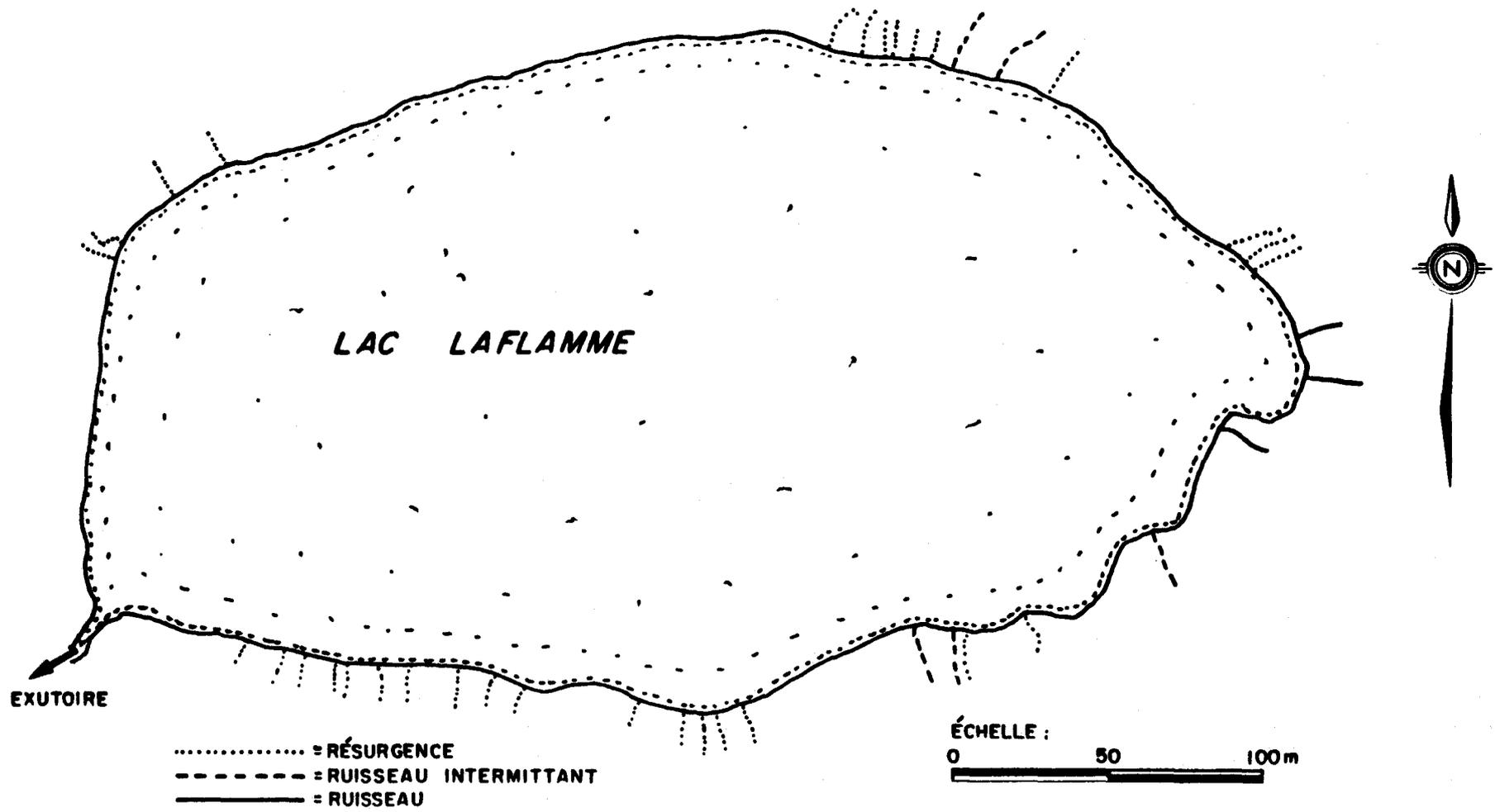


Figure 12: Ruisseaux et résurgences sur le pourtour du lac Laflamme

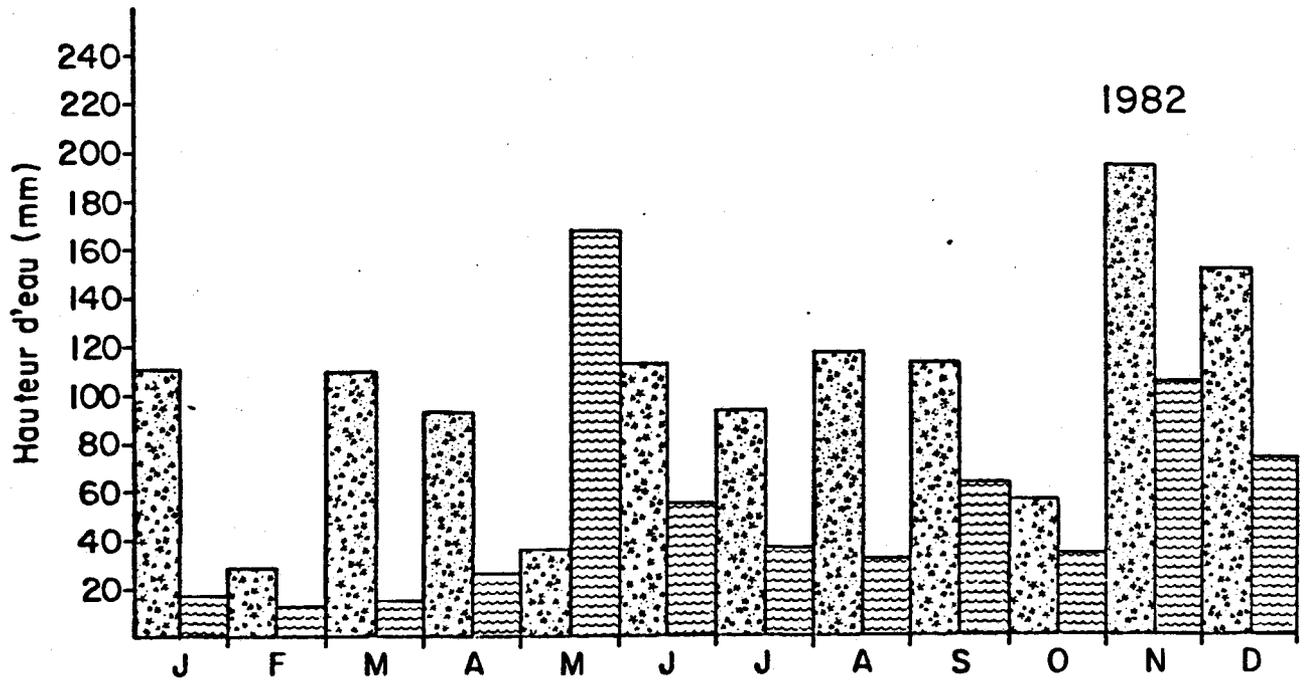
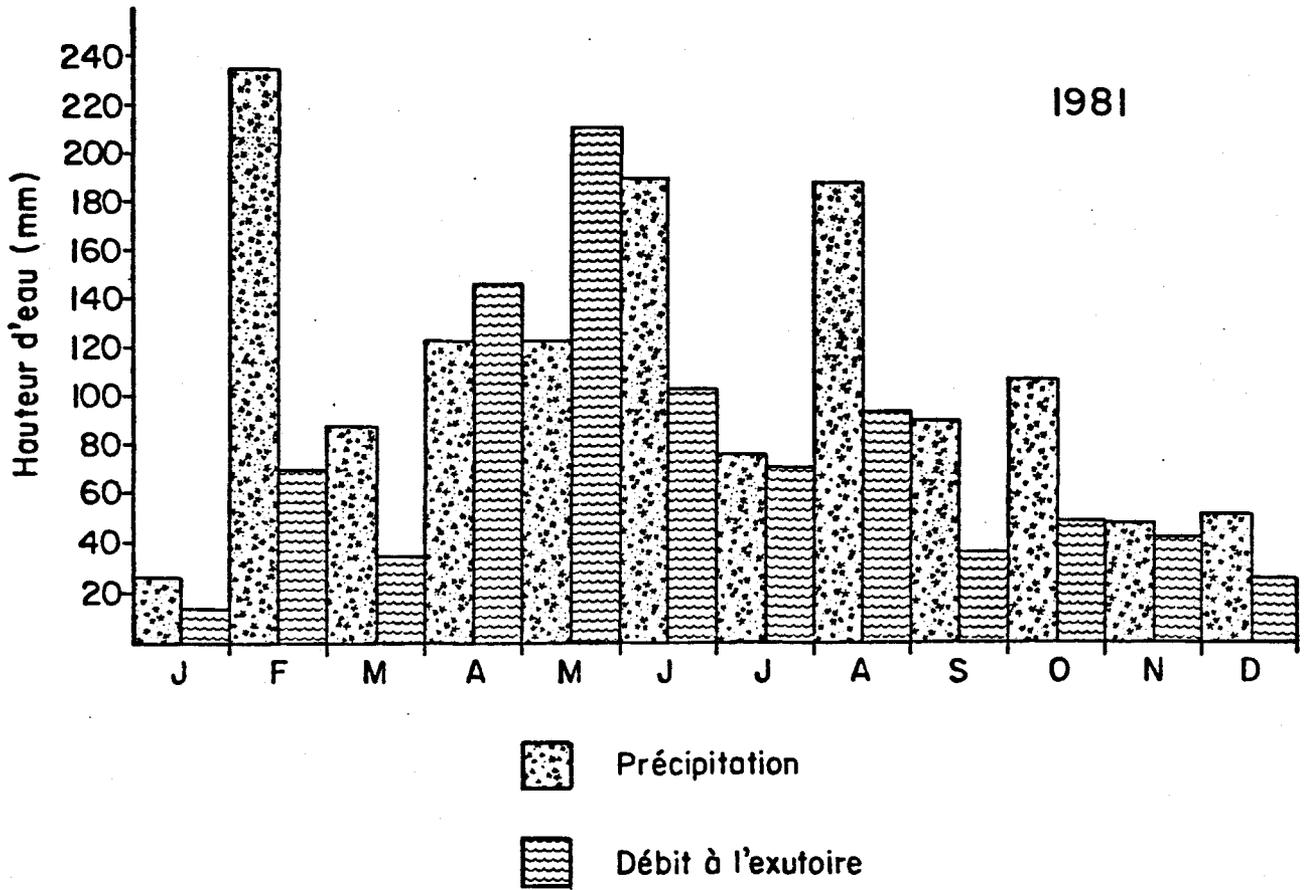


Figure 13: Graphiques des précipitations et des débits à l'exutoire du lac Laflamme (1981-1982)

pale. Les mesures sont disponibles au pas de temps journaliers, de la mi-mai à la fin septembre de chaque année.

Hydrologie

L'étude de la topographie, la nature du parterre forestier et l'observation sur le terrain nous montrent que le bassin offre peu de points de concentration pour le ruissellement de surface. Celui-ci est concentré à l'est du bassin où un ruisseau pérenne alimente le lac. L'importance de sa contribution à l'alimentation du lac se fait surtout sentir lors de la période de fonte et lors d'importants orages. Ce ruisseau n'est pas jaugé et on ignore l'étendue de son bassin de drainage.

On note aussi la présence de quelques ruisseaux intermittants et d'une trentaine de résurgences, celles-ci étant surtout concentrées sur la rive sud du lac. La figure 12 indique leurs emplacements.

Le seul exutoire de surface se trouve au sud-ouest du bassin. On y observe des débits de pointe de l'ordre de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ et les débits en période d'étiage représentent des valeurs aussi basses que $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette dernière période survient durant les mois d'hiver de janvier et février, tandis que les débits de crue sont enregistrés en avril, et plus particulièrement en mai, lors de la fonte des neiges.

Le canal de dérivation servant à l'évaluation des débits est de type "Parshall flume". Un limnigraphe à bulle recueille les fluctuations des

niveaux de l'eau. La station de jaugeage des débits (02PD018) est en fonction depuis novembre 1980. Sur la figure 13, on retrouve les débits mensuels pour les années 1981 et 1982.

De plus, en examinant la figure 14, on remarque que le drainage des sols passe d'imparfait à très mauvais sur le long de la rive sud du lac tandis qu'il demeure de bon à rapide sur le restant du bassin versant.

Le lac occupe la dépression à l'ouest du bassin versant. La figure 15 indique une bathymétrie régulière et peu profonde (profondeur maximale : 5,3 m). On note aussi que les berges tout autour du lac possèdent des pentes douces et très régulières jusqu'à la ligne bathymétrique de 1 m. Par la suite, seules les pentes des rives nord et sud suivent la même régularité.

La prise de la glace a lieu vers la mi-novembre et le lac cale vers la mi-mai. Les niveaux du lac sont enregistrés depuis décembre 1979 à l'aide d'un limnigraphe à bulle et vérifiés régulièrement avec une échelle limnimétrique positionnée en bordure du lac. Le niveau du lac fluctue, depuis le début de la prise des mesures, entre 370 et 655 mm, ce qui représente des accumulations d'eau variant entre 85 000 m³ et 225 000 m³ approximativement.

CLASSES DE DRAINAGE DES SOLS

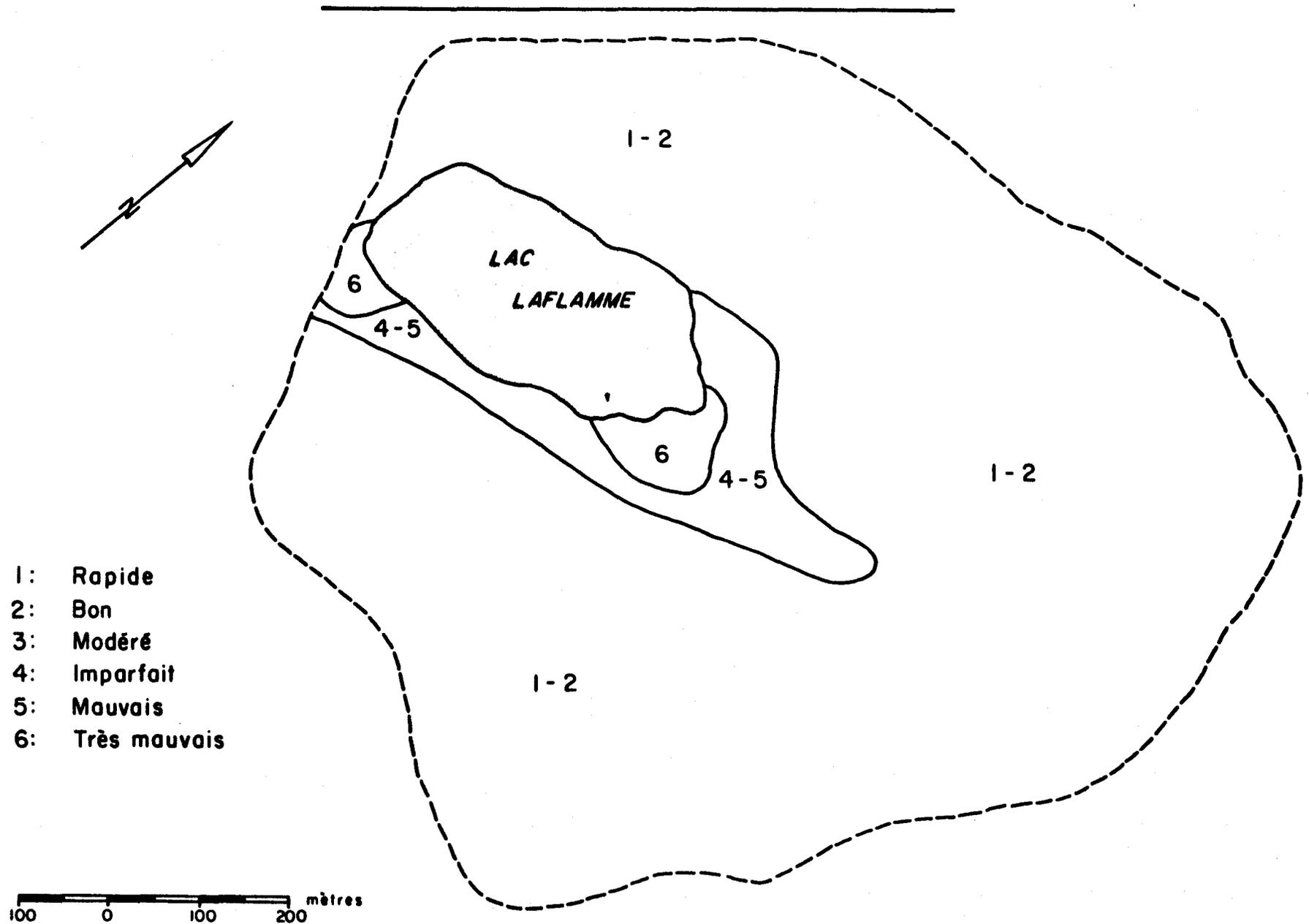
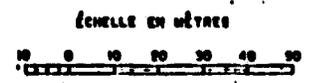


Figure 14: Classes de drainage des sols (d'après Jurdant et Bernier 1965)

CARTE BATHYMETRIQUE DU LAC LAFLAMME



Direction Générale Des Eaux Intérieures
Région Du Québec, Environnement Canada
Bibliothèque Plan-Niveau et Section
Les Jéras
Michel Frenette
Juillet, 1999
Source: Réseau Hydrologique



Parc des Laurentides
(47°19' - 71°07')

Figure 15: Bathymétrie du lac Laflamme

Hydrogéologie

Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique des dépôts meubles a été évaluée à l'aide de la formule empirique de Hazen (Azzaria et al., 1982). Cette approximation fut déterminée originalement pour des sables uniformément triés mais elle peut fournir des estimés utiles pour la plupart des sols formés de sable fin et de graviers (Freeze et Cherry, 1979). La moyenne géométrique donne comme valeur $4,6 \times 10^{-3}$ cm/s.

De plus, des mesures "in situ" de la perméabilité furent obtenues à l'aide d'essais de types charge variable et charge constante tels que décrits par Freeze et Cherry (1979). Ces essais furent réalisés dans des mini-piézomètres autour du lac par Bernier et Robitaille (1982). Les valeurs trouvées s'apparentent bien à celle calculée empiriquement.

Cependant, Bernier et al., (1983) indiquent que les conductivités hydrauliques mesurées dans les forages profonds demeurent les plus susceptibles de fournir des perméabilités représentatives de l'aquifère. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles présentées par Rochette (1971) sur le bassin du ruisseau des Eaux Volées ($\bar{K} = 2,9 \times 10^{-3}$ cm/s).

Zones de recharge et de décharge

En vue de mieux localiser les zones de décharge et de recharge par voie souterraine le long des rives du lac, Bernier et al. (1983) rapportent les résultats obtenus de l'analyse de relevés de température de l'eau souterraine. La figure 16 indique d'une façon approximative la limite de décharge souterraine. Cette limite correspond passablement aux conclusions préliminaires présentées par Bernier et Robitaille (1982) obtenues à l'aide de cellules d'infiltration et de mini-piézomètres.

Hypothèses sur l'écoulement

L'homogénéité, le type de roche en place ainsi que la répartition spatiale des dépôts meubles nous permet de croire que le bassin versant du lac Laflamme repose sur du matériel imperméable et qu'aucune fuite ne se produit en limite, sauf dans la région de l'exutoire du lac.

La topographie du bassin et la nature organique du parterre forestier n'offrent pas beaucoup de points de concentration pour les écoulements en rivières, si ce n'est à l'est du bassin, dans l'axe de la vallée, où des ruisseaux pérennes non jaugés et à configuration non définie ont été repérés.

Après une étude effectuée à l'aide de traçages expérimentaux sur le bassin du ruisseau Eaux Volées de la forêt Montmorency, Sklash et Farvolden (1979) indiquent que l'eau souterraine est une composante majeure et signi-

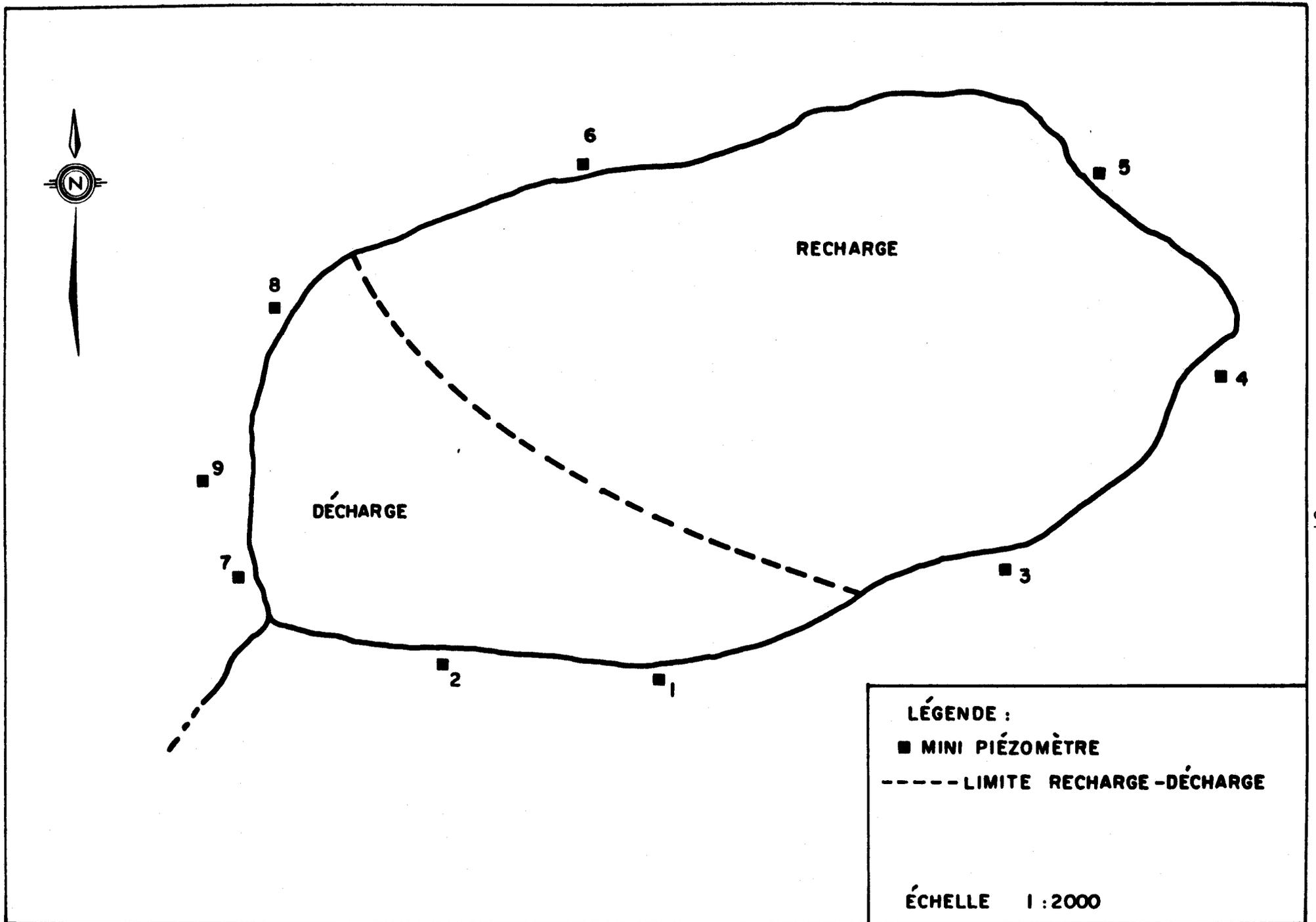


Figure 16: Limite approximative de la zone de recharge et de décharge par voie souterraine

ficative de l'hydrogramme durant les périodes de forts apports en eau où les écoulements en surface et en rivière sont dominés par l'eau souterraine. Azzaria et al. (1982) indiquent aussi que le cheminement de l'eau sur le bassin du lac Laflamme se fait en majeure partie sous la surface (souterrain). Ils signalent également, d'après leurs relevés, que la surface topographique donne une première ébauche de la piézométrie. De plus, la faible épaisseur des sédiments meubles, le caractère humide de la région, l'observation du terrain ainsi que l'étude des variations des niveaux piézométriques nous suggèrent que le niveau de la nappe phréatique se situe près de la surface tout au long de l'année. On peut donc envisager une circulation de l'eau sur les versants dont les composantes essentielles se regroupent en écoulement superficiel hypodermique et en écoulement souterrain avec des échanges dans les endroits où la nappe vient en contact avec la surface. Ces zones ont été identifiées par Bernier et al. (1983) lors de l'application d'un modèle à éléments finis et sont représentées sur la figure 17. On remarque qu'elles s'apparentent bien aux secteurs définis par les ruisseaux et résurgences de la figure 12 et aux conditions de drainage des sols (figure 14).

Outre la contribution du milieu souterrain à l'alimentation des ruisseaux du bassin, on assiste à des échanges réciproques entre le lac et le milieu souterrain mis en évidence par Bernier et Robitaille (1982) à l'aide de cellules d'infiltration. En première approximation, les échanges avec le lac se font surtout en bordure des berges suivant une bande de largeur maximale de 30 m. McBride et Pfannkuch (1975) indiquent, sur la base d'essais théoriques sur modèle mathématique, que les zones de recharge et de décharge

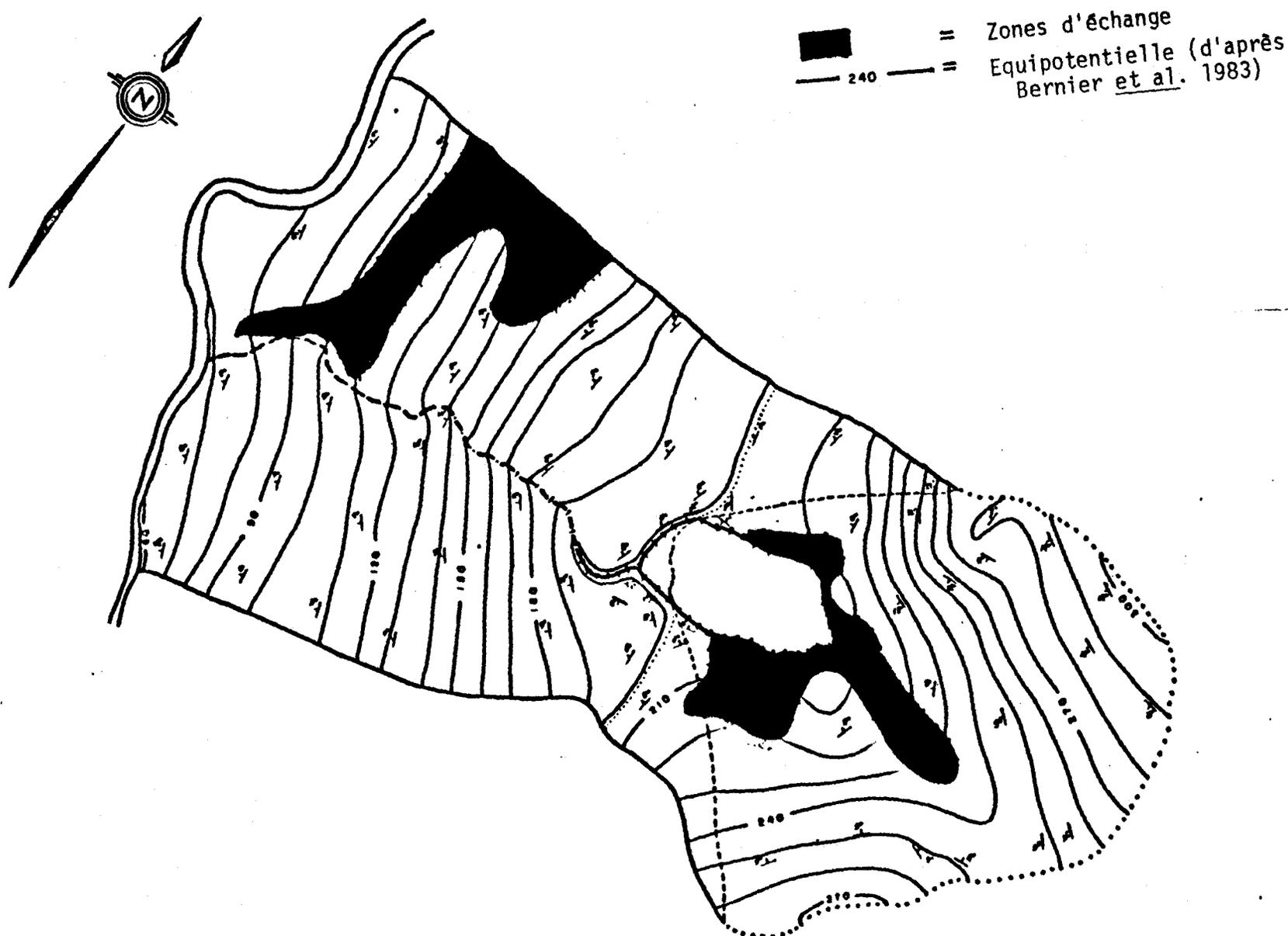


Figure 17: Zones de contact surface souterrain

d'un lac par voie souterraine se concentrent le long des berges pour les lacs ayant une largeur beaucoup plus grande que l'épaisseur des sédiments sur lesquelles ils reposent.

On envisage, sur le fond lacustre, une perte d'eau par voie souterraine dans la région de l'exutoire et une zone de recharge telle qu'indiquée à la figure 16. On suppose qu'au centre du lac les échanges demeurent nuls puisque la configuration de la bathymétrie du lac ne permet pas l'interception des lignes de courant souterraines.

MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS

Les données disponibles

Mesures hydrométriques

La station de jaugeage (02PD018) de l'exutoire du bassin évalue les débits à l'aide d'un canal de dérivation de type "Parshall Flume". Les débits sont mesurés de façon continue et seules les valeurs moyennes journalières seront retenues.

Mesures piézométriques

Le réseau de prises de mesures comprend 9 piézomètres dont la représentation spatiale est indiquée à la figure 16.

Données météorologiques

Ces données proviennent de la station principale de la forêt Montmorency située à moins de deux (2) kilomètres du lieu d'étude. Pour les valeurs d'évapotranspiration, on retient les valeurs moyennes décennales de 1981-82 de l'évaporation mesurée à l'aide d'un bac de type A.

Pour l'évaluation de la fonte de la neige, des équations de fonte de type degré-jour adaptées aux bassins par Plamondon et Prévost (1982b) furent utilisées. Ces valeurs de fonte sont ensuite ajoutées aux valeurs des précipitations liquides.

Sur la figure 18 on peut identifier les périodes de prises de mesures pour chaque type d'observation. On dispose de valeurs journalières pour chacune des observations sauf dans le cas des lectures piézométriques où la prise des mesures s'est effectuée hebdomadairement (quelques valeurs manquantes).

Paramètres hydrodynamiques

Parmi les paramètres hydrodynamiques requis, seule une valeur de la perméabilité, évaluée de façon empirique, est disponible. La détermination de la valeur des autres paramètres hydrodynamiques sera donc approchée par calage du modèle souterrain.

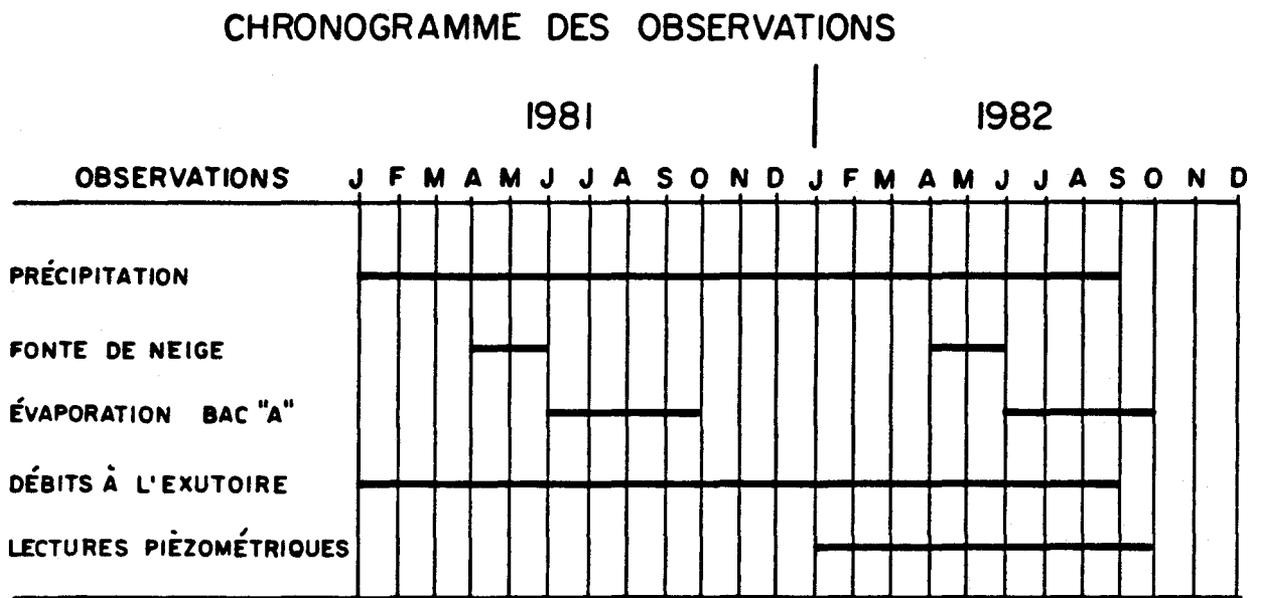


Figure 18: Chronogramme des observations utilisé pour le calage

MODÉLISATION DU BASSIN VERSANT

Le modèle considère une couche de surface et une couche souterraine d'extension identique, débordant les limites du bassin dans la région de l'exutoire. Cette façon de représenter le système facilite la quantification des volumes d'eau s'écoulant hors du bassin par voie souterraine tout en allouant la possibilité de simuler les débits de surface à la station d'observation.

La discrétisation spatiale adoptée est la même pour l'ensemble des domaines de surface et souterrain. Le maillage comprend 3 niveaux de découpage en mailles carrées de 100 m, 50 m et 25 m de côté respectivement, pour un total de 309 mailles sur chacune des couches. On remarque sur la figure 19 une discrétisation plus fine dans les zones où on suppose des échanges actifs entre la surface et le milieu souterrain.

La couche de surface

On retient 172 mailles (type rivière) sur lesquelles les échanges avec le milieu souterrain sont susceptibles de se produire. La figure 19 montre le maillage réalisé ainsi que la direction de drainage de chacune des mailles. L'exutoire du bassin modélisé se situe à la maille 6. Cependant, l'exutoire du bassin d'observation est représenté par la maille 56.

MAILLAGE DE SURFACE
LAG LAFLAMME
(QUEBEC)
INRS - EAU - ECOLE DES MINES - ORESTON.

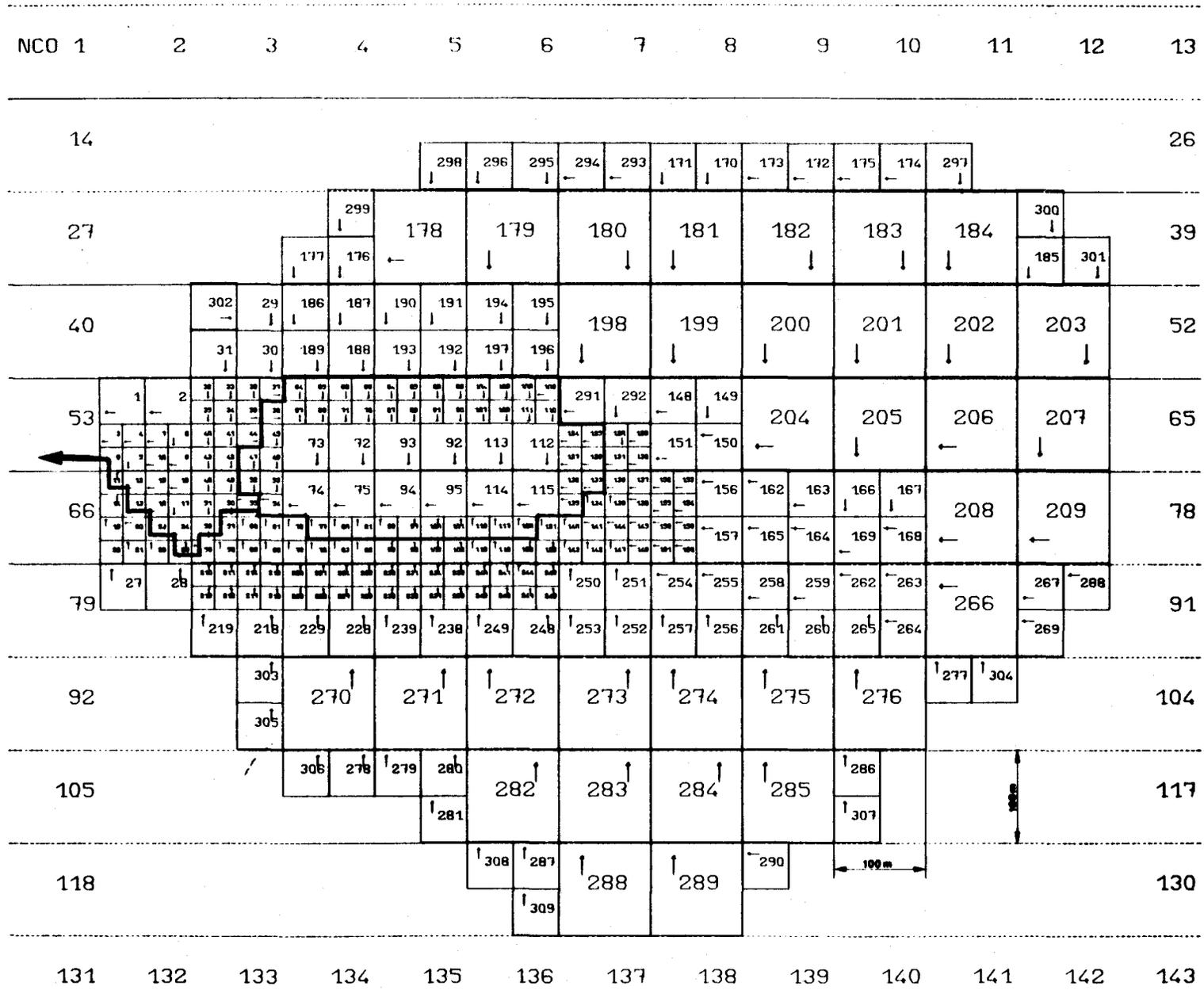


Figure 19: Maillage de la couche de surface

Les zones météorologiques

Deux zones dites "météo", établies non pas à partir de la discrétisation spatiale de la pluie considérée homogène sur tout le bassin, mais plutôt à partir de l'orientation est-ouest du bassin qui influence l'accumulation et la fonte de la neige, ont été envisagées. On distingue donc une zone sud et une zone nord, cette dernière couvrant une surface un peu plus grande que la zone du versant sud (0,37 km² et 0,33 km² respectivement).

Les fonctions production

Quant aux fonctions production, on en retient deux types, selon qu'il s'agisse d'une surface occupée par un sol ou par un plan d'eau. Les surfaces occupées par un sol concernent essentiellement les surfaces forestières et marécageuses. On utilisera une fonction production s'adaptant à chacune de ces zones, réalisée à partir d'une fonction production standard type "sol" du modèle couplé. On rattachera au lac la fonction production type "plan d'eau" à partir de laquelle seulement l'évaporation sera prélevée.

La couche souterraine

Le lac, le ruisseau à l'exutoire ainsi que l'ensemble des mailles rivières seront traités à l'aide de conditions de drainage sur lesquelles les échanges avec le milieu souterrain seront pris en compte le cas échéant.

La limite à l'exutoire sera représentée par un potentiel imposé de valeur nulle auquel se rattachera l'ensemble de la piézométrie calculée. L'eau s'écoulant par voie souterraine sera récupérée à travers des mailles de type drain.

Quant aux autres limites en bordure du bassin, elles seront considérées comme des limites à flux nuls.

Le calage du modèle

En premier lieu, le modèle fut monté complètement, c'est-à-dire que les programmes GEOCOU, MODSUR, MODCOU et COMPAR furent préparés et combinés séquentiellement les uns aux autres afin d'obtenir une appréciation d'ensemble lors du calage des programmes MODSUR et MODCOU.

Le calage s'est effectué en deux phases reliées entre elles. Après avoir calculé une piézométrie initiale moyenne à l'aide d'un passage en régime permanent, un premier calage des paramètres des fonctions production de MODSUR a porté sur l'ensemble de la période 1981-1982. Il s'agissait de choisir le meilleur jeu de paramètres permettant d'obtenir des valeurs calculées de ruissellement et d'infiltration qu'approchaient le mieux possible les débits observés sur la maille 56. Ce calage a porté sur les paramètres CRT, DCRT et FN, lesquels définissent le bilan de chacune des deux fonctions production reproduisant les surfaces boisées et les marécages. On doit remarquer cependant que la fonction production forêt occupe 86 % de la

surface du bassin. Le calage a donc porté essentiellement sur cette fonction, l'autre étant ajustée d'après ce que l'on peut en attendre à priori.

Il faut remarquer que les valeurs d'infiltration calculées à ce moment là ne sont pas indépendantes du calage du modèle souterrain, c'est-à-dire le programme MODCOU. On a donc réalisé une première approche en ajustant les paramètres des fonctions production et on a calé définitivement ces paramètres après avoir réajusté ceux du modèle souterrain.

Le calage définitif du modèle souterrain a été réalisé sur les mois de 1982, seule période où nous possédons des observations piézométriques. Ce calage a été fait en régime transitoire influencé, c'est-à-dire en période d'alimentation. Le calage comprenait un ajustement des paramètres de transfert des fonctions production de modsur pour bien moduler les événements de crue.

Résultats et discussion

Le tableau 5 regroupe les valeurs des paramètres des fonctions production contenus dans le programme modsur. On remarque que les valeurs de CRT et DCRT, représentant la valeur moyenne et la valeur minimale du stock en eau dans le sol, sont plutôt faibles, traduisant ainsi un état de saturation du sol élevé tout au long de l'année. Le coefficient de tarissement du réservoir de ruissellement (CQR) nous montre une vidange plutôt lente reflétant les conditions d'écoulement superficielles hypodermiques.

TABLEAU 5

VALEURS DES PARAMÈTRES DES FONCTIONS PRODUCTION

PARAMÈTRES		VALEURS CALÉES	
		FORÊT	MARAIS
DCRT	Valeur minimale du stock en eau dans le sol en deçà de laquelle aucune quantité d'eau n'est disponible (mm)	2,5	5,0
CRT	Valeur moyenne du stock en eau dans le sol (mm)	10	25,0
FN	Valeur maximale de l'infiltration sur un pas de temps (mm)	4,0	1,0
CQR	Coefficient de tarissement du réservoir de ruissellement	0,20	0,15
QRMAX	Niveau de débordement du réservoir de ruissellement (mm)	30,0	30,0
CQI	Coefficient de tarissement du réservoir d'alimentation de la nappe	0,06	0,03
QIMAX	Niveau de débordement du réservoir d'alimentation de la nappe (mm)	30,0	60,0

Dans cette première approche, la simulation a été effectuée avec un pas de temps de cinq (5) jours permettant un calage global. La figure 20 montre les hydrogrammes observés et calculés sur la période entière de simulation.

La synchronisation des pointes de crues est très bonne, quoique la restitution des quantités d'eau durant la période d'hiver et de printemps 1981 est trop grande. Ceci est dû en partie aux fortes pluies qu'a connu cette région au mois de février, rendant difficile la détermination de la quantité d'eau disponible pour le ruissellement (interaction neige-pluie) et en partie par la quantité de neige fondue probablement surestimée.

Le débit total calculé ($966\ 000\ \text{m}^3$) se compare avantageusement avec le débit observé ($905\ 000\ \text{m}^3$) représentant un surplus d'écart de 7 % ce qui est excellent compte tenu de la qualité et du faible historique de données à notre disposition pour caler le modèle. De plus, si l'on consulte la figure 21, on remarque que les valeurs d'estimation à priori obtenues à l'aide des données observées pour la période 1981 corrélaient bien avec les résultats de la simulation. On constate aussi que la majorité de l'eau infiltrée se retrouve en rivière (62 %) tandis que le reste est évacué par voie souterraine. On note aussi que la majorité de l'écoulement à l'exutoire provient du ruissellement, l'eau issue du milieu souterrain ne représentant que 21 % du total écoulé.

La restitution des niveaux piézométriques est bonne (figure 22). Les simulations confirment que le niveau de la nappe s'élève passablement lors de la période de fonte des neiges pour rester accroché près de la surface

LAC LAFLAMME, DEBIT A LA STATION

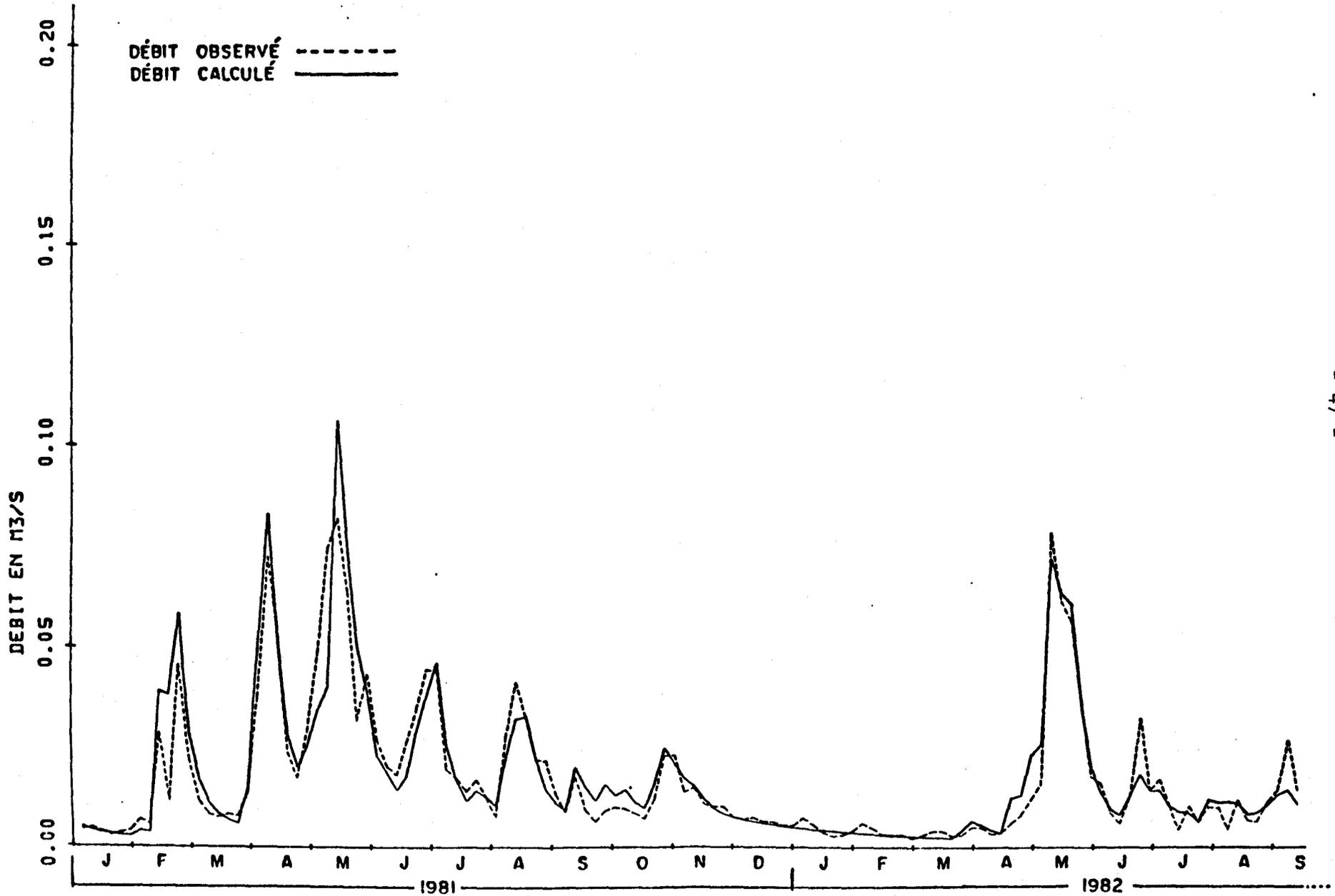
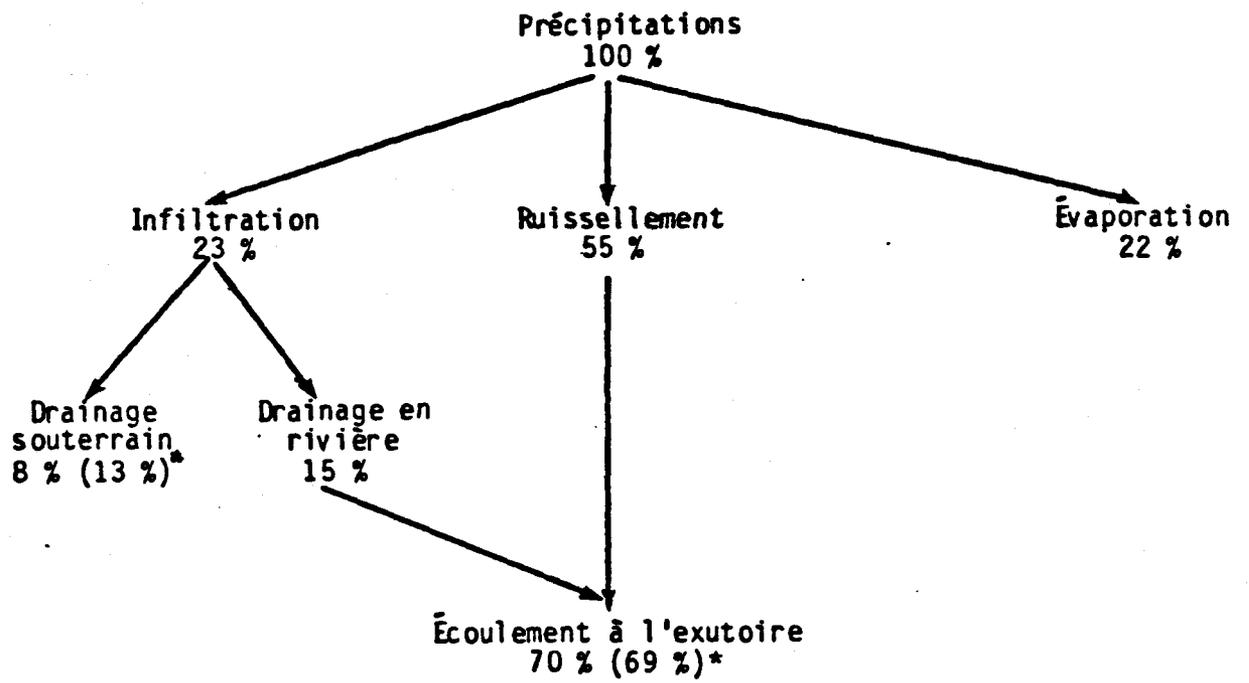


Figure 20: Graphique des débits observés et des débits calculés à la station de la maille 56



* Valeurs calculées à priori

Figure 21: Proportions des précipitations affectuées aux composantes de l'écoulement

durant le reste de l'année. On note aussi que le modèle théorique réagit trop rapidement pour l'ensemble des piézomètres. Il faut cependant prendre note que les graphiques sont tracés par comparaison relative entre les niveaux observés et calculés, les valeurs respectives étant ramenées à zéro au départ. Donc, même si on note une bonne correspondance entre les allures générales des deux types de courbes, les potentiels calculés sont en réalité plus élevés que les valeurs observées. L'information disponible actuellement ne nous permet pas de les relier en valeur absolue et d'effectuer un meilleur calage des paramètres souterrains.

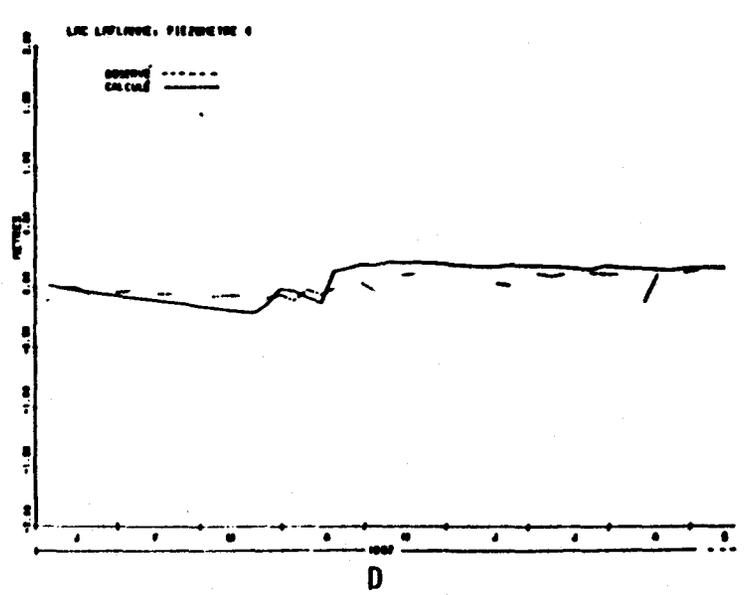
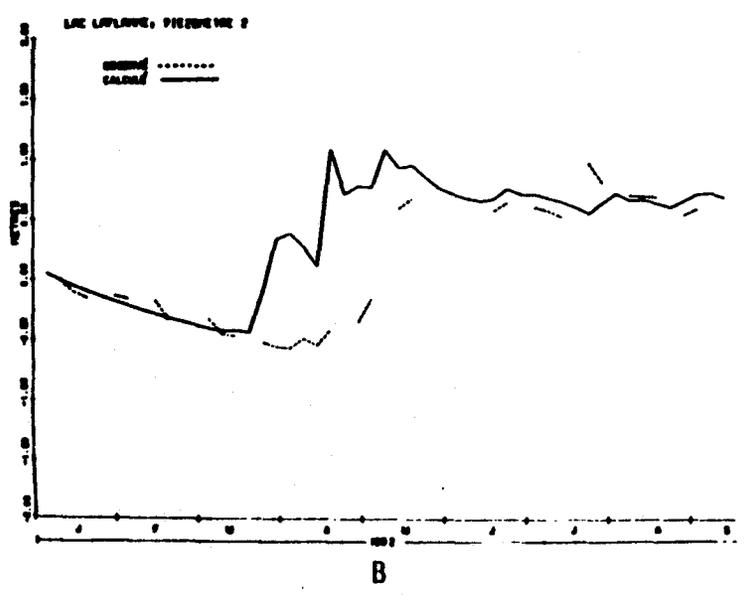
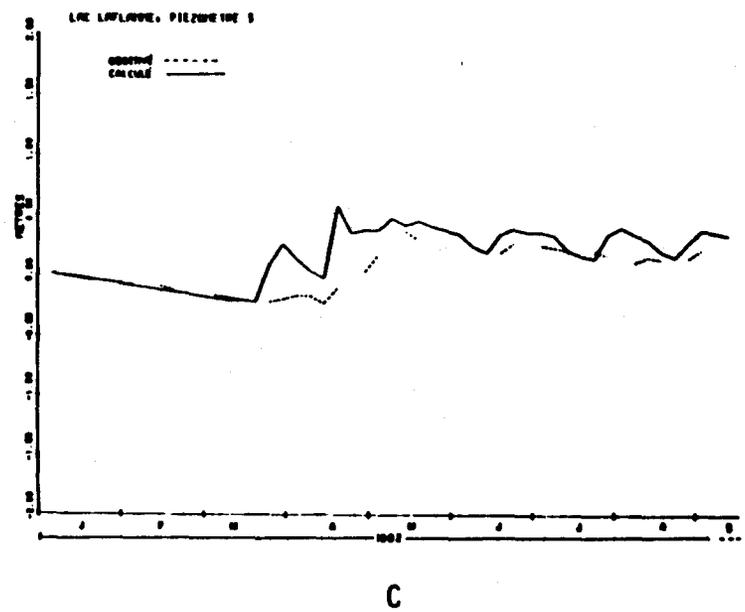
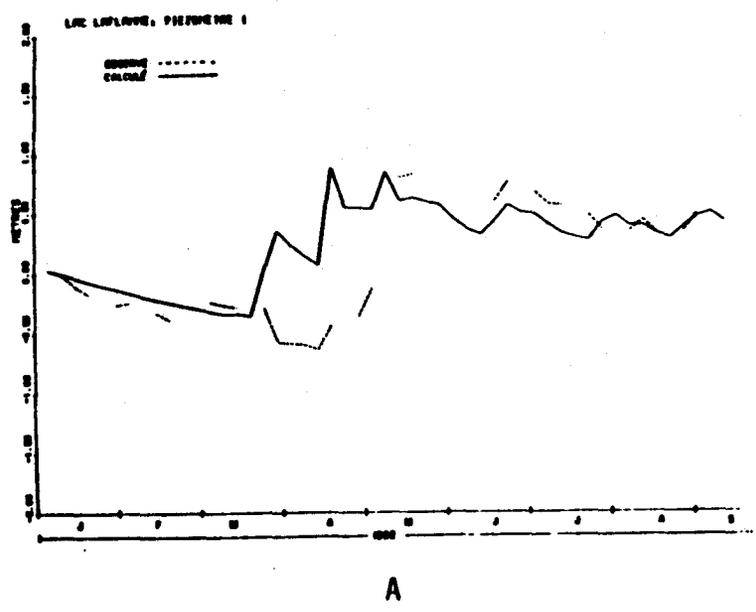
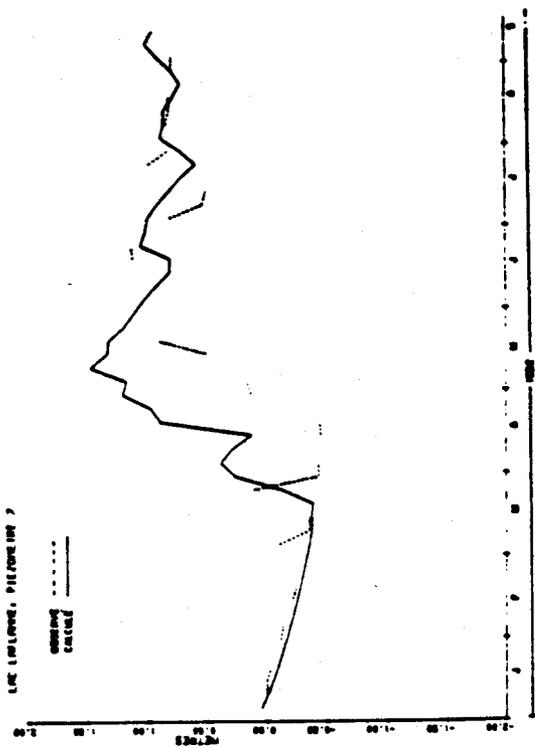
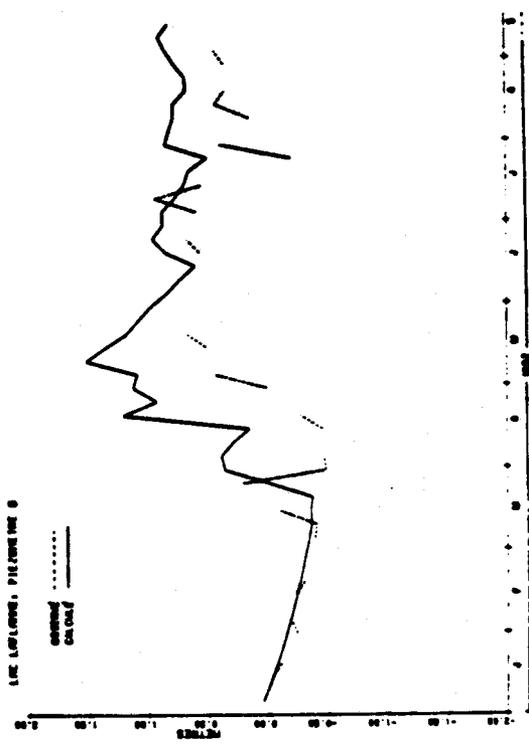


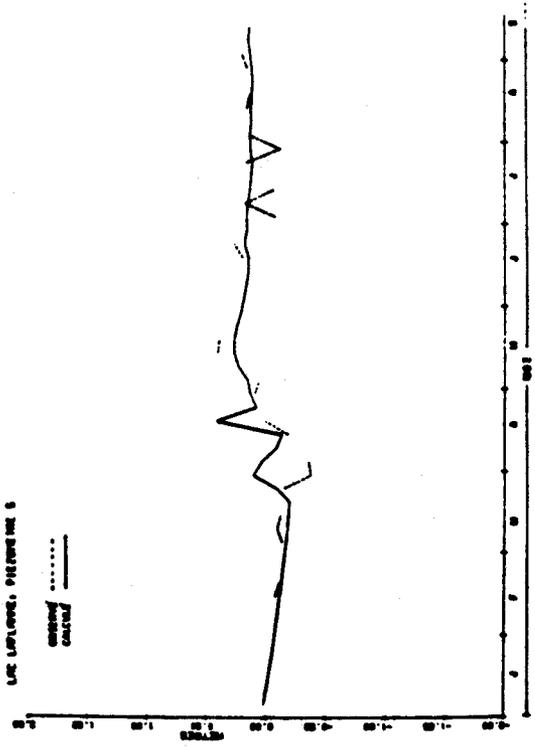
Figure 22 : Comparaison des piézométries observées et calculées



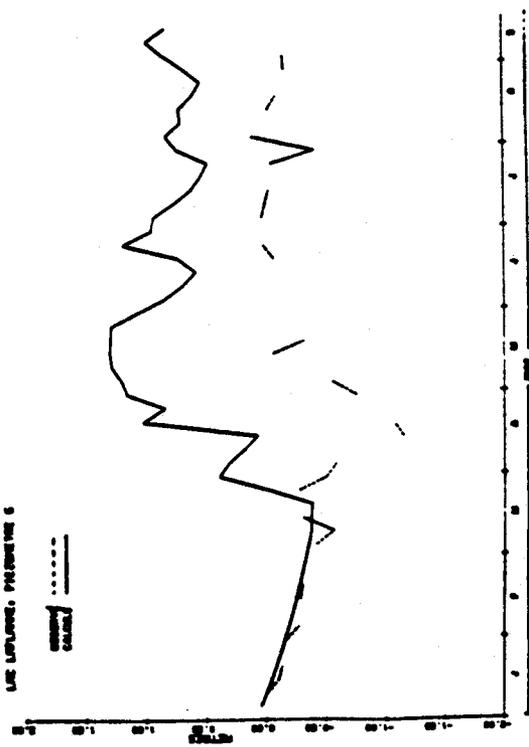
G



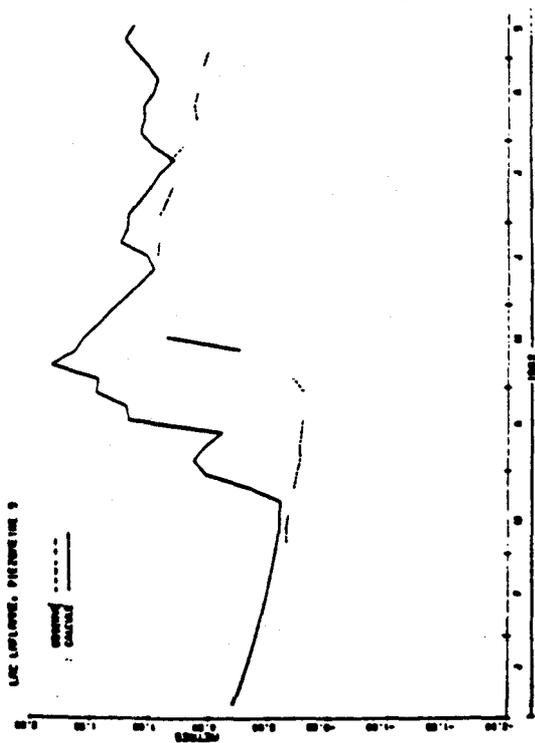
H



E



F



I

CONCLUSION

Le modèle couplé, développé lors d'une coopération franco-québécoise entre l'École nationale supérieure des mines de Paris, l'ORSTOM et l'INRS-Eau de Québec, a été appliqué avec succès aux conditions éco-climatiques du bassin versant du lac Laflamme au Québec. Les débits calculés pour la période de simulation présentent un surplus d'écart de 7 %, ce qui est très satisfaisant, compte tenu du manque d'information et de la brièveté des historiques de données à notre disposition.

Le modèle a permis d'établir un bilan hydrique dont la composante du ruissellement compte pour 55 % des précipitations totales. La majorité de l'eau infiltrée se retrouve en rivière, s'ajoutant à la composante ruissellement, pour donner un écoulement à l'exutoire représentant 70 % des précipitations tombées, tandis que le drainage par voie souterraine compte pour 8 %.

Il y aurait lieu d'améliorer les résultats en ayant une meilleure connaissance et une meilleure évolution de la fonte des neiges au printemps. Une meilleure étude de l'évapotranspiration au cours de la saison ne ferait qu'apporter davantage de précision au calcul réalisé par les fonctions production du programme MODSUR. De plus, des valeurs piézométriques rattachées à une borne géodésique et au niveau du lac permettraient d'effectuer un meilleur calage des paramètres hydrodynamiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AZZARIA, L.M., GÉLINAS, P.J., ROBITAILLE, R. et J.F. WILHEMY (1982).
Étude géologique et hydrogéologique du lac Laflamme, Parc des Laurentides,
Québec. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures.
- BERNIER, P., et R. ROBITAILLE (1982).
Étude hydrogéologique du bassin versant du lac Laflamme. Rapport prélimi-
naire, Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région
de Québec, 174 p.
- BERNIER, P., PADILLA, F., DESSUREAULT, M., GÉLINAS, P. et L.M. AZZARIA
(1983).
Étude hydrogéologique et hydrochimique du bassin versant du lac Laflamme,
campagne de 1982. Environnement Canada, Direction générale des eaux inté-
rieures, région du Québec, 269 p.
- BOULIANE, P., LAFOND, P. et S. ROUSSEAU. (1976).
Plan d'aménagement de la forêt Montmorency de l'Université Laval. Révision
1976, faculté de Foresterie et de géodésie de l'Université Laval.
- FREEZE, R.A. et J.A. CHERRY (1979).
Groundwater. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 604 p.
- JURDANT, M. ET A. BERNIER (1965).
Carte écologique, forêt Montmorency. Université Laval.
- MCBRIDE, M.S. ET H.O. PFANNKUCH (1975).
The distribution of seepage within lakebeds. Journal Research U.S. Geolog-
ical Survey, 3(5): 502-512.
- PLAMONDON, A.P. (1982).
La précipitation moyenne sur le bassin du lac Laflamme, forêt Montmorency,
Québec. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures,
région du Québec, 28 p.
- PLAMONDON, A.P. et M. PRÉVOST (1982a).
Distribution spatiale de la neige et de la fonte, lac Laflamme 1981 - forêt
Montmorency. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures,
région du Québec, 36 p.
- PLAMONDON, A.P. et M. PRÉVOST (1982b).
Distribution spatiale de la neige et de la fonte, 1981-1982, lac Laflamme,
forêt Montmorency, Québec. Direction générale des eaux intérieures, région
du Québec, Environnement Canada, 70 p.
- PLAMONDON, A.P. et M. PRÉVOST (1982c).
Distribution en sous-bois et interception de la pluie sur le bassin du lac
Laflamme, forêt Montmorency, Québec. Environnement Canada, Direction géné-
rale des eaux intérieures, région du Québec, 60 p.

ROBITAILLE, R. et J.F. WILHEMY (1981).

Etude sismique du bassin versant du lac Laflamme, forêt Montmorency, Québec.
Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec, 18 p.

ROCHETTE, F. (1971).

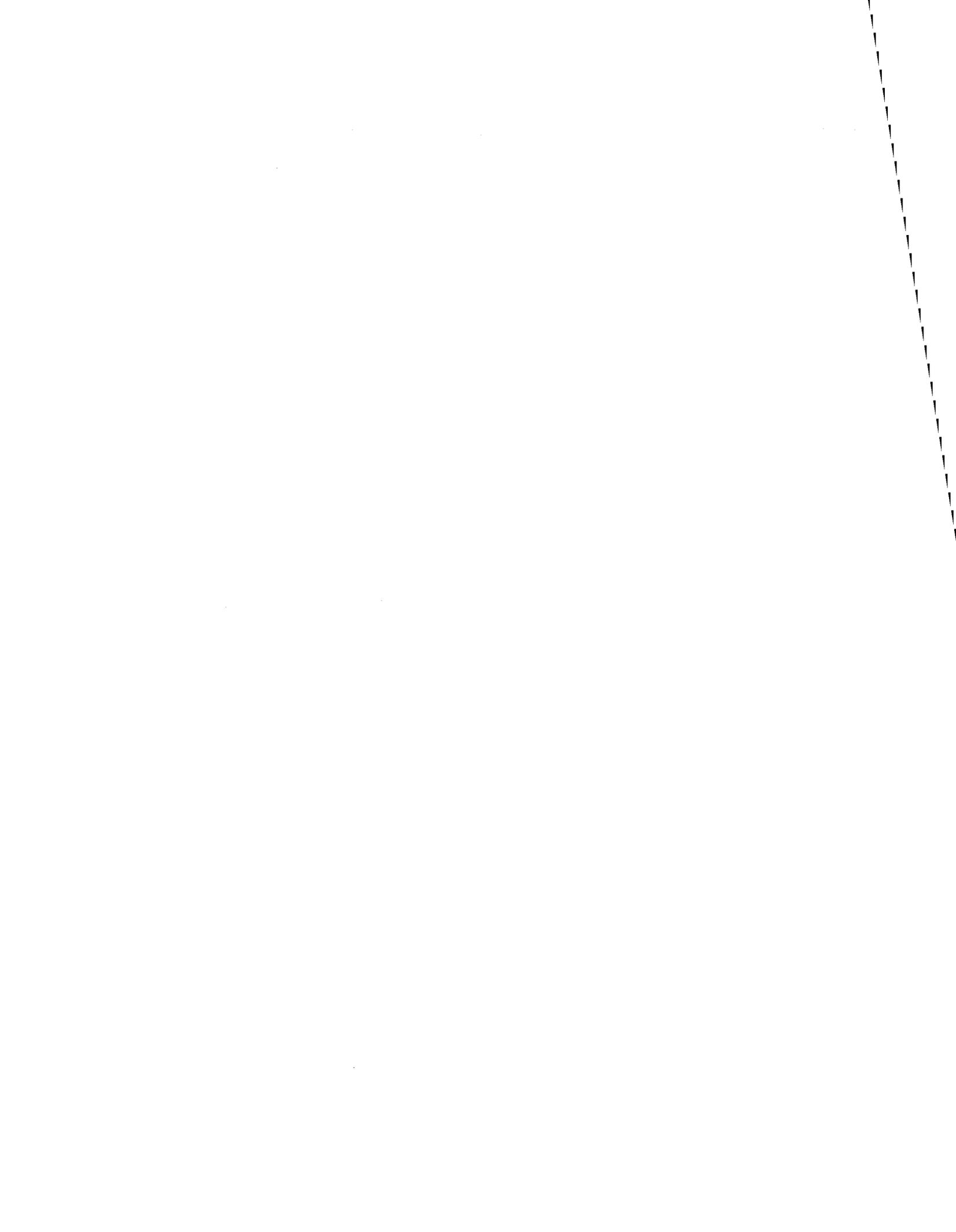
Hydrogeological study of "Ruisseau des Eaux-Volées" experimental basin.
MSC. Thesis, Univ. Western Ontario, London, Ont.

SKLASH, M.G. et R.N. FARNOLDEN (1979).

The role of groundwater in storm runoff. J. of Hydrology, 43: 45-65.

VILLENEUVE, J.P., GIRARD, G et E. LEDOUX (1982).

Modélisation et simulation intégrées: eau de surface - eau souterraine.
Eau du Québec, 15(1): 67-75.



ANNEXE A

BRÈVE DESCRIPTION DU MODÈLE COUPLÉ
EAU DE SURFACE - EAU SOUTERRAINE

1. REPRÉSENTATION DU CYCLE DE L'EAU

Le modèle couplé (Villeneuve et al., 1982) représente le cycle de l'eau à l'aide de cinq fonctions, chacune traitant une ou des composantes du cycle hydrologique.

1.1. La fonction entrée

Cette fonction prend en compte tous les apports en eau du système. Elle considère donc les précipitations, la fonte de la neige ainsi que les apports latéraux qui peuvent survenir en limite du domaine de surface ou du domaine souterrain.

1.2. La fonction production

Au sein de cette fonction, se retrouvent les mécanismes qui assurent la répartition de l'eau disponible (défini par la fonction d'entrée) en infiltration, évapotranspiration, ruissellement et stockage dans le sol. Cette fonction repose sur les mécanismes physiques régissant le mouvement de l'eau à la surface du sol et dans sa tranche superficielle.

1.3. La fonction de transfert de surface

Cette partie de la représentation du cycle hydrologique concerne essentiellement le cheminement de l'eau disponible à travers le domaine de surfa-

ce. Elle considère l'eau issue de la fonction production, c'est-à-dire l'eau de ruissellement et l'eau échangée dans l'un ou l'autre sens avec le domaine souterrain.

1.4. La fonction de transfert souterrain

Cette fonction se préoccupe des mouvements de l'eau dans les aquifères. Elle tient compte de l'eau d'infiltration issue de la fonction production et de l'eau issue des échanges avec le domaine de surface.

1.5. La fonction d'échange surface-souterrain

Ici, le calcul des échanges entre le domaine de surface et le domaine souterrain s'établit sur un nombre limité de points sur le réseau hydrographique principal. Ce calcul est mené simultanément avec ceux des fonctions de transfert de surface et souterrain.

2. PRINCIPE DU MODÈLE

Le cycle de l'eau est constitué de nombreux mécanismes complexes ayant des interactions les uns sur les autres. La caractéristique fondamentale du modèle est de décomposer la schématisation du système hydrologique en étapes indépendantes et dont les résultats soient contrôlables séparément.

Le principe de la modélisation consiste en une généralisation de la schématisation multicouche. Le modèle distingue, d'une part, une couche

supérieure, dite de surface où s'effectue le partage de l'eau disponible en eau de surface et en infiltration, ainsi que le transfert superficiel et, d'autre part, un nombre variable de couches profondes, sièges d'écoulements souterrains, éventuellement interconnectées entre elles, figurant la succession verticale des niveaux aquifères telle qu'on peut la rencontrer en hydrogéologie.

Chacune de ces couches est ensuite discrétisée en mailles auxquelles sont attribués les différents paramètres du système et sur lesquelles s'effectueront les transferts d'eau.

L'ensemble est articulé, dans l'état actuel, en quatre programmes écrits en langage FORTRAN, destinés à opérer séquentiellement.

- Le programme GEOCOU organise en fonction des données physiographiques la discrétisation spatiale du milieu souterrain, ainsi que l'arbre de drainage des bassins en surface.
- Le programme MODSUR évalue pour chaque maille de surface la répartition entre l'eau disponible pour le ruissellement et pour l'infiltration à partir des données météorologiques en fonction des paramètres attribués au sol.
- Le programme NONSAT assure le transfert de l'infiltration nette calculée dans MODSUR en alimentation à la nappe suivant un processus uniforme par

groupement de mailles constituant des zones homogènes pour les caractéristiques du milieu non saturé.

- Le programme MODCOU simule finalement les transferts de l'eau à la fois dans la couche de surface et dans les couches souterraines en tenant compte d'interactions à double sens entre les nappes et les rivières.

Pour chacun de ces programmes, on donne maintenant une description sommaire des mécanismes qui y sont représentés ainsi que des moyens de contrôle de la simulation.

2. LE PROGRAMME GEOCOU

Ce programme se charge de la définition des caractéristiques géométriques et physiographiques du domaine modélisé.

2.1 Définition du maillage

Chaque couche définie par le modèle est découpée en mailles carrées emboîtées de dimensions variables. La discrétisation initiale est constituée par un réseau de mailles du côté 8a, disposées de façon à épouser aux mieux les contours respectifs des couches.

Localement ce maillage peut-être subdivisé en sous-maillages de côté 4a, 2a ou a. La discrétisation de certains secteurs des aquifères et

du domaine de surface peut ainsi être raffinée selon les besoins (figure A1).

2.1.2 DÉFINITION DU RÉSEAU DE DRAINAGE DE SURFACE

Le réseau de drainage de surface revêt la forme d'une ou de plusieurs arborescences qui sont définies sans ambiguïté par la connaissance pour chaque maille du domaine de surface d'une direction unique de vidange (figure A2).

Ce réseau de drainage est ensuite classé en deux catégories selon qu'il s'agit d'une maille appartenant au réseau hydrographique principal ou bien à la zone de ruissellement.

Les mailles constituant le réseau hydrographique principal sur lesquelles les échanges avec le domaine souterrain seront simulés sont appelées "mailles rivières". À chaque exutoire de ce réseau, se trouve correspondre un bassin du domaine de surface représenté par un arbre d'écoulement unique, et sur lequel sera effectué ultérieurement le transfert de l'eau de surface (figure A3).

Les mailles du domaine de surface non sélectionnées comme "mailles rivières" se classent en deux catégories.

- Celles qui appartiennent à une portion de l'arborescence générale dont l'exutoire ne fait pas partie du réseau hydrographique principal. Elles

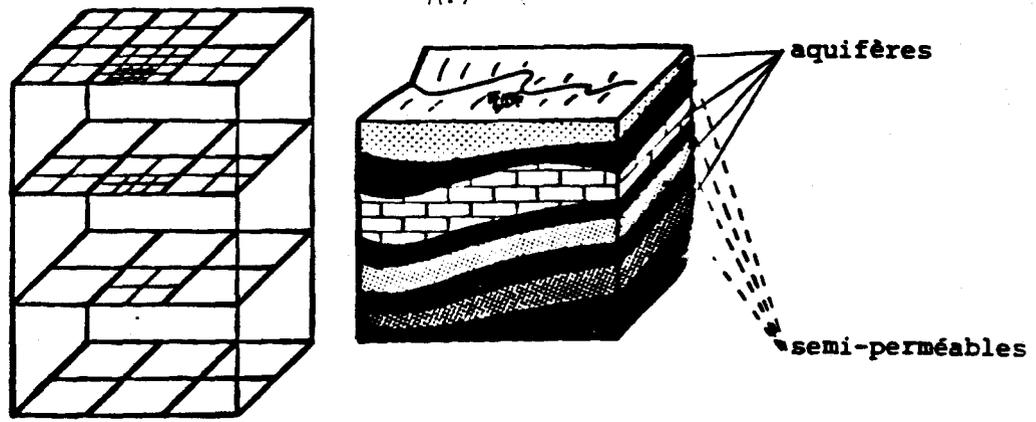


Figure A.1: Principe de la schématisation multicouche

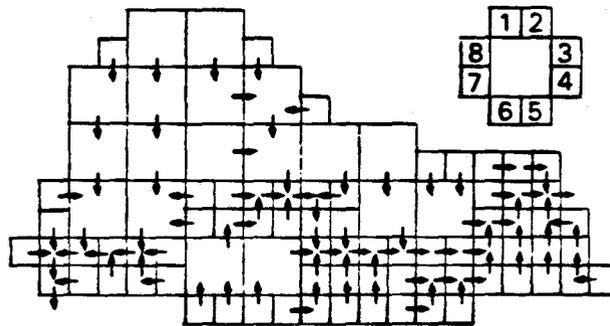


Figure A.2: Réseau de drainage de surface

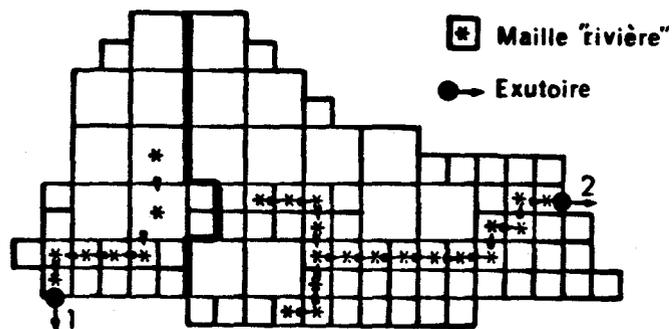


Figure A.3: Définition des mailles-rivières et des bassins

forment alors un bassin individualisé du domaine de surface pour lequel ni les échanges à double sens avec le domaine souterrain, ni le transfert de surface, ne pourront être simulés par le modèle. Le rôle d'un tel bassin permettra uniquement le calcul et l'introduction vers les aquifères de l'infiltration calculée par la fonction production.

- Celles qui font partie d'une portion de l'arbre général dont l'exutoire est une maille rivière. Elles constituent alors un "sous-bassin de calcul" du bassin auquel elles appartiennent, sur lequel le calcul de l'infiltration et du débit transféré à l'exutoire indépendamment des écoulements souterrains.

2.1.3. DÉFINITION DES DONNÉES PHYSIOGRAPHIQUES

Ces données concernent ici uniquement les mailles de la couche de surface. Elles comprennent, dans l'état actuel, pour chaque maille :

- des données altimétriques qui seront utilisées, d'une part, pour le calcul du temps de transfert de l'eau de surface sur les mailles, d'autre part, pour évaluer l'épaisseur de la zone non saturée et, enfin, éventuellement pour une modulation des précipitations;
- des données exprimées en pourcentage de la superficie de chaque maille définissant des zones homogènes sur lesquelles seront calculés les bilans hydriques dans le programme MODSUR. Ces zones seront choisies en fonction de critères adaptés aux problèmes qui pourront provenir, par exemple, des

caractéristiques des sols ou de la couverture végétale. Les surfaces de plan d'eau libre serviront au calcul des coefficients de vidange entre "mailles rivières" intervenant dans les transferts.

L'ensemble de ces données est soumis à des contrôles de compatibilité avant traitement, puis récapitulé sous forme de tableaux et de plans. Les résultats sont finalement stockés sur fichier pour être transmis aux programmes suivants.

2.2. Le programme MODSUR

L'objectif du programme est de fournir en fonction du temps sur la couche de surface, la répartition de l'eau disponible pour le ruissellement dans le réseau hydrographique principal, et pour l'infiltration vers les couches profondes.

Ce programme nécessite les données suivantes :

2.2.1. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les précipitations (pluie et eau de fonte de neige) doivent être fournies avec un pas de temps régulier sur un ensemble de zones pluviométriques homogènes recouvrant la couche de surface. Ces zones homogènes sont choisies d'après les caractéristiques pluviométriques régionales et introduites dans le modèle en attribuant un numéro de zone à chacune des mailles de la surface.

Les évapotranspirations potentielles sont dans l'état actuel supposées homogènes sur l'ensemble du domaine et introduites avec un pas de temps également régulier (mois, décade, ...).

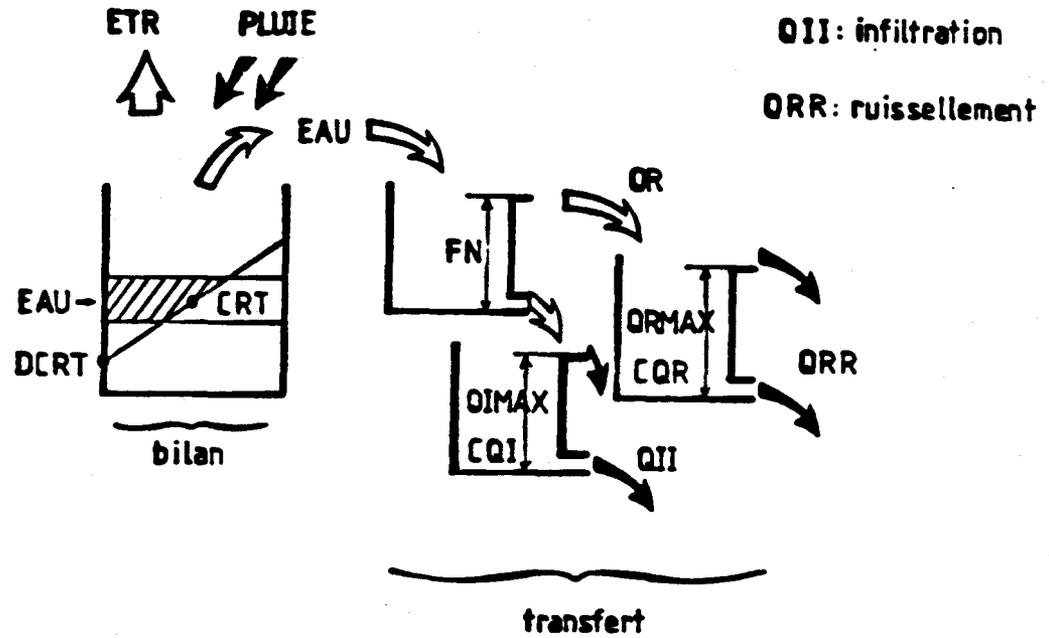
2.2.2. DONNÉES CARACTÉRISANT LES FONCTIONS PRODUCTIONS

Le rôle des fonctions productions est de répartir la lame d'eau précipitée entre ruissellement, infiltration et évapotranspiration. Ce calcul est mené à chaque pas de temps des données météorologiques, sur chacune des zones pluviométriques homogènes et pour différentes caractéristiques de fonctions productions, indépendamment du maillage de la couche de surface.

Chaque fonction production fonctionne suivant un mécanisme adapté au problème établi par l'opérateur et reste spécifique à la zone homogène déterminée au moment de la discrétisation spatiale de la surface. Chaque fonction production possède un nombre limité à 10 de paramètres fixés par l'opérateur (figure A4).

2.2.3. DONNÉES CARACTÉRISANT LES TEMPS DE CONCENTRATION DES BASSINS VERSANTS

Un temps de concentration est attribué à chaque bassin versant. Ce temps désigne la durée du plus long parcours sur le bassin et permet ainsi de classer les mailles figurant dans l'arbre d'écoulement en zones isochrones par rapport à l'exutoire de chaque sous-bassin. Plusieurs essais peuvent être réalisés avec différents temps, pour un même calcul.



$$\begin{aligned}
 R_{MAX} &= 2(CRT - DCRT) + DCRT & QR &= \max(0, EAU - QI) \\
 RBA &= \max(DCRT, R) - DCRT & ETR &= \min(R + P - EAU, ETP) \\
 RHA &= \min(R + P, R_{MAX}) - DCRT & R &= R + P - EAU - ETR \\
 DR &= \max(0, RHA - RBA) \\
 EAU &= \max(RP - R_{MAX}, 0) + DR \quad (RBA + DR) / (4(CRT - DCRT)) \\
 QI &= \min(EAU, FN)
 \end{aligned}$$

- DCRT Valeur minimale du stock en eau dans le sol en deçà de laquelle aucune quantité d'eau n'est disponible (mm)
- CRT Valeur moyenne du stock en eau dans le sol (mm)
- FN Valeur maximale de l'infiltration sur un pas de temps (mm)
- CQR Coefficient de tarrissement du réservoir de ruissellement
- QRMAX Niveau de débordement du réservoir de ruissellement (mm)
- CQI Coefficient de tarrissement du réservoir d'alimentation de la nappe
- QIMAX Niveau de débordement du réservoir d'alimentation de la nappe (mm)

Figure A.4 : Schéma de principe de la fonction production "type sol"

Outre la répartition de la lame d'eau précipitée vue précédemment, le programme MODSUR assure chronologiquement les opérations suivantes :

- a) l'évaluation globale des termes du bilan d'eau sur chacune des zones pluviométriques et des zones de production. L'examen des valeurs de chacun de ces termes permet d'apprécier l'adéquation de chacune des fonctions productions introduites et la validité des paramètres utilisés;
- b) l'évaluation globale des termes du bilan d'eau sur chaque sous-bassin versant et bassin étudié permet d'effectuer des comparaisons avec les termes du bilan propre du bassin;
- c) la détermination, pour chaque maille de la couche de surface et chaque pas de temps calcul, du volume de ruissellement et du volume d'infiltration net vers le souterrain. Au volume de ruissellement est ajouté le volume infiltré pour les mailles de surface n'ayant pas de correspondantes dans les couches du souterrain;
- d) la sommation, après transfert par isochronisme, des volumes ruisselés sur toutes les mailles d'un sous-bassin versant, attachée à la maille "rivière" exutoire de ce sous-bassin, et ce, pour tous les sous-bassins.

- e) la mémorisation à chaque pas de temps de calcul des débits ruisselés sur les sous-bassins et des volumes infiltrés sur les mailles de surface, qui seront utilisés ultérieurement dans le programme MODCOU.
- f) l'évaluation du débit dû au seul ruissellement aux exutoires des bassins par un second transfert isochrone sur les mailles "rivières" de ces bassins.

Au terme du programme MODSUR, deux types de contrôle sont ainsi possibles :

- appréciation du bilan hydrologique global pour chaque bassin et pour diverses périodes de simulation permettant d'intervenir sur les paramètres des fonctions productions;
- évaluation des temps de concentration des bassins par recherche du synchronisme entre la composante ruissellement des crues calculées et les crues observées.

2.3. Programme NONSAT

Ce programme assure, en l'état actuel, le transfert d'eau de l'infiltration nette calculée précédemment au niveau de la nappe au moyen d'une série de N réservoirs linéaires (comparable au modèle de NASH) ayant le même temps de délai. Le nombre de réservoirs et le temps de délai, pour chaque

zone homogène du sol non saturé, sont choisis par l'opérateur selon ses propres connaissances.

Les graphiques de variations de l'alimentation de la nappe dans le temps pour des mailles pré-choisies permettent de visualiser l'influence de ces transferts.

2.4. Programme MODCOU

Ce programme constitue le modèle couplé eau de surface - eau souterraine proprement dit.

Il effectue le calcul des transferts de l'eau de surface et de l'eau souterraine ainsi que celui de leur interaction suivant un pas de temps choisi par l'utilisateur comme multiple ou sous-multiple du pas de temps des données météorologiques.

La période totale de simulation est organisée en phase de calcul servant à l'introduction de données lentement variables et à des contrôles intermédiaires.

Les données requises sont les suivantes :

- 1) Données hydrologiques (discrétisées sur les mailles rivières) :

- volumes d'eau initiaux dans le réseau hydrographique;
- paramètres définissant les coefficients de tarissement.

2) Données hydrogéologiques (discrétisées sur les mailles des couches souterraines) :

- piézométrie initiale;
- transmissivités, coefficients de drainage, coefficients d'emmagasinement, etc ...;
- prélèvements et apports dans les nappes autres que l'infiltration;
- conditions aux limites des nappes.

3) Données caractérisant les relations nappe-rivière (discrétisées sur les mailles souterraines situées sur le tracé des rivières) :

- niveau de drainage des nappes dans la couche de surface;
- coefficients de transfert nappe-rivière;
- infiltration maximale en rivière.

4) Données concernant le calcul numérique :

- durée de la simulation;
- durée du pas de temps du calcul;
- critères de convergence, etc ...

5) Données concernant l'édition des résultats :

- édition sous forme de tableau des paramètres hydrologiques introduits sur chaque maille (en option);
- bilan hydraulique souterrain au dernier pas de temps;
- bilan hydraulique global sur la phase de calcul;
- cartes piézométriques, etc ...

La simulation consiste en trois opérations répétées à chaque pas de temps calcul :

- calcul du transfert souterrain, exécuté par intégration numérique des équations de l'écoulement en milieu poreux discrétisées sur les mailles des couches profondes;
- évaluation des débits échangés entre les nappes et le réseau hydrographique;
- calcul du transfert de surface.

SYNTHÈSE

En guise de conclusion, on présente l'ensemble du modèle sous forme d'organigrammes généraux (figures A5, A6, A7 et A8).

Chacun des quatre programmes doit être utilisé séquentiellement puisqu'ils font appel à des données spécifiques et à des résultats issus du programme précédent.

Voici un résumé succinct des diverses données d'entrée au modèle et des résultats pouvant être obtenus.

Les données d'entrées :

- la description des domaines de surface et souterrain (cartes topographiques, géologiques et hydrologiques);
- la pluviométrie, l'évapotranspiration potentielle;
- données souterraines : transmissivités, coefficients d'emménagement, coefficients de drainage, coefficients de transfert nappe-rivière, niveau de drainage des nappes, prélèvement en nappe, en rivière, niveaux piézométriques initiaux;
- données de surface : stocks initiaux en rivière, coefficients de vidange.

Les résultats :

- le bilan hydrique sur chaque zone de production pour chacun des pluviomètres;
- le bilan du transfert souterrain par couche et/ou pour l'ensemble du système hydrogéologique;
- le bilan de surface;
- des tableaux de la piézométrie calculée et/ou des valeurs des différents paramètres utilisés;
- des cartes piézométriques et/ou des différents paramètres;
- les débits écoulés aux stations hydrométriques représentées par une sélection de mailles rivières;
- les variations des niveaux piézométriques en un choix de mailles des couches souterraines.

GEOCOU

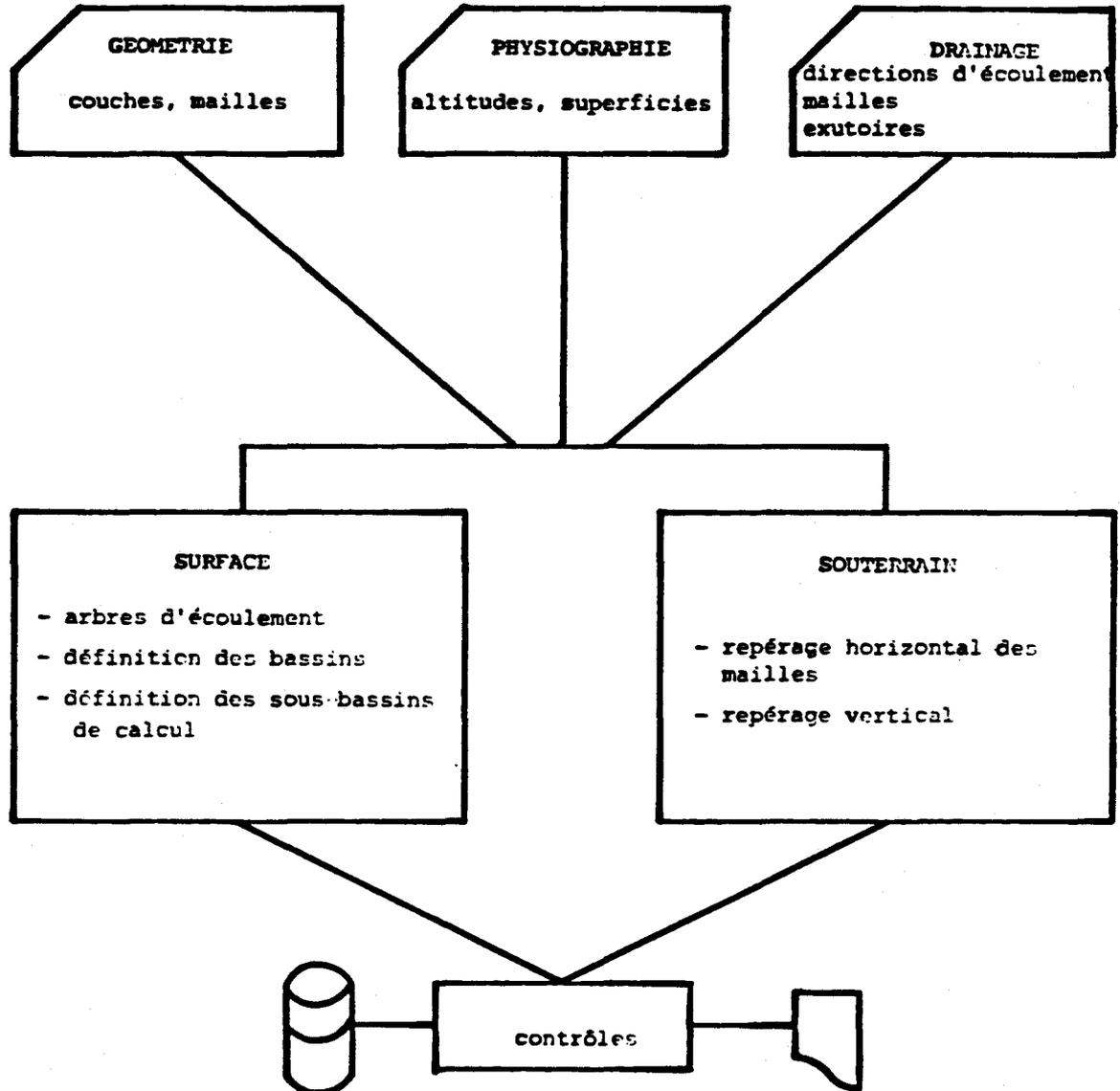


Figure A.5: Programme GEOCOU.
Il établit tous les éléments de géométrie du modèle.

MODSUR

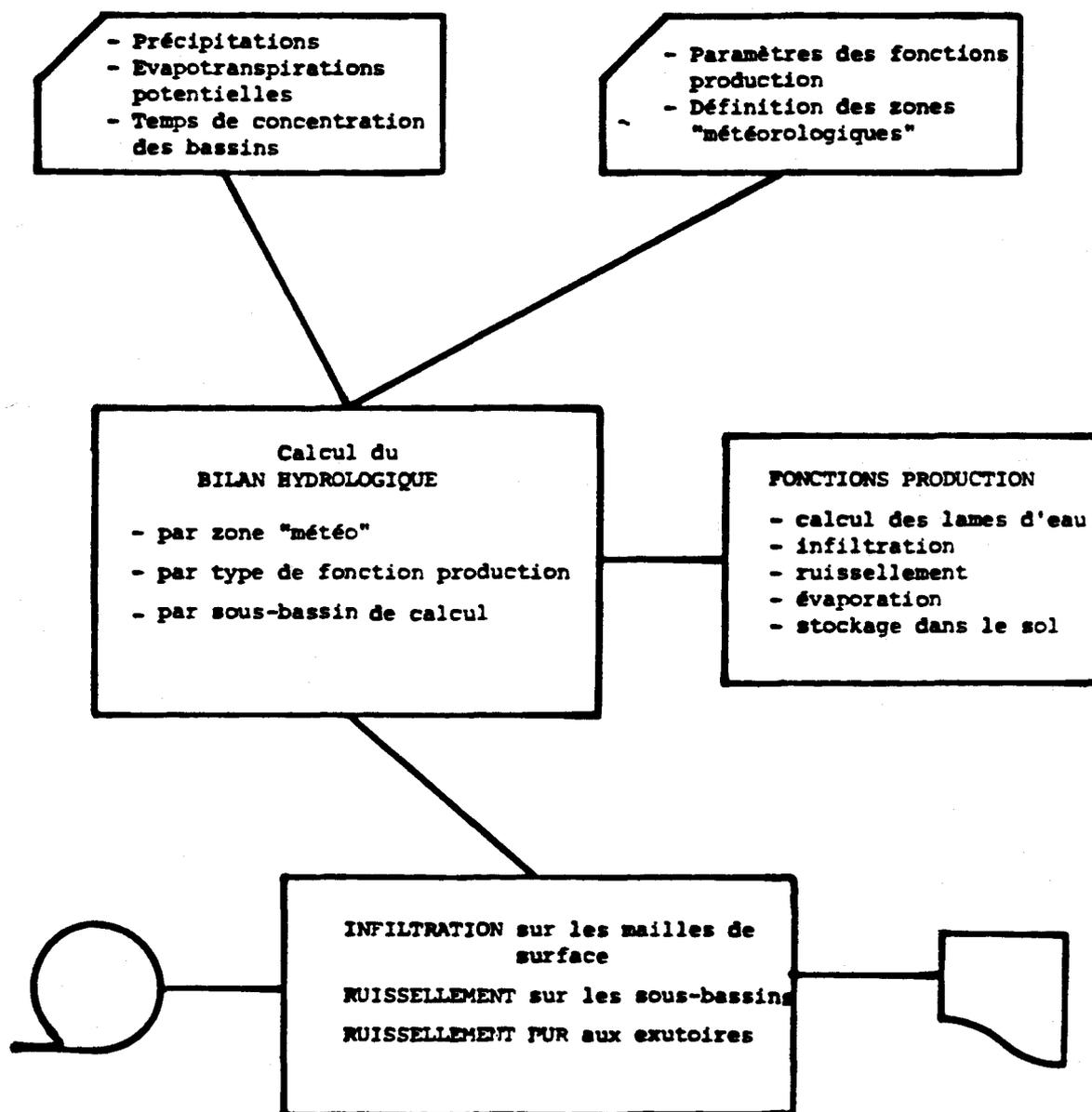


Figure A.6: Programme MODSUR.
Il effectue le calcul de la production et le transfert du ruissellement pur.

NONSAT

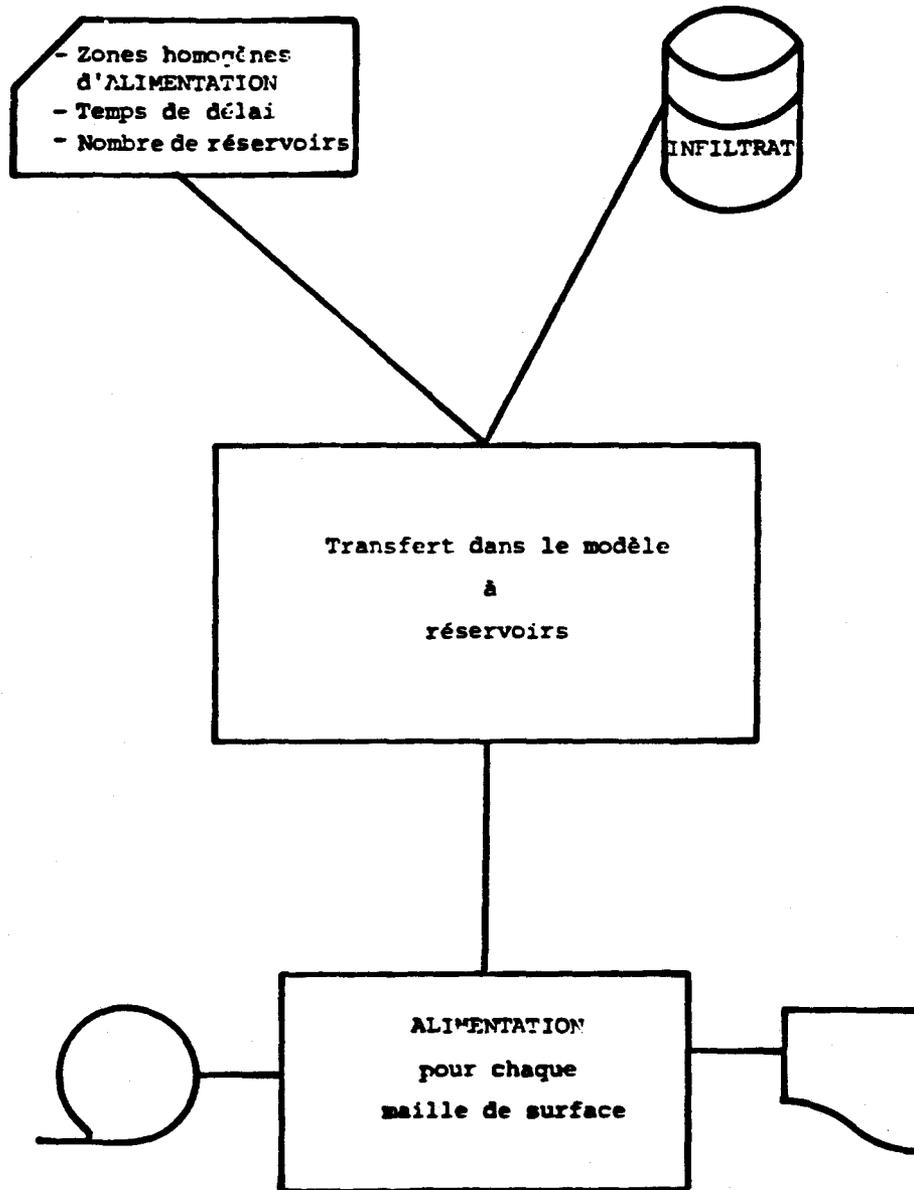


Figure A.7: Programme NONSAT
Il calcule le transfert dans la zone saturée

MODCOU

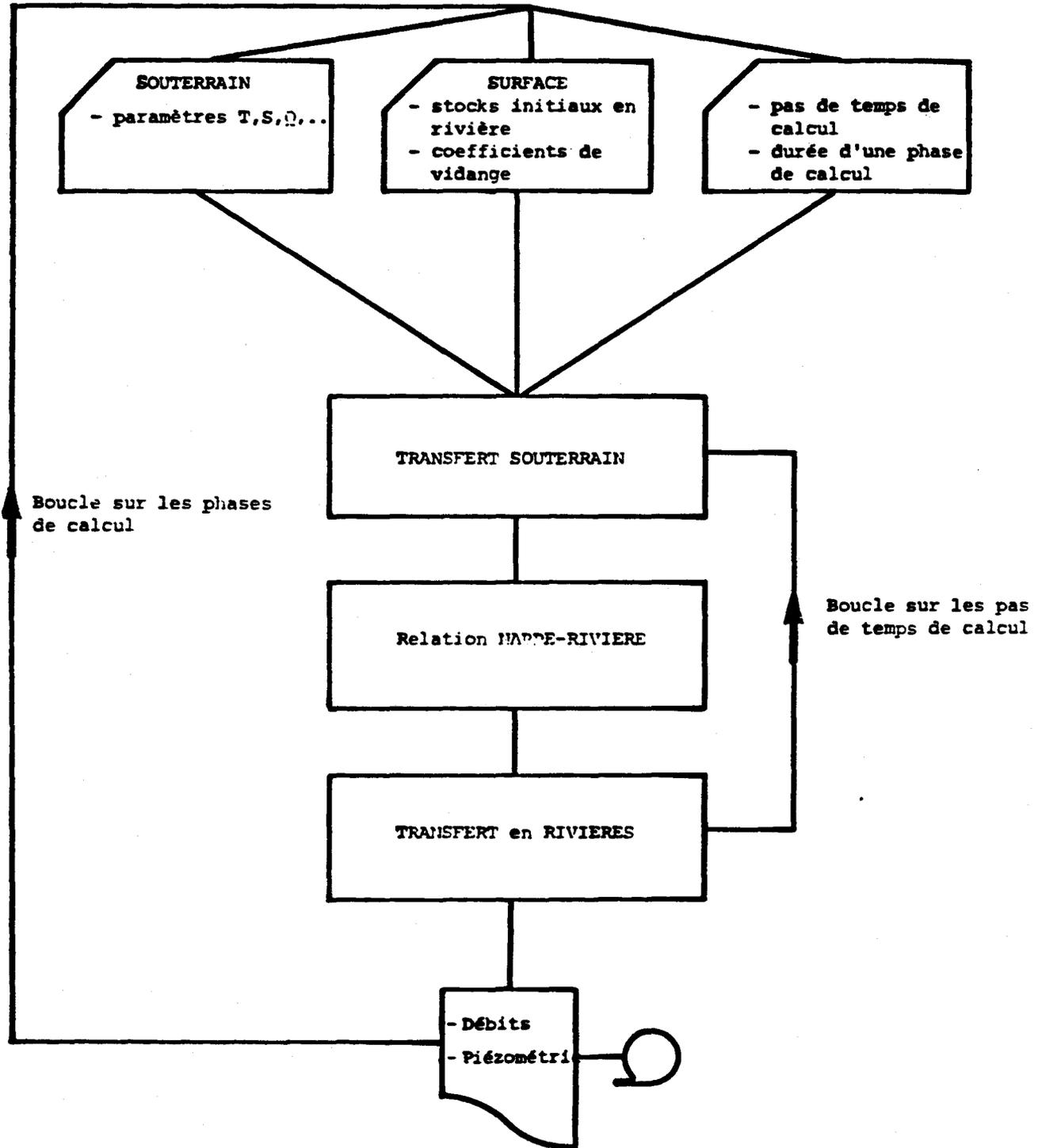


Figure A.8: Programme MODCOU
Il effectue les transferts de surface et les transferts souterrains en tenant compte de leurs interactions